

# CERN-Masterclass "Hands on Particle Physics": Tagesprogramm

- **10.00:** Begrüßung
- **10.15 – 12.15:** Vorträge
  - **10.15: Ein Universum voller Teilchen** (M. zur Nedden)  
Einführung in die Teilchenphysik
  - **11.30: Das Unsichtbare sichtbar machen** (U. Schwanke)  
Detektoren und Wechselwirkung von Teilchen mit Materie
- **12.15 – 13.15:** Mittagessen (Wista)
- **13.15 – 15.15:** PC-Übung
- **15.15 – 16.00:** gemeinsame Auswertung / Vortrag über CERN
- **16.00 – 16.15:** Pause
- **16.15 – 18.00:** Europaweite Videokonferenz (Schüler)  
Vorstellung Netzwerk Teilchenwelt und Teilchenphysik im  
Umterricht (Lehrer)
- **18.00:** Ende

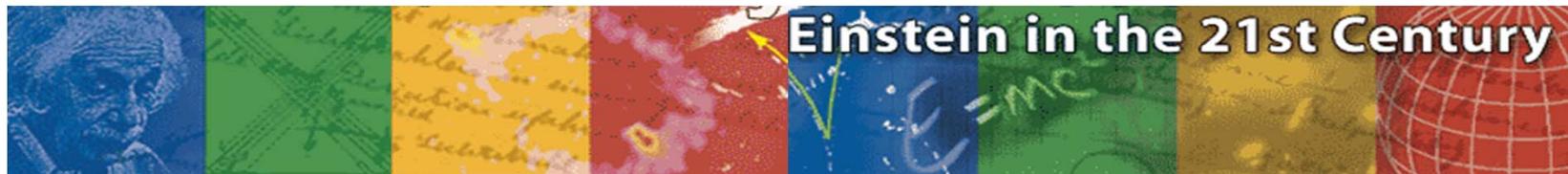
# Personen

- Adelheid Sommer, DESY, Zeuthen
- Dr. Martin zur Nedden, HU Berlin
- Dr. Ullrich Schwanke, HU Berlin
- HU Berlin: Carsten Kendziorra, Luise Poley, Lukas Heinrich, Patrick Rieck, Thomas Kintscher, Martin Mamach
- DESY, Zeuthen: Andreas Schaelike, Clemens Lange, Christoph Wasiki

# Die Welt der kleinsten Teilchen

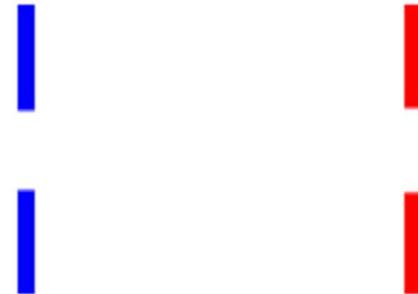


**Dr. Martin zur Nedden**  
**Humboldt-Universität zu Berlin**



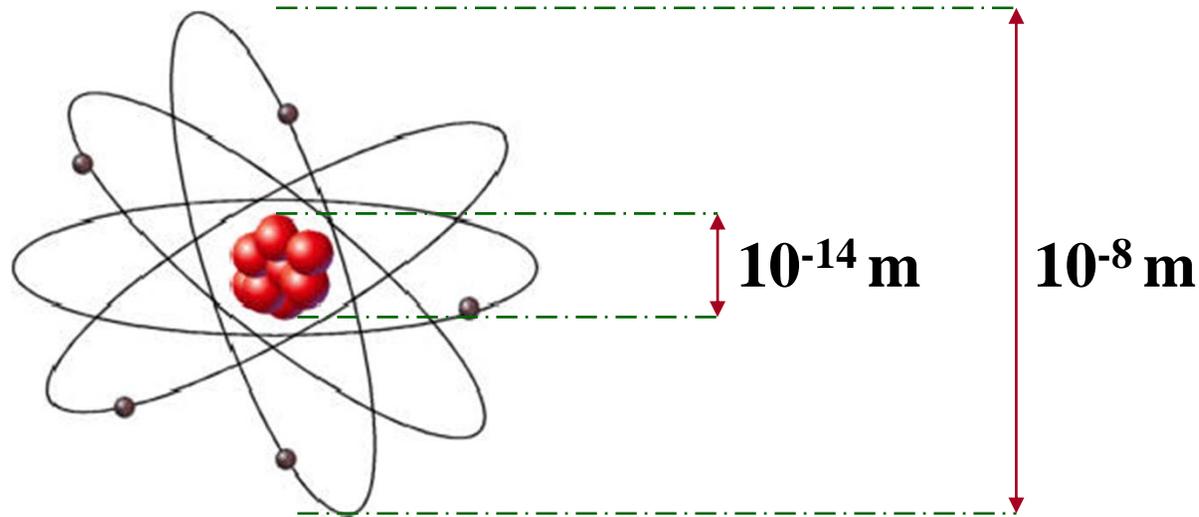
# Nützliche Einheiten für Teilchen

- 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**

# Rutherfords Atommodell



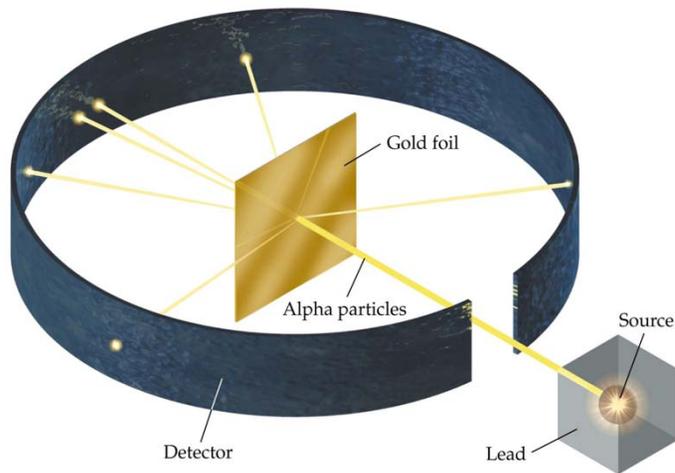
**Kern : Atom = 1 : 10 000  $\Rightarrow$  das Atom ist (fast) leer !**

Und das **Atom ist nicht unteilbar** –  
es besteht aus **Elektronen** und dem **Kern**

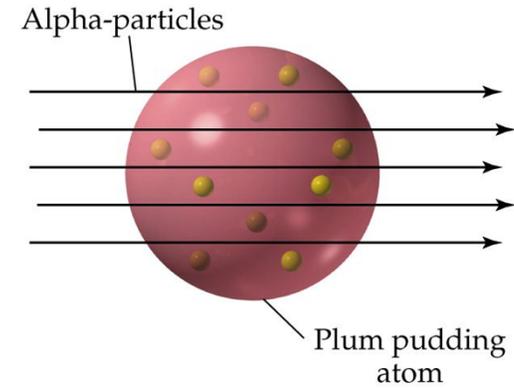
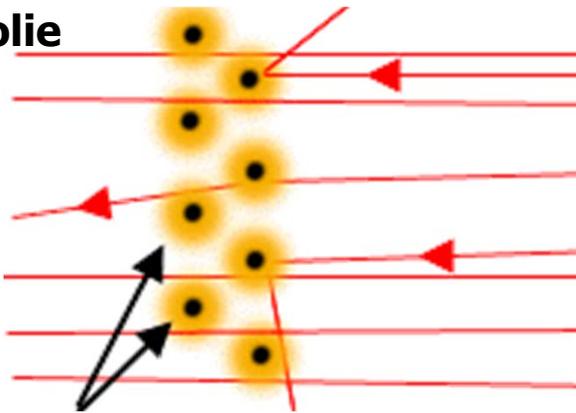
**Sind diese wiederum fundamental?**

# Streuversuche: Unsichtbares Sichtbar machen

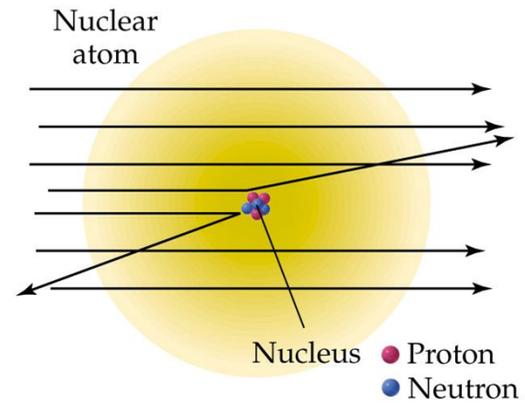
## E.Rutherford: Struktur der Atome durch Streuversuche



### Goldatome in einer Folie



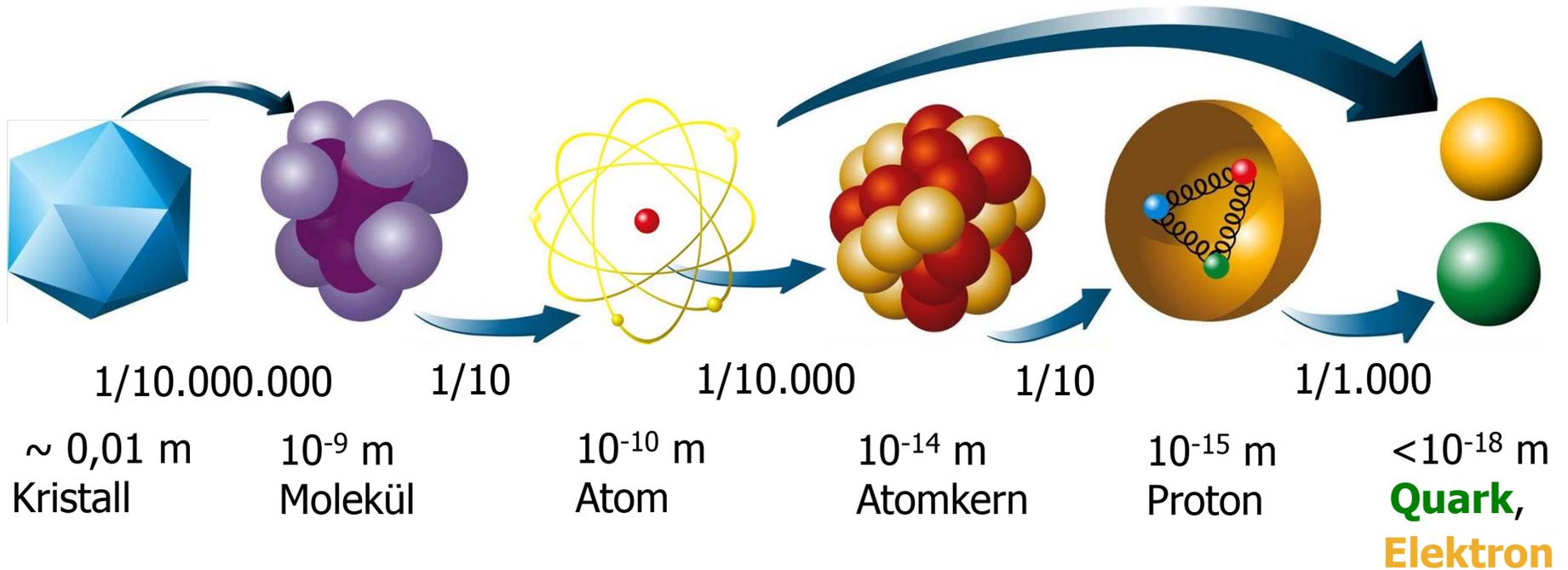
(a) Rutherford's Expected Result



(b) Rutherford's Actual Result

Rutherford Applet

# Der Aufbau der Materie



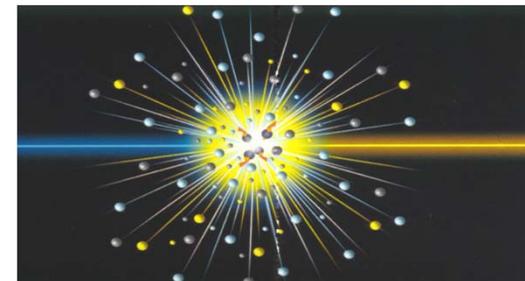
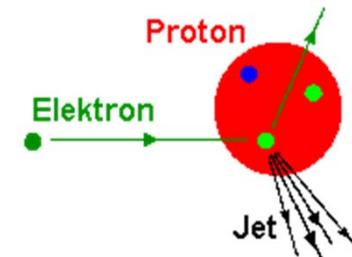
**Stecknadelkopf:**  
 $10^{-3}\text{m} = 0,001\text{m}$

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

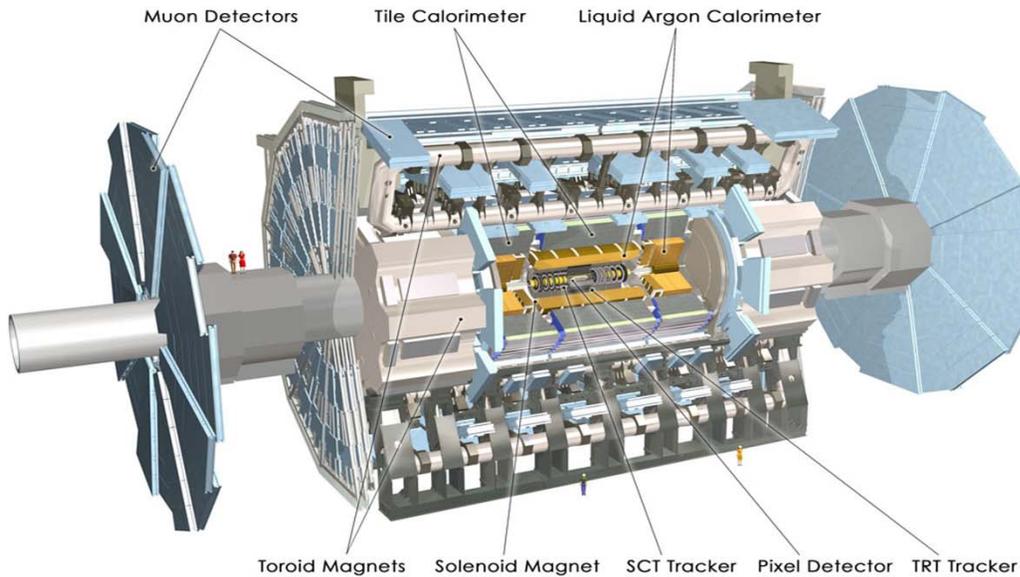
# Experimente mit Teilchenstrahlen

Teilchenstrahlen höchster Energie 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

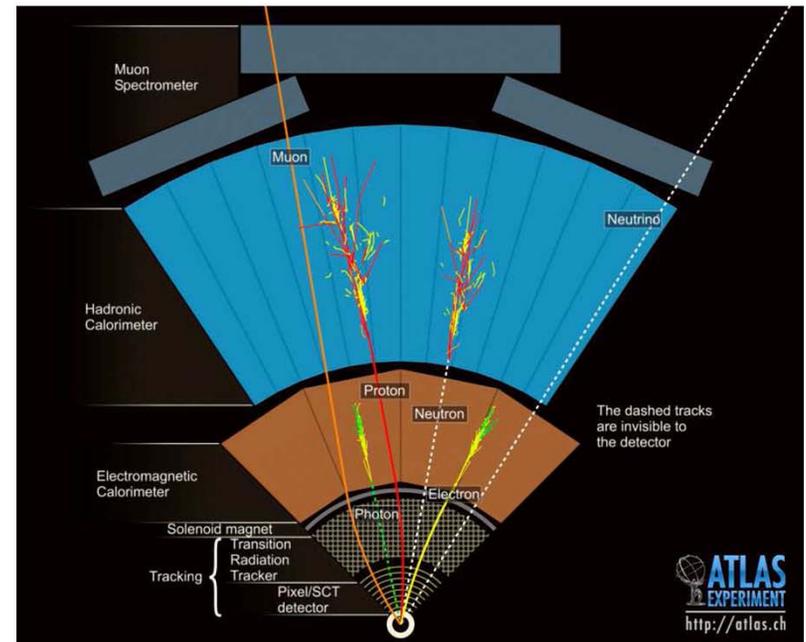


# Nachweis der Reaktionen: Grosseexperimente



<b>Experiment ATLAS am CERN:</b>	
<b>Durchmesser</b>	<b>25 m</b>
<b>Barrel Toroid Länge</b>	<b>26 m</b>
<b>Gesamtlänge</b>	<b>46 m</b>
<b>Totales Gewicht</b>	<b>7000 t</b>

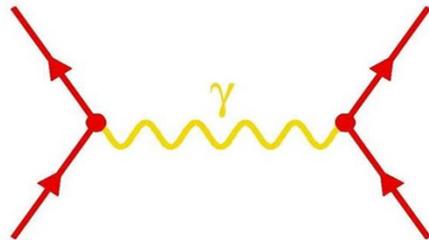
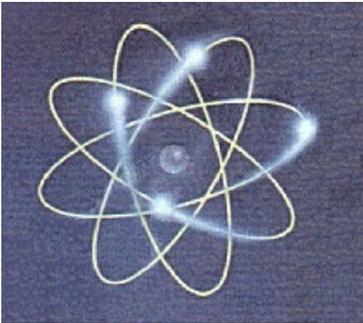
**Grossdetektor zum Nachweis der Wechselwirkungen: Genau Erklärung im Vortrag von Dr. U. Schwanke**



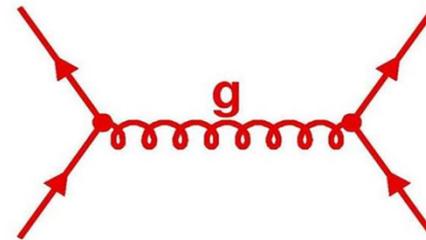
# Die vier Grundkräfte

- 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

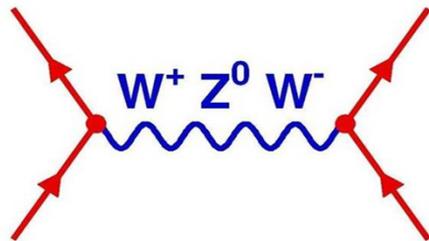
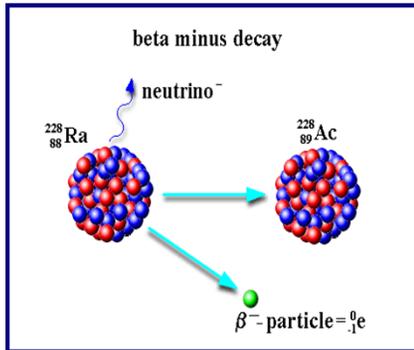
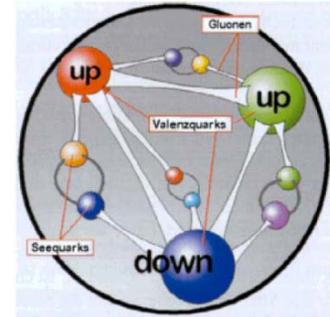
# Teilchen als Kraftvermittler



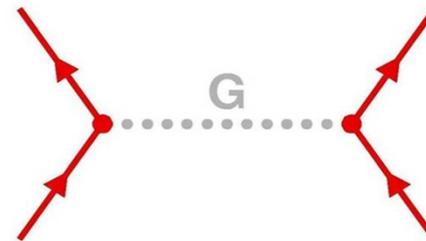
elektromagn. Kraft



starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation

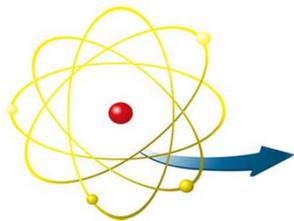


**Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder**

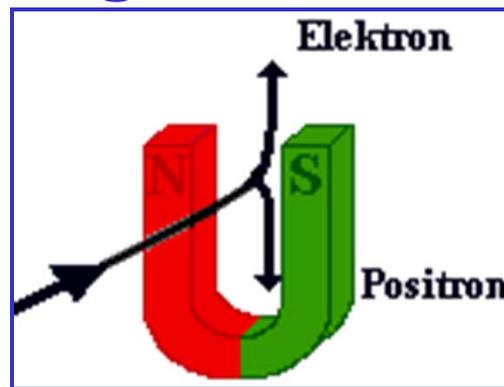
# Elektromagnetische Wechselwirkung

bekannteste aller Kräfte:

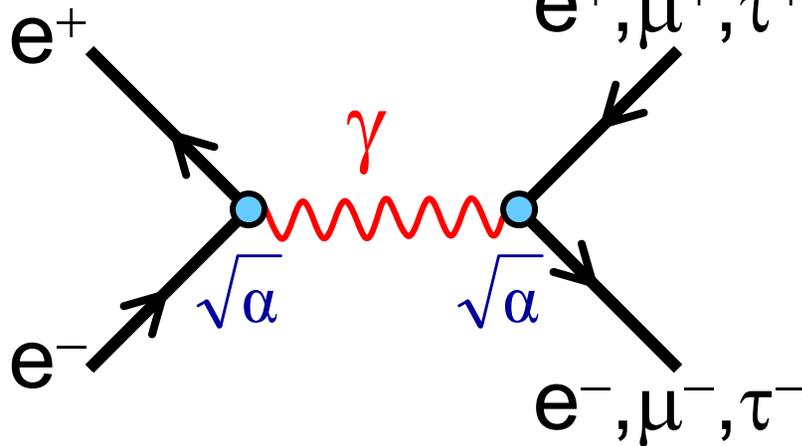
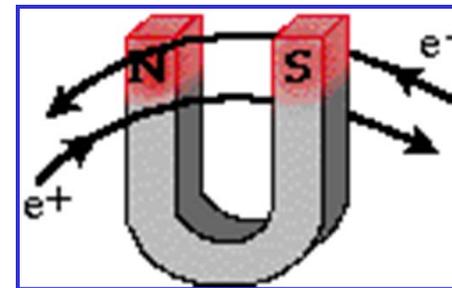
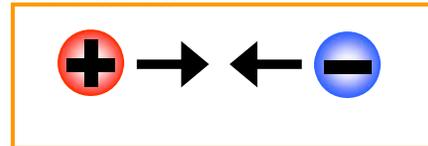
**elektrische** und **magnetische** Phänomene



Botenteilchen:  
**Photon  $\gamma$**



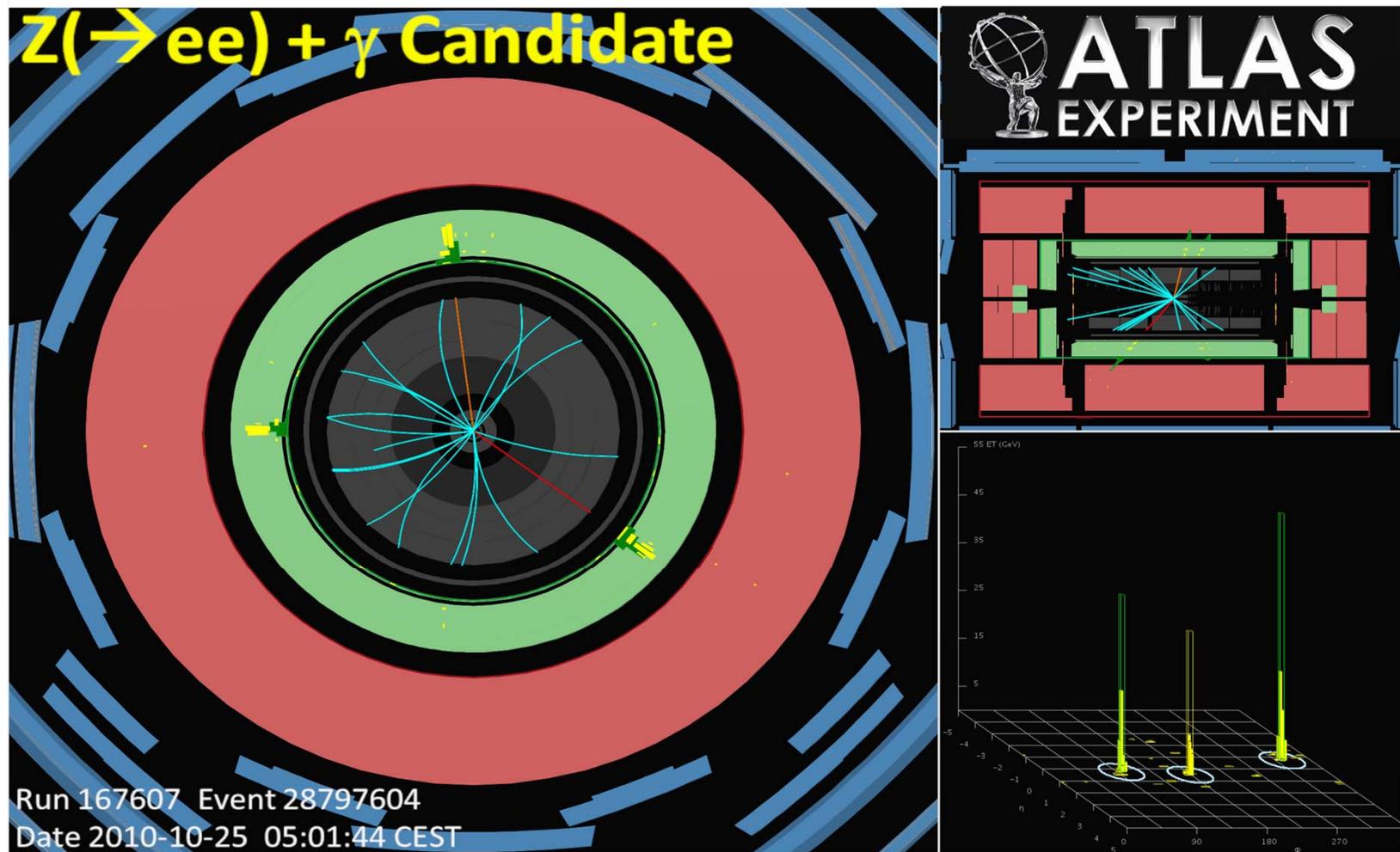
$e^+, \mu^+, \tau^+$



**Verantwortlich u.a. für:**

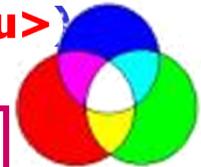
- Elektrizität
- Zusammenhalt der Atome und Moleküle
- elektromagnetische Wellen

# Ereignis mit "Photon" im Detektor



# Die starke Kraft: „Quantenchromodynamik“

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

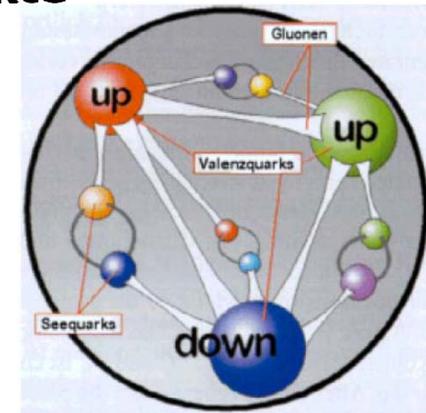
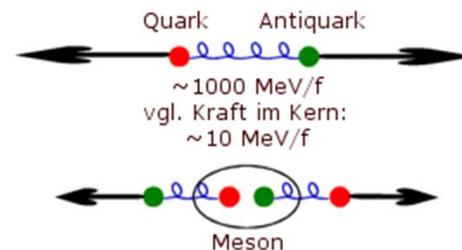
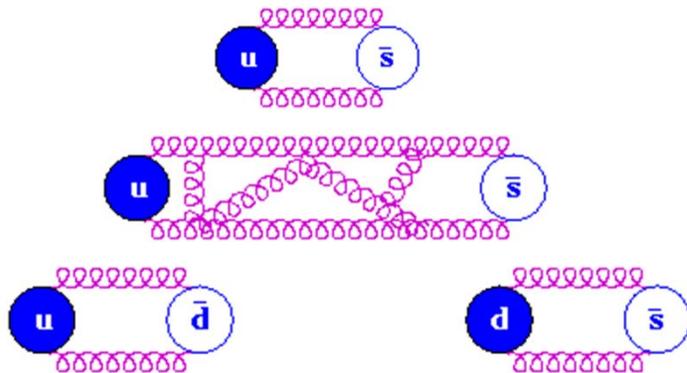


Grund:

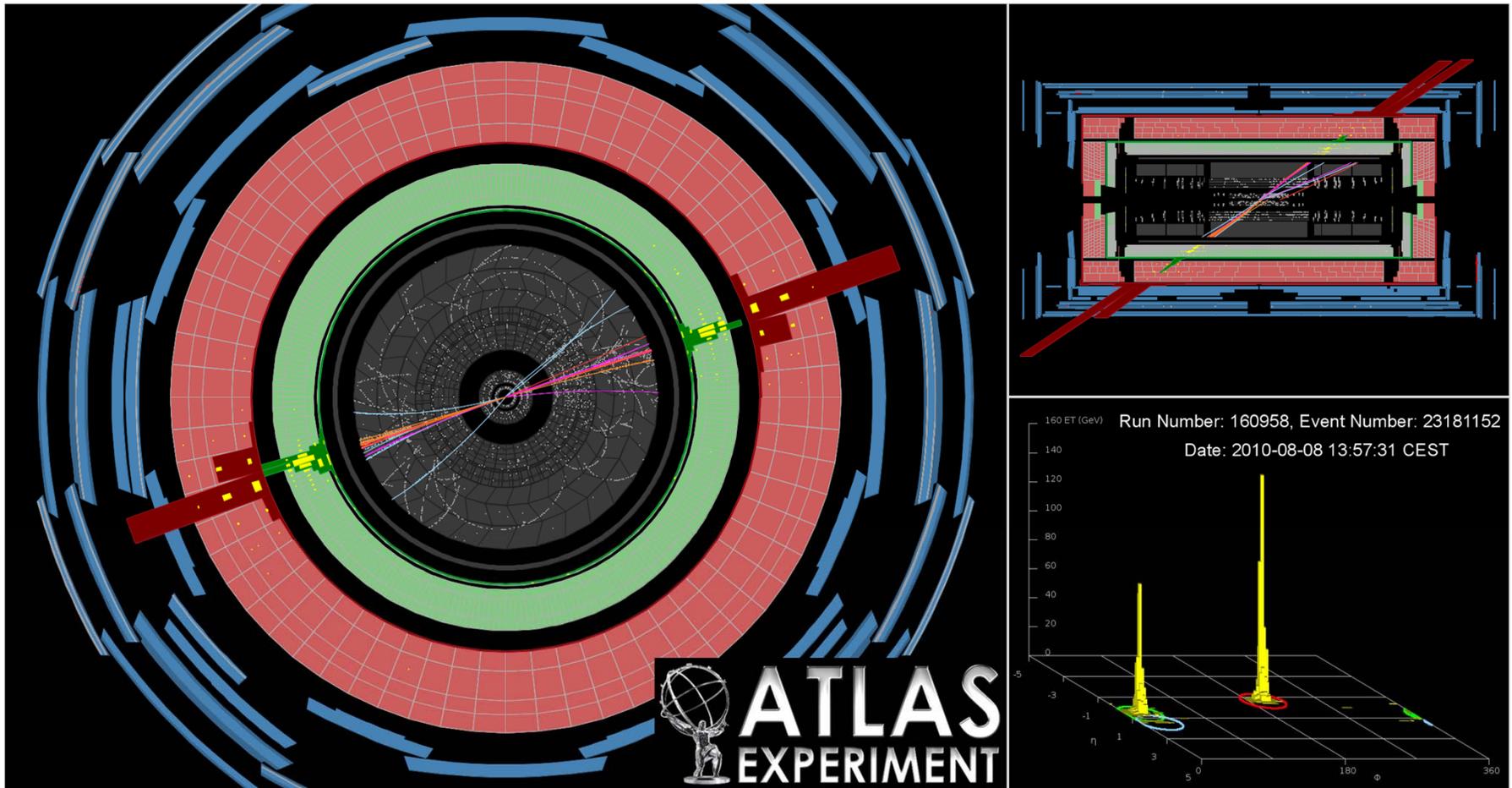
3 Ladungen: **rot**, **grün**, **blau**

## 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: Bündel von Quarks!

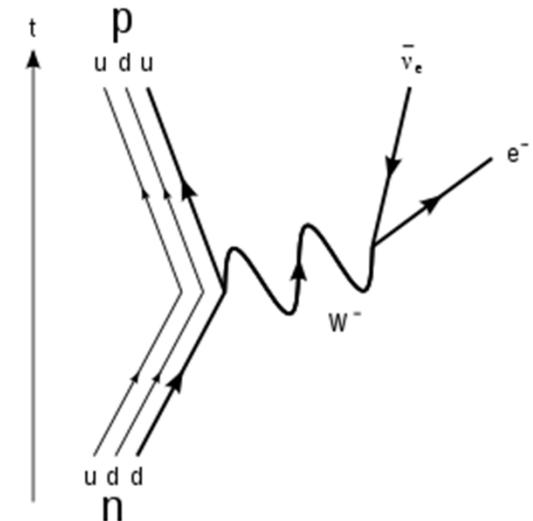
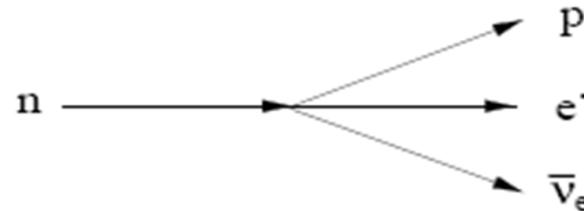
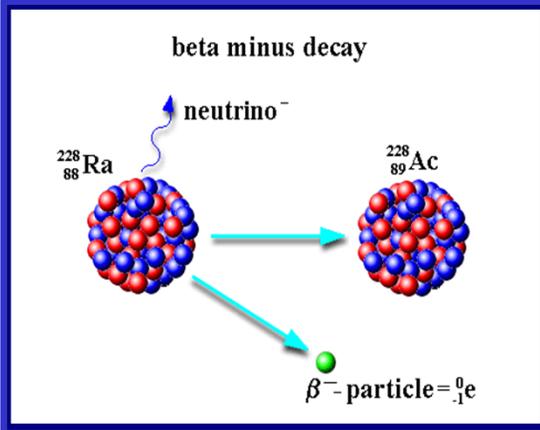


# Entdeckung der schwachen Wechselwirkung

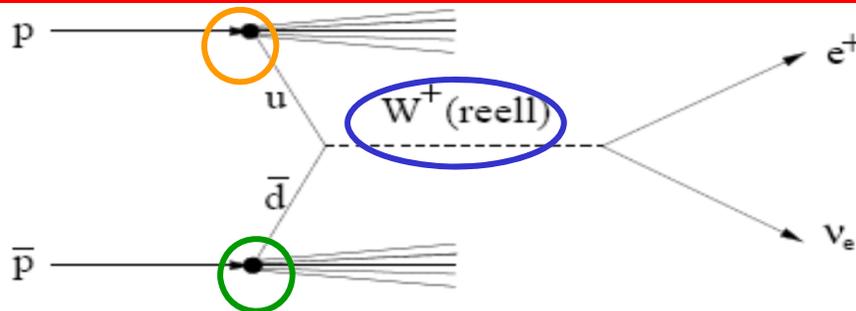
nuklearer  $\beta$ -Zerfall beruht auf dem Neutronenzerfall

Quark-Niveau:

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

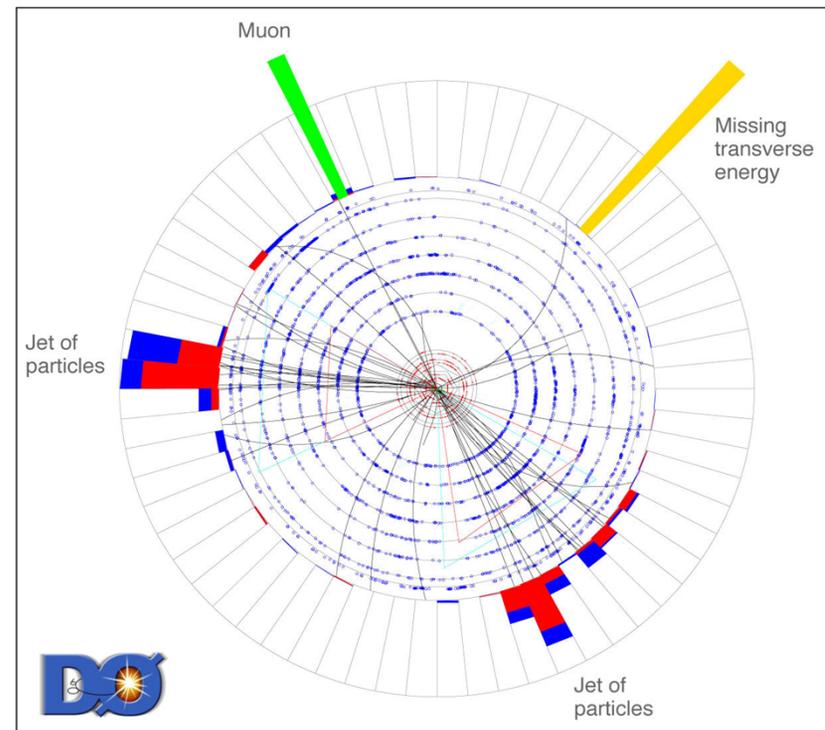
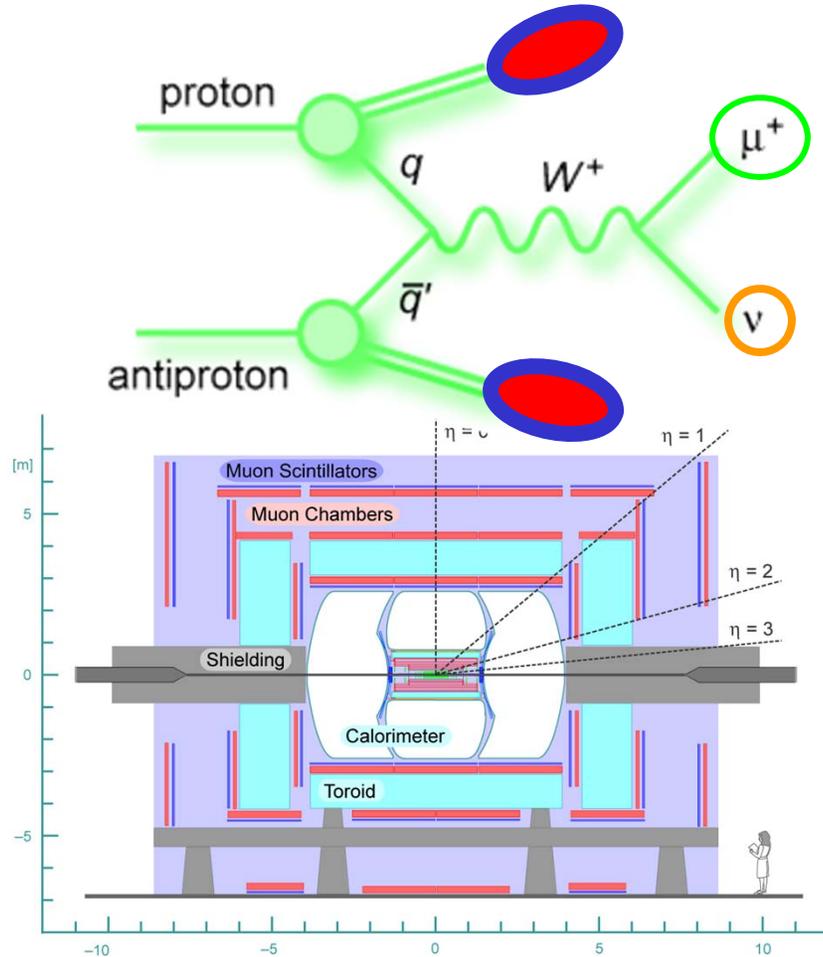


Produktion reeller W-Bosonen in Wechselwirkungen von **Proton (Quark)** und **Antiproton (Antiquark)**



# Messung des W-Bosons

Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung



Nachweis des W-Bosons:

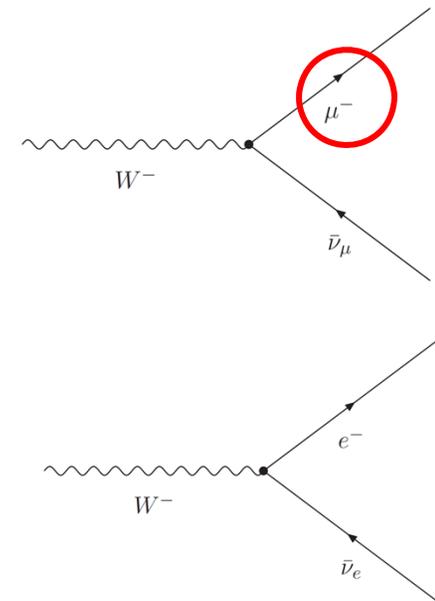
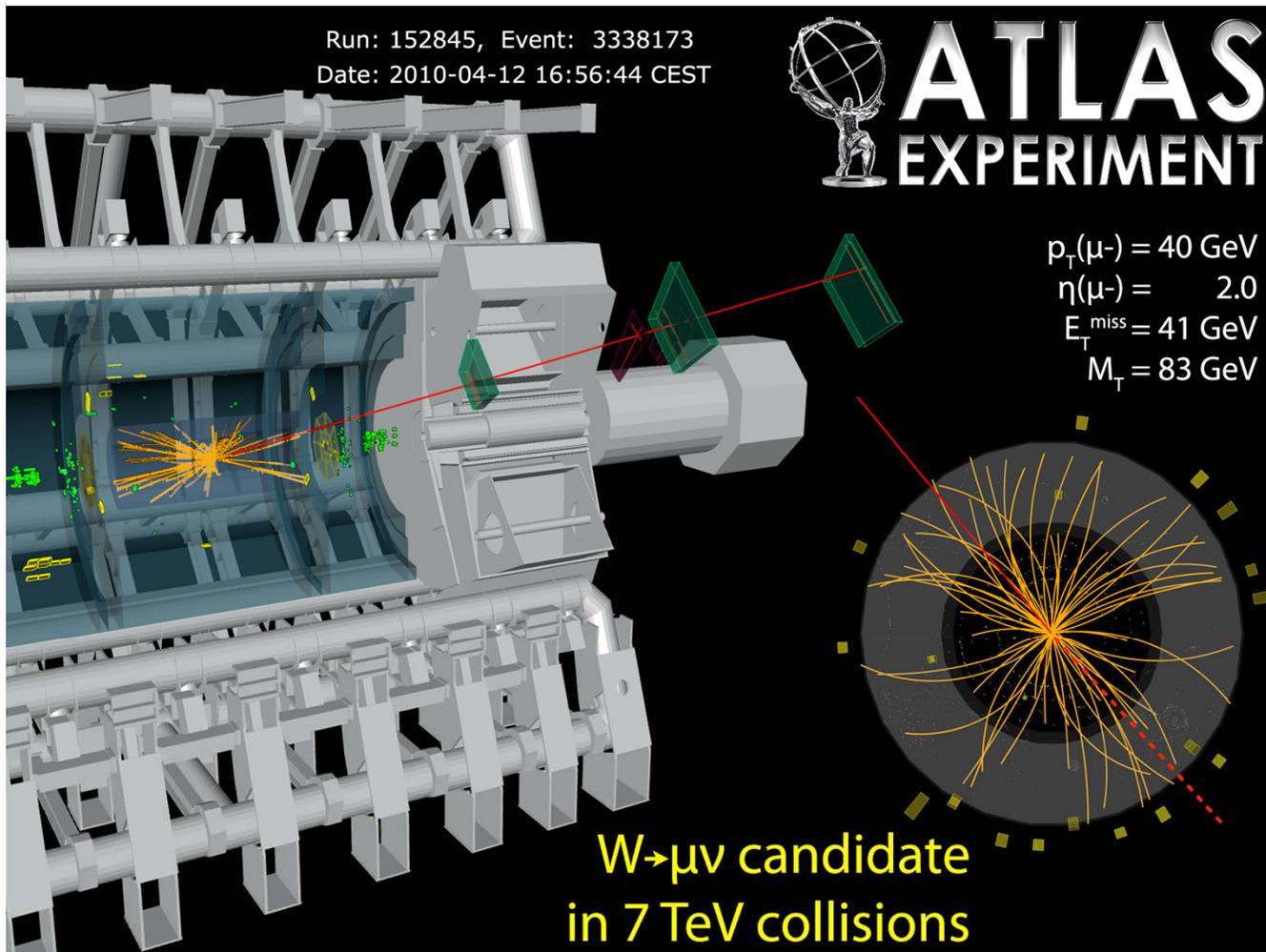
$\nu$ : kann nicht gemessen werden

→ Vermisste Energie

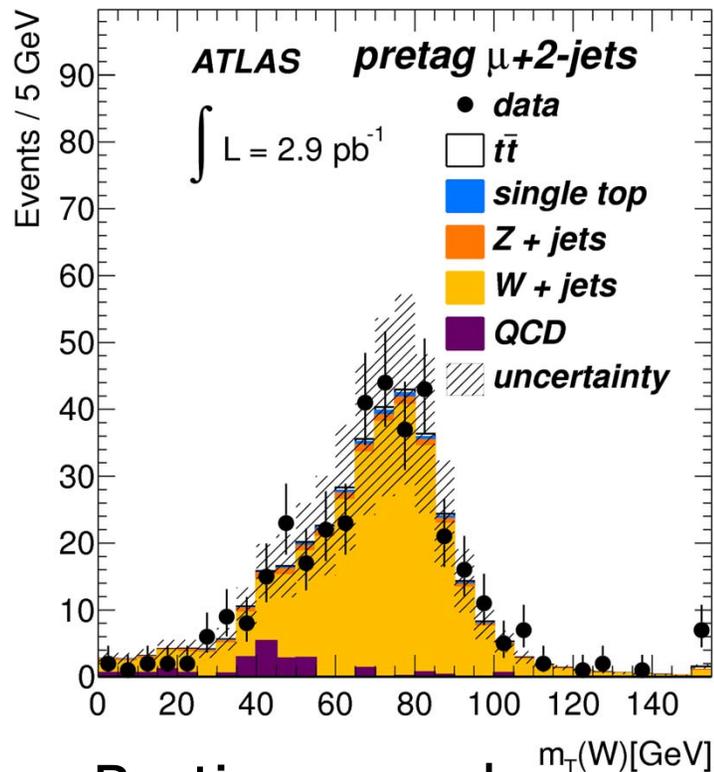
$\mu$ : deutliche Signatur im Detektor

→ W-Massenrekonstruktion:  $m_W \approx 80 \text{ GeV}$

# W-Boson im Detektor am LHC

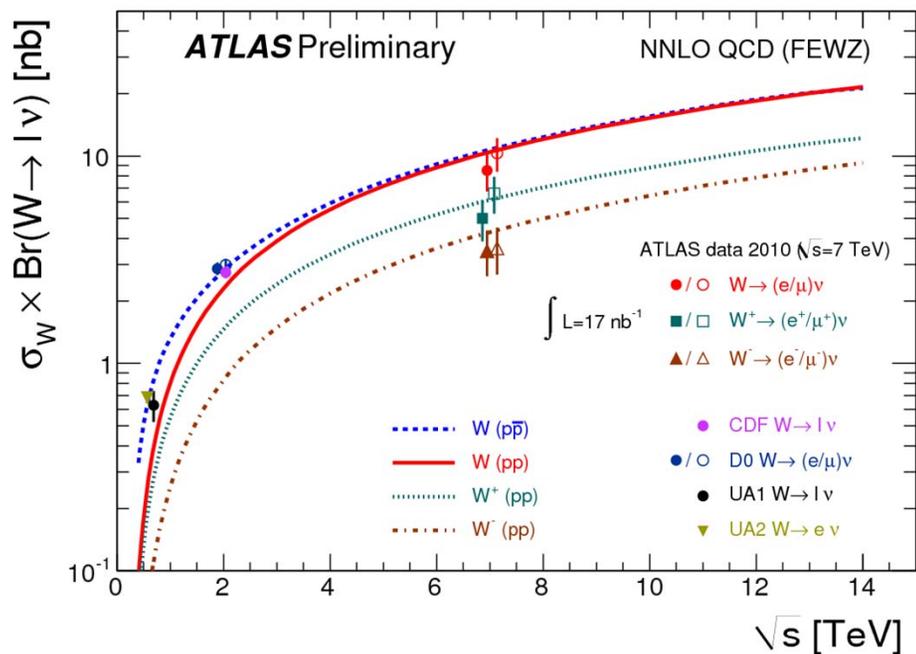


# Vermessung des W-Bosons



Bestimmung der  
W-Boson Masse

Bestätigung der  
theoretischen  
Vorhersage



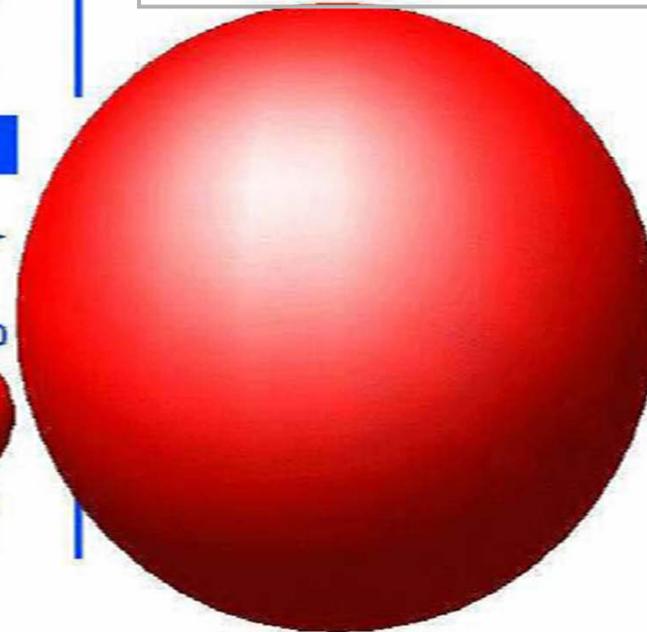
# Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

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

		LEPTONS		
LADUNG				
0	Electron Neutrino Mass ~0	Muon Neutrino ~0	Tau Neutrino ~0	
-1	Electron .511	Muon 105.7	Tau 1 777	
		QUARKS		
+2/3	Up Mass: 5	Charm 1 500	Top ~180 000	→
-1/3	Down 8	Strange 160	Bottom 4 250	

**Strukturlose**, fundamentale  
Teilchen: Alle **Leptonen**

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



# 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 ( $\gamma$ )

## Noch nicht entdeckt:

**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<sup>\*</sup>**  
boson

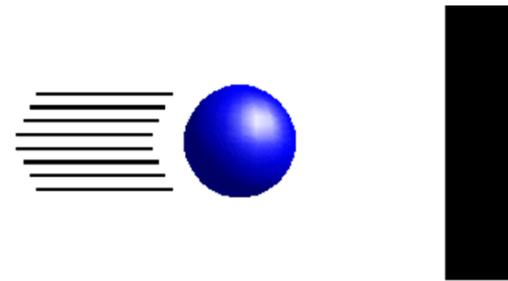
\*Yet to be confirmed

Source: AAAS

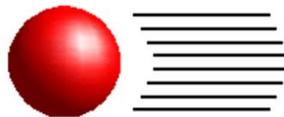
sehr erfolgreiches Modell: bisher in allen experimentellen Tests gut bestätigt

# 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)

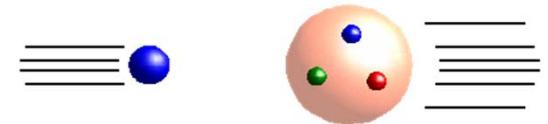
- **ILC** (International Linear Collider) ab 2015(?)



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

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

(e: 30 GeV, p: 920 GeV)



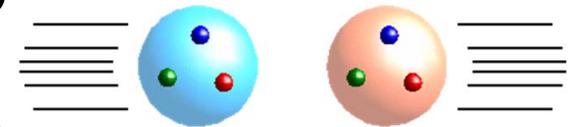
- **Hadron-Hadron-Collider: Entdeckungsmaschinen**

- **TEVATRON, FERMILAB** in Chicago, bis 2009

(900 GeV pro Strahl)

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

(7000 GeV pro Strahl)



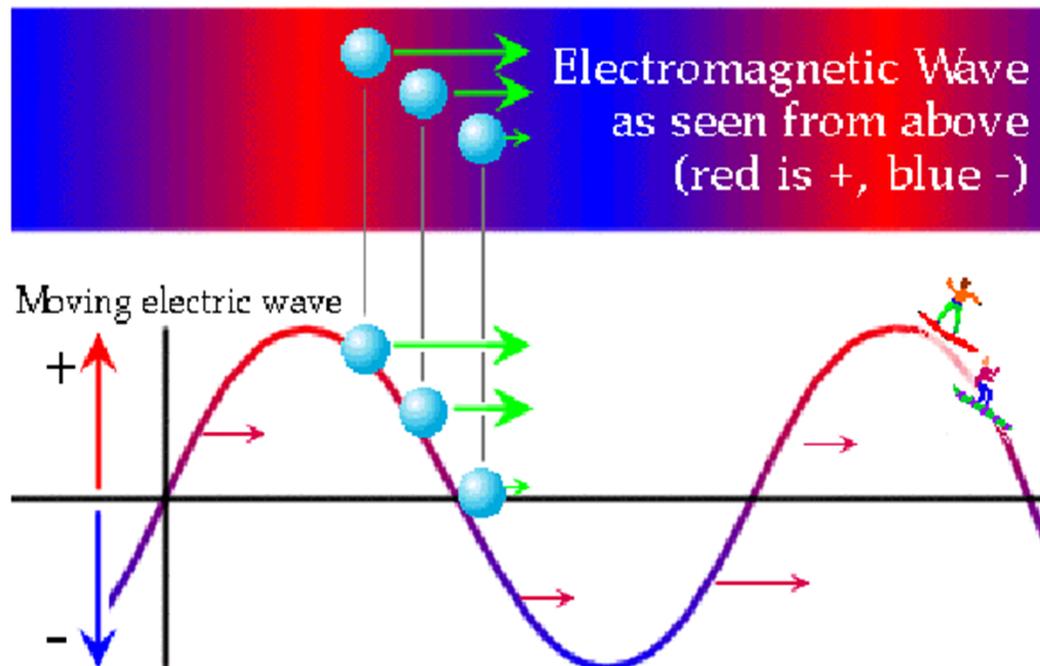
# Wozu Beschleuniger und Detektoren?

- Materie um uns herum ist aus Teilchen der ersten Generation/Familie aufgebaut: Protonen, Neutronen, Elektronen, Elektron-Neutrinos
- alle anderen Teilchen müssen **produziert** werden
  - $E=mc^2$  : benötigte Energie, um die Massen zu erzeugen
  - hochenergetische **Beschleuniger** notwendig
- Teilchen sollen nachgewiesen werden: **Detektoren** (Vortrag U. Schwanke)

# Wie beschleunigt man ein Teilchen?

Mit einem elektrischen Feld!

1 Positive particles just sitting there



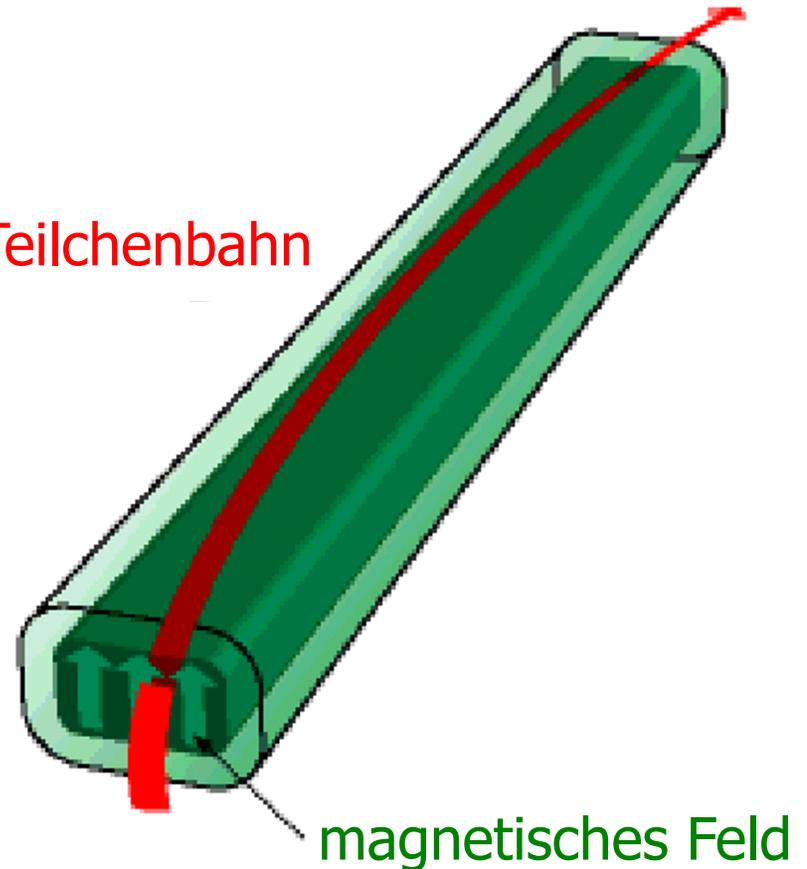
Dies ist nur möglich mit elektrisch **geladenen** Teilchen!

# Wie lenkt man ein Teilchen?

Mit einem Magnetfeld! Teilchenbahn

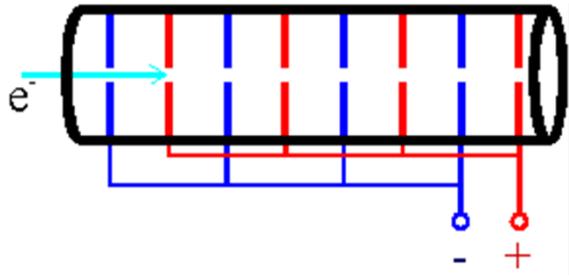
sehr starke Magnetfelder  
notwendig:

- hoher Stromverbrauch
- nur möglich mit supraleitenden Magneten

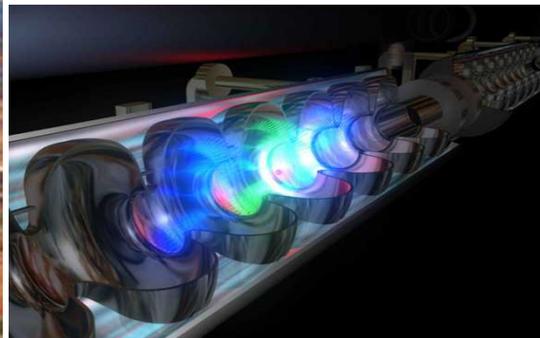
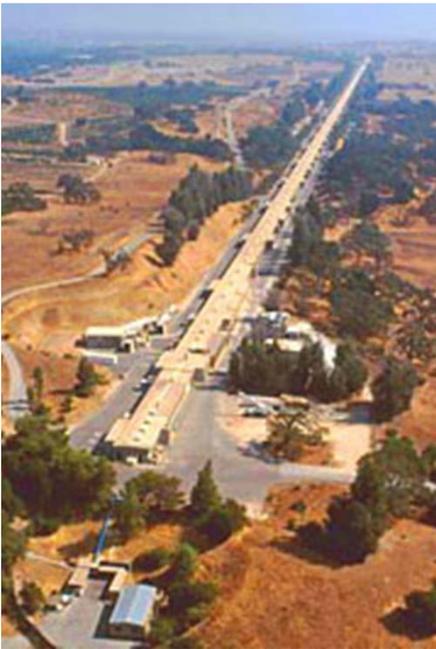


# Verschiedene Arten von Beschleunigern

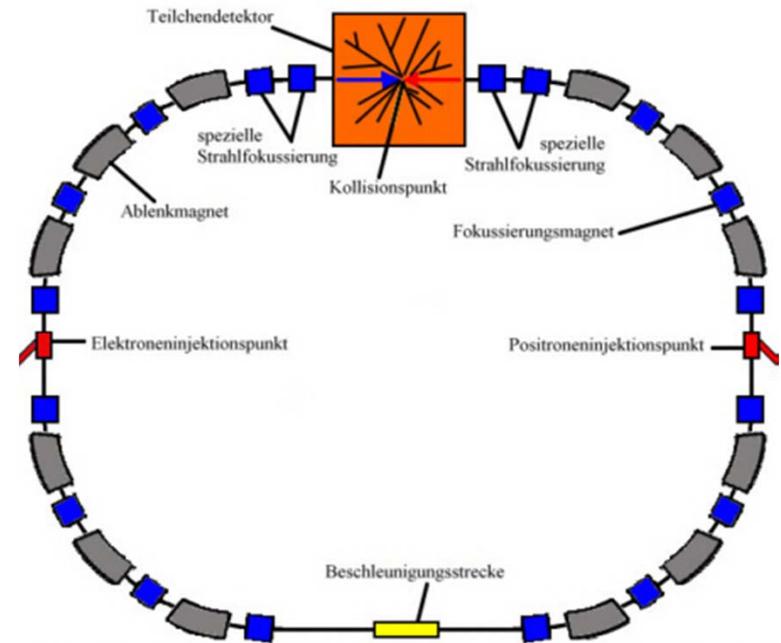
- Funktionsprinzip:  
Simulation



## Linearbeschleuniger:



## Speicherring:



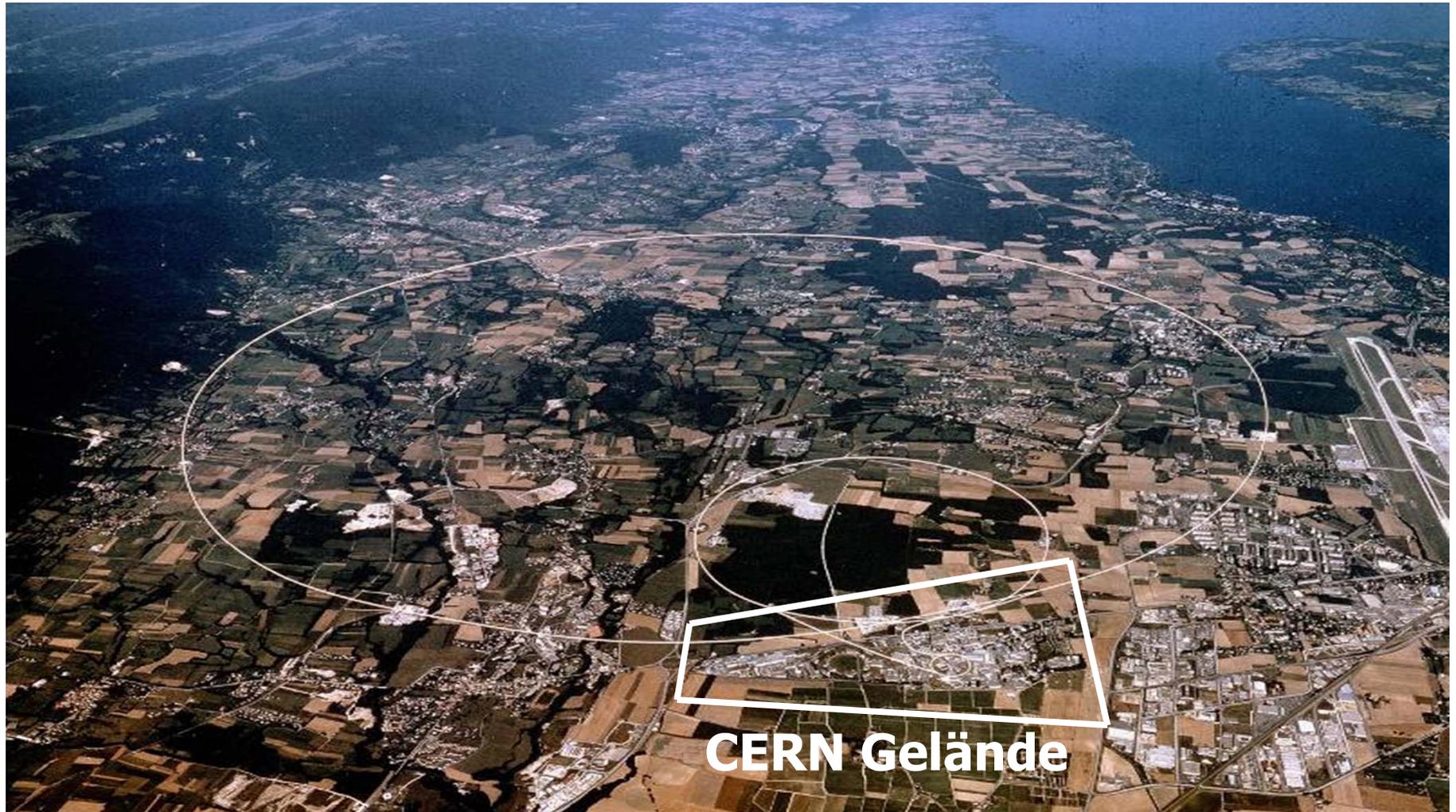
# Das CERN



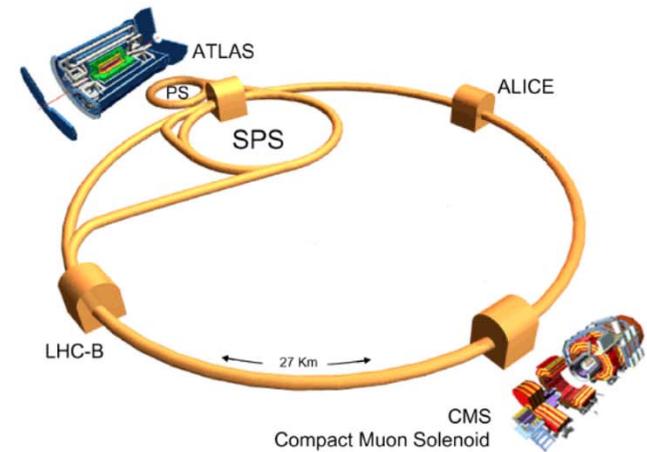
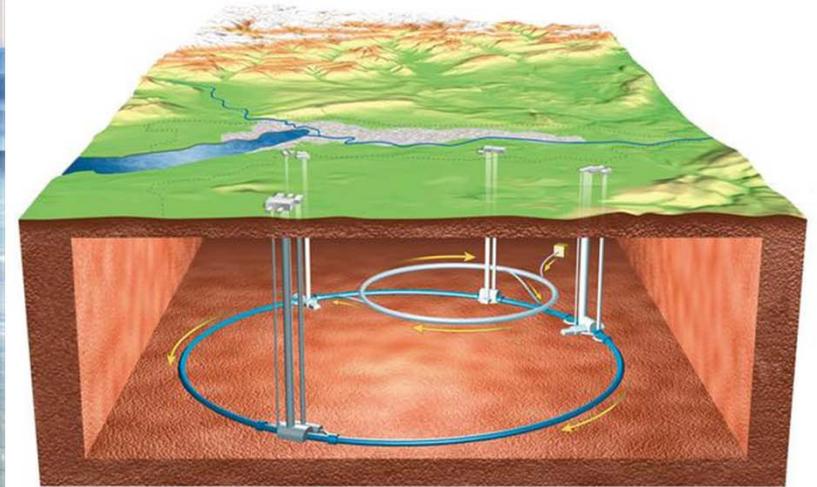
## Conseil Européen pour la Recherche Nucléair

<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



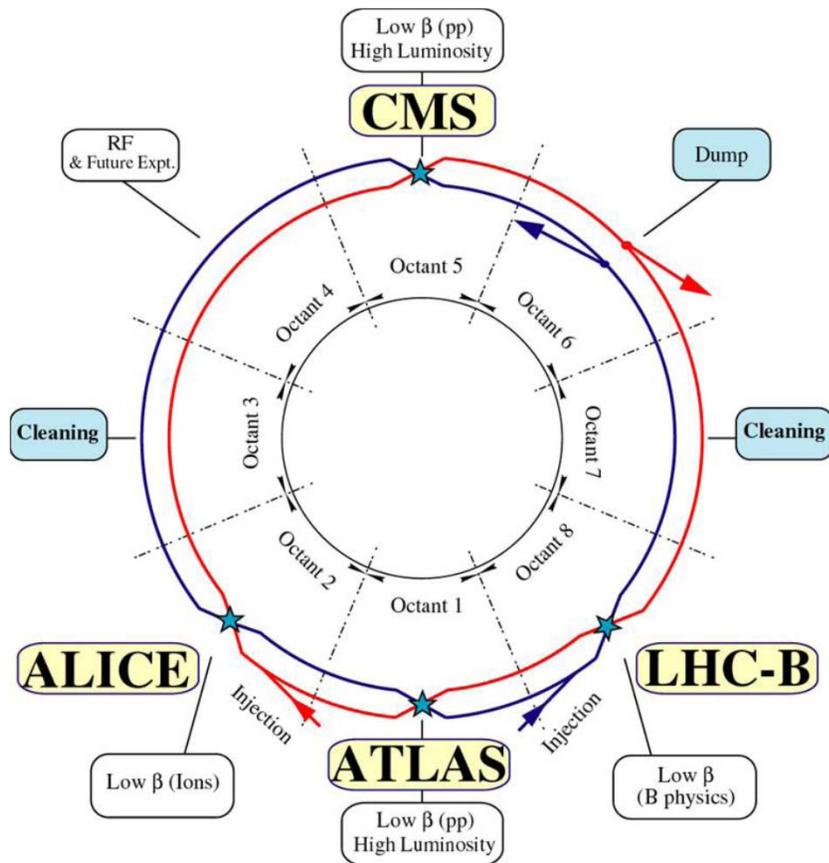
# Der Beschleuniger LHC



# Wozu der LHC?

- Steigerung der **Schwerpunktsenergie** (Energie, die zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung steht) auf **7000 GeV**
- 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**

# LHC: Technischer Überblick

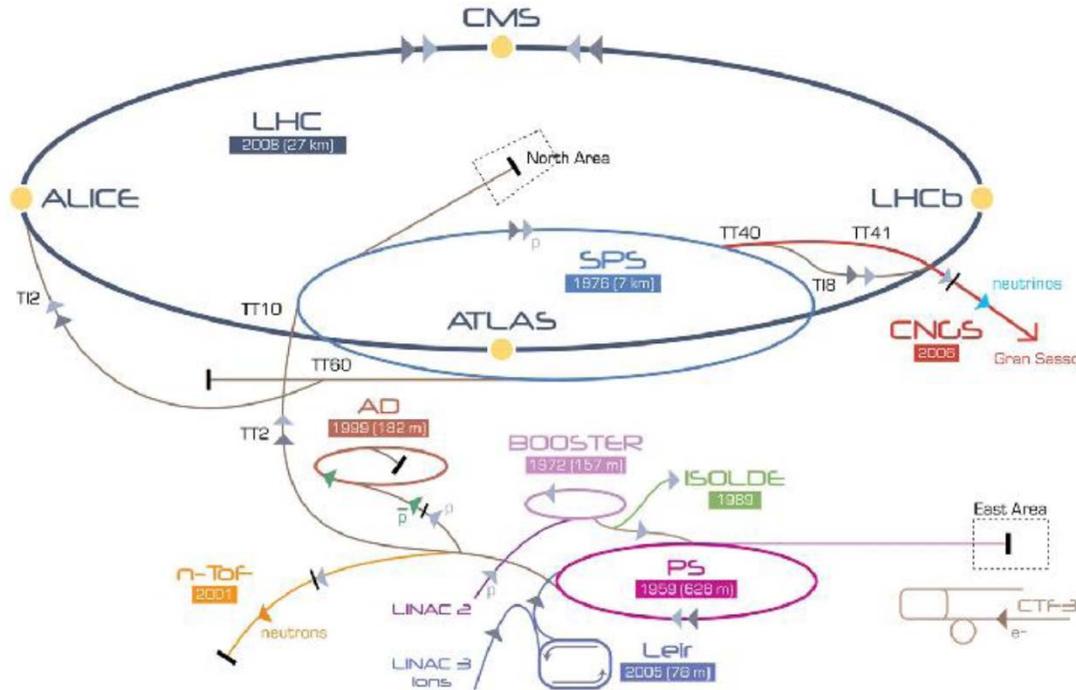


**Leistungsfähigster Beschleuniger der Welt in allen Parametern**

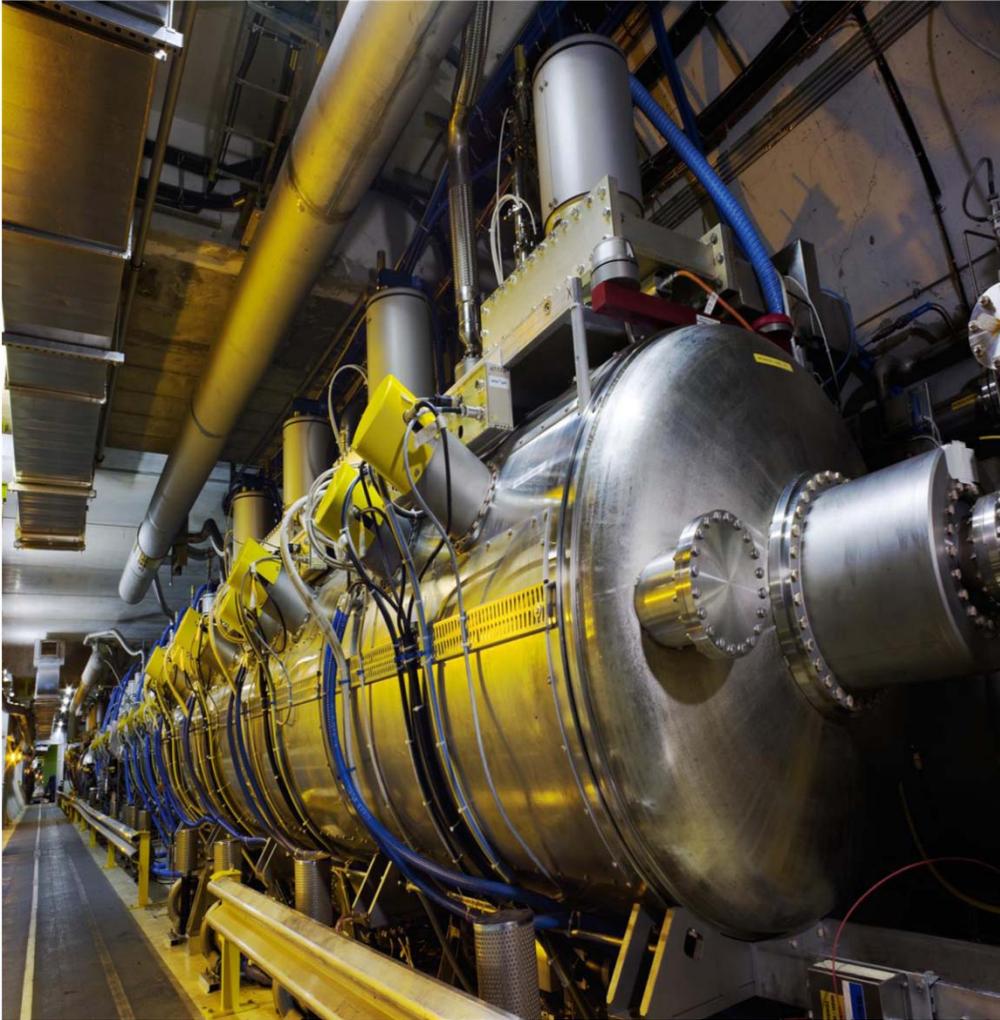
<b>Typ</b>	Proton-Proton/ Pb-Pb Collider
<b>Umfang</b>	26.7 km
<b>Energie</b>	7 TeV pro Strahl
<b>Luminosität</b>	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
<b>Strombedarf</b>	120 MWatt
<b>Planung</b>	1984 – 1994
<b>Bau</b>	1994 – 2008
<b>Laufzeit</b>	Ca. 20 Jahre
<b>Kosten</b>	3 Milliarden EURO
<b>Experimente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

# Beschleuniger-Systeme am CERN

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



# Der "eigentliche" LHC Beschleuniger



Hochfrequenz System  
zur Beschleunigung der  
Strahlen:

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

**8** Kavitäten im LHC

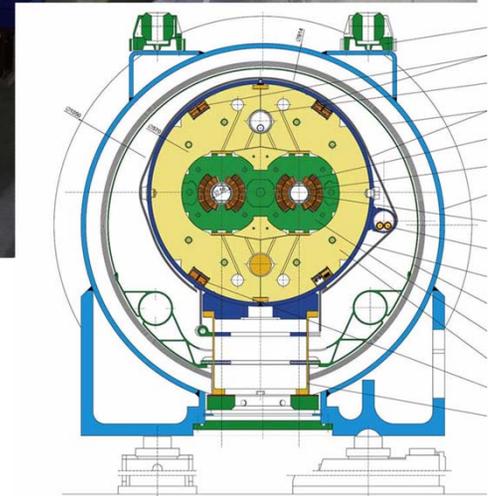
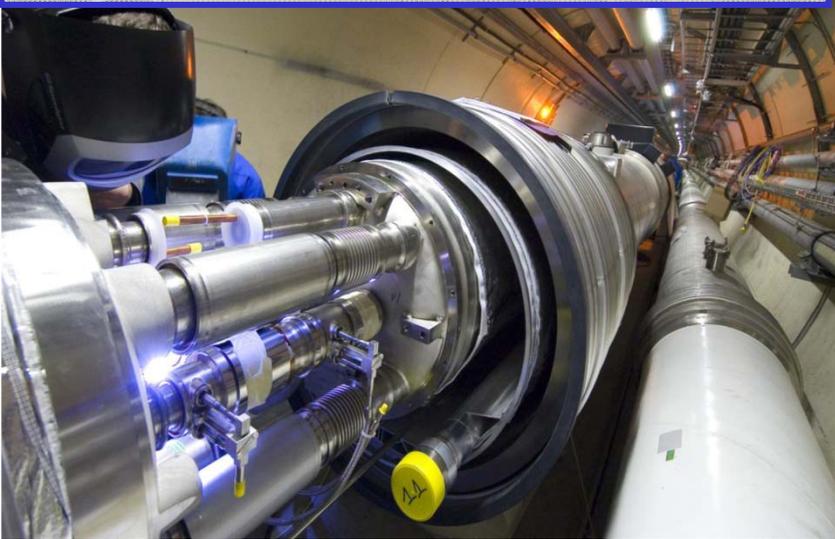
Energiezufuhr: **5 MeV/m**

Magnete dienen nur  
der Strahlführung

# 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

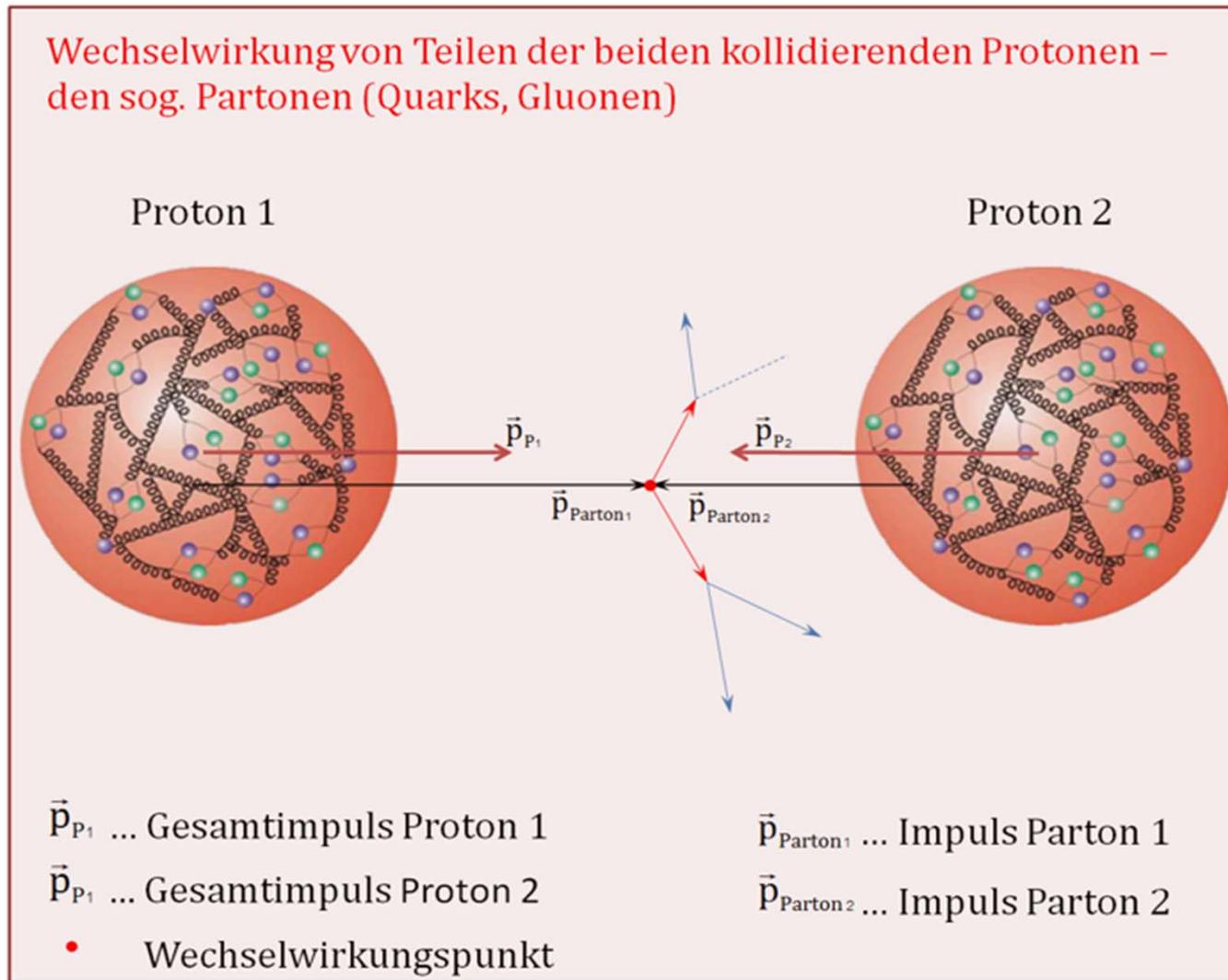


# Das CERN Control Center

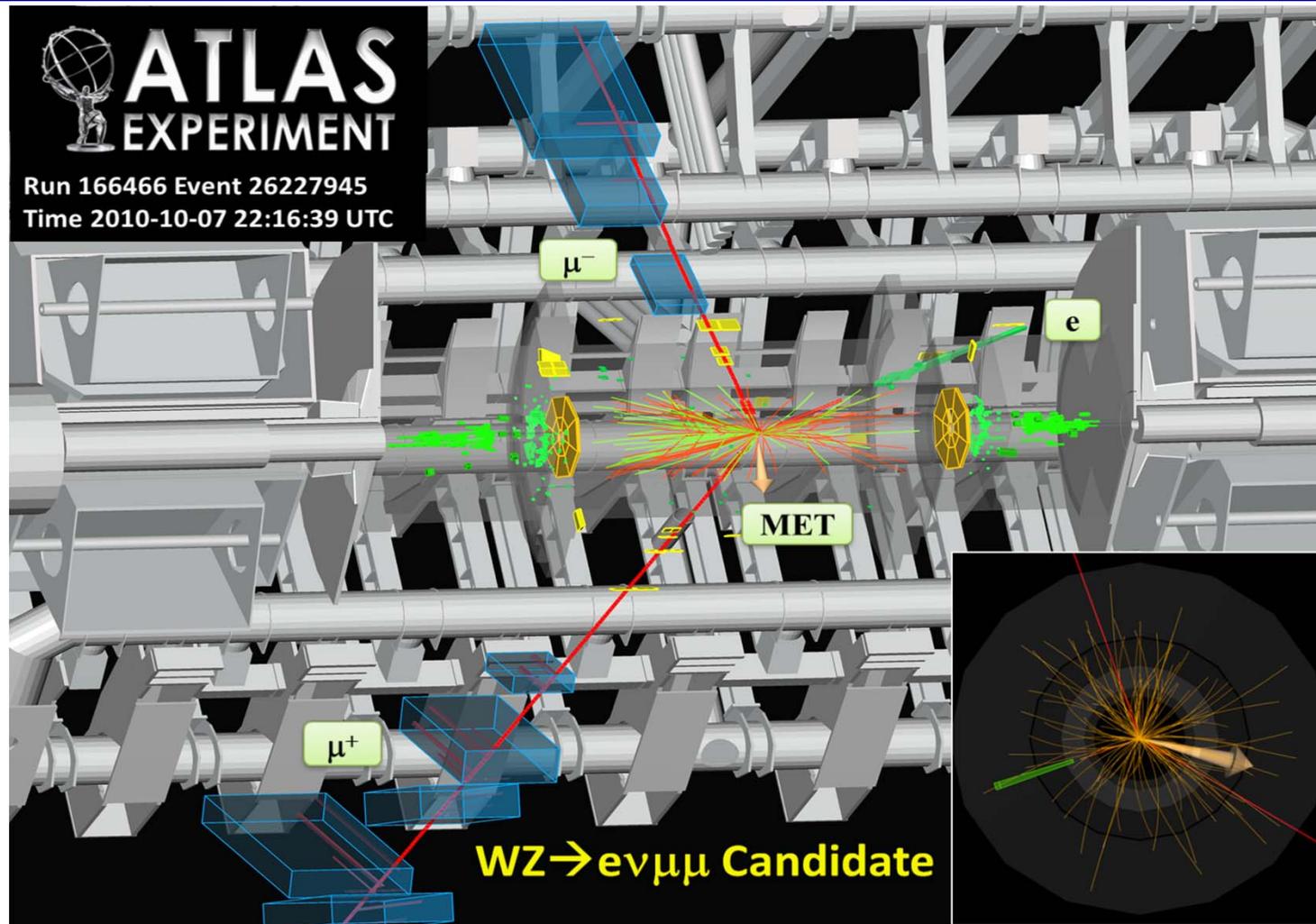


Kontrollraum aller Beschleunigeranlagen

# Neue Teilchen entstehen am LHC...



**... und sollen von IHNEN nachgewiesen und untersucht werden!**



# Offene Fragen

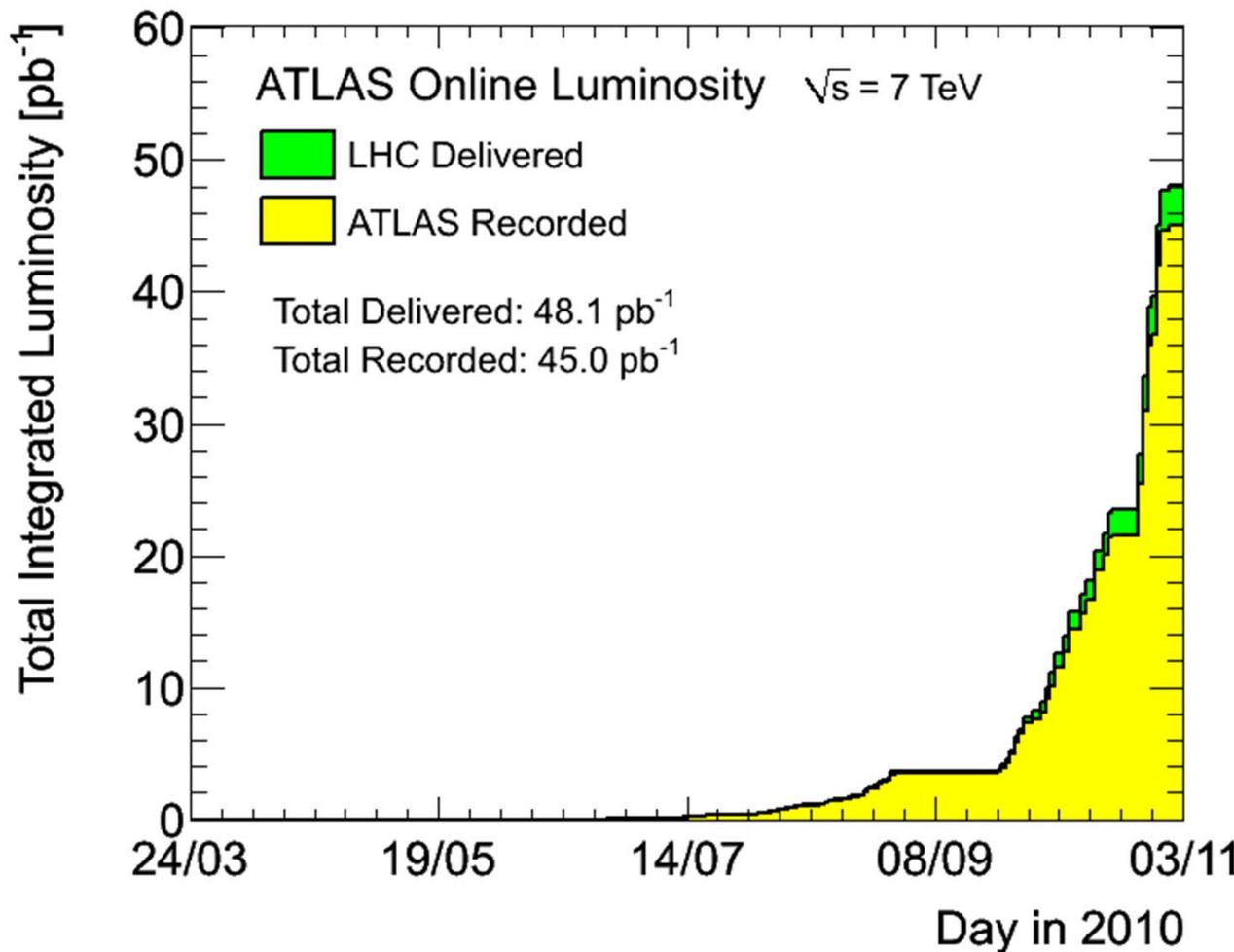
Das Standard-Modell der Teilchenphysik hat bis jetzt allen experimentellen Tests erfolgreich standgehalten, lässt aber viele Fragen offen:

- 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

# Datennahme bei LHC 2010

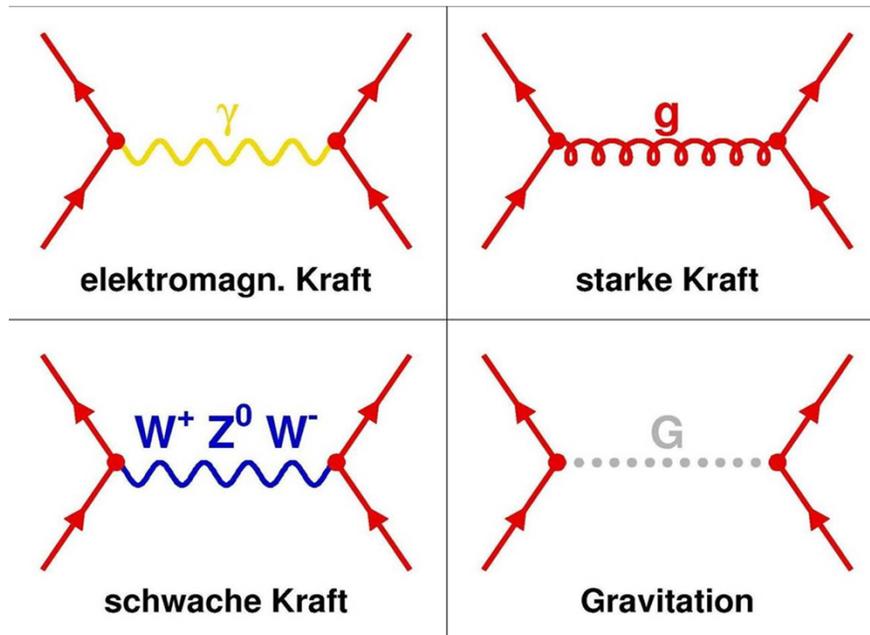


aufsummierter  
Datensatz  
als Funktion  
der Zeit

Funktionalität  
konnte eindrucks-  
voll getestet  
werden

Daten von hoher  
Qualität

# Ursprung der Masse: Higgs-Teilchen



## Standard-Modell:

- perfekte Symmetrie ohne Masse
- Kräfte durch Symmetrien beschreibbar

Forderung: **Austauschteilchen müssen masselos sein**

Erfüllt für **Photon** und **Gluon**,  
Aber nicht für **W- und Z-Bosonen**

**Konsequenz: → Symmetrie muss gebrochen sein ←**

- Symmetriebrechung erzeugt neues, massives Feld: **Higgs-Feld**
- Konsequenz der Symmetrie-Brechung: **W- und Z-Bosonen** werden massiv
- Erzeugung von Massen durch Kopplung an das Higgs-Feld
- Teil des Standard-Modelles, noch nicht entdeckt

# ATLAS: weltweite Kollaboration

(Status 2010)

37 Länder

173 Institute

~ 3000 Wissenschaftler



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, [HU Berlin](#), Bern, 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

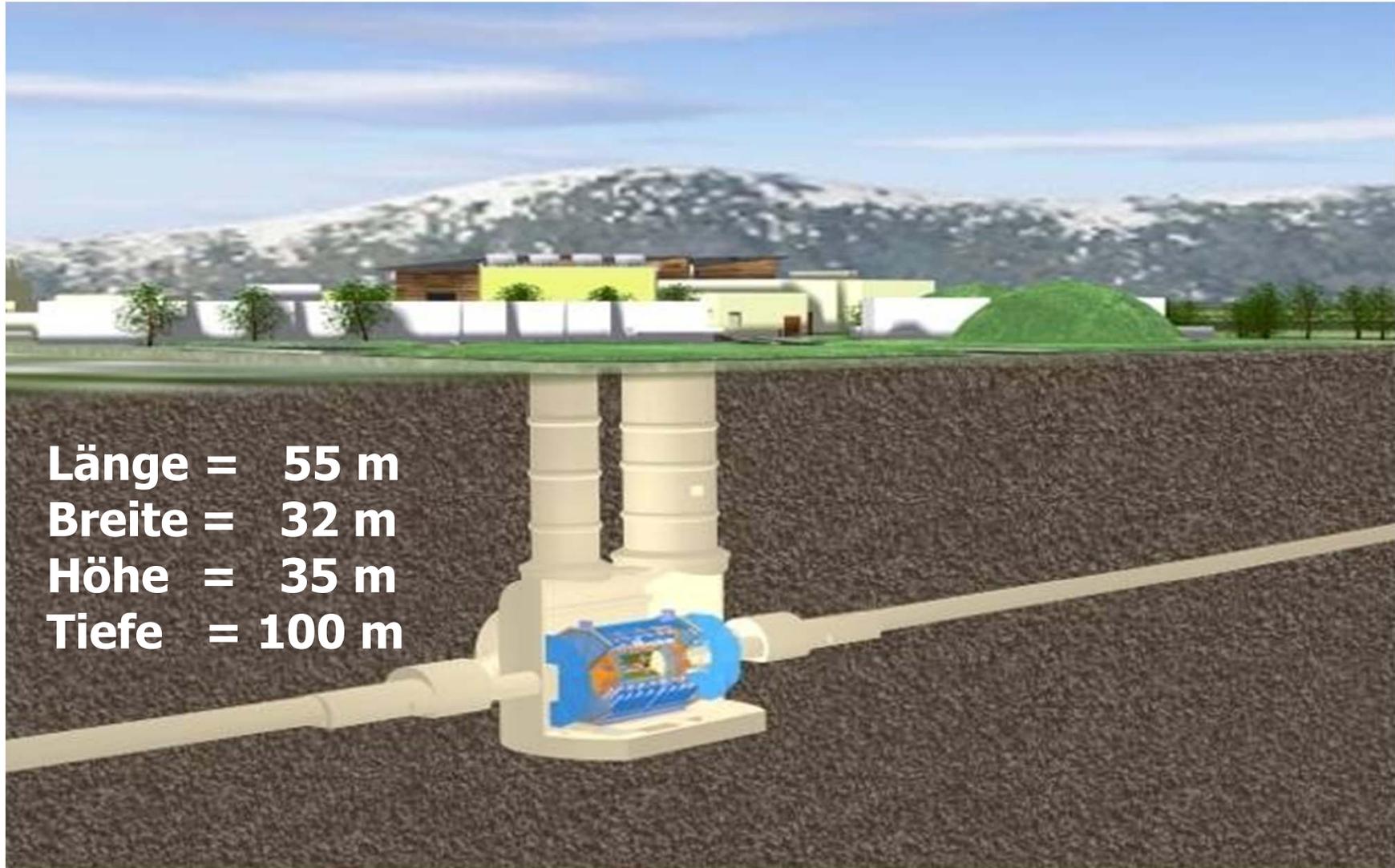
# Ein Teil der ATLAS-Kollaboration



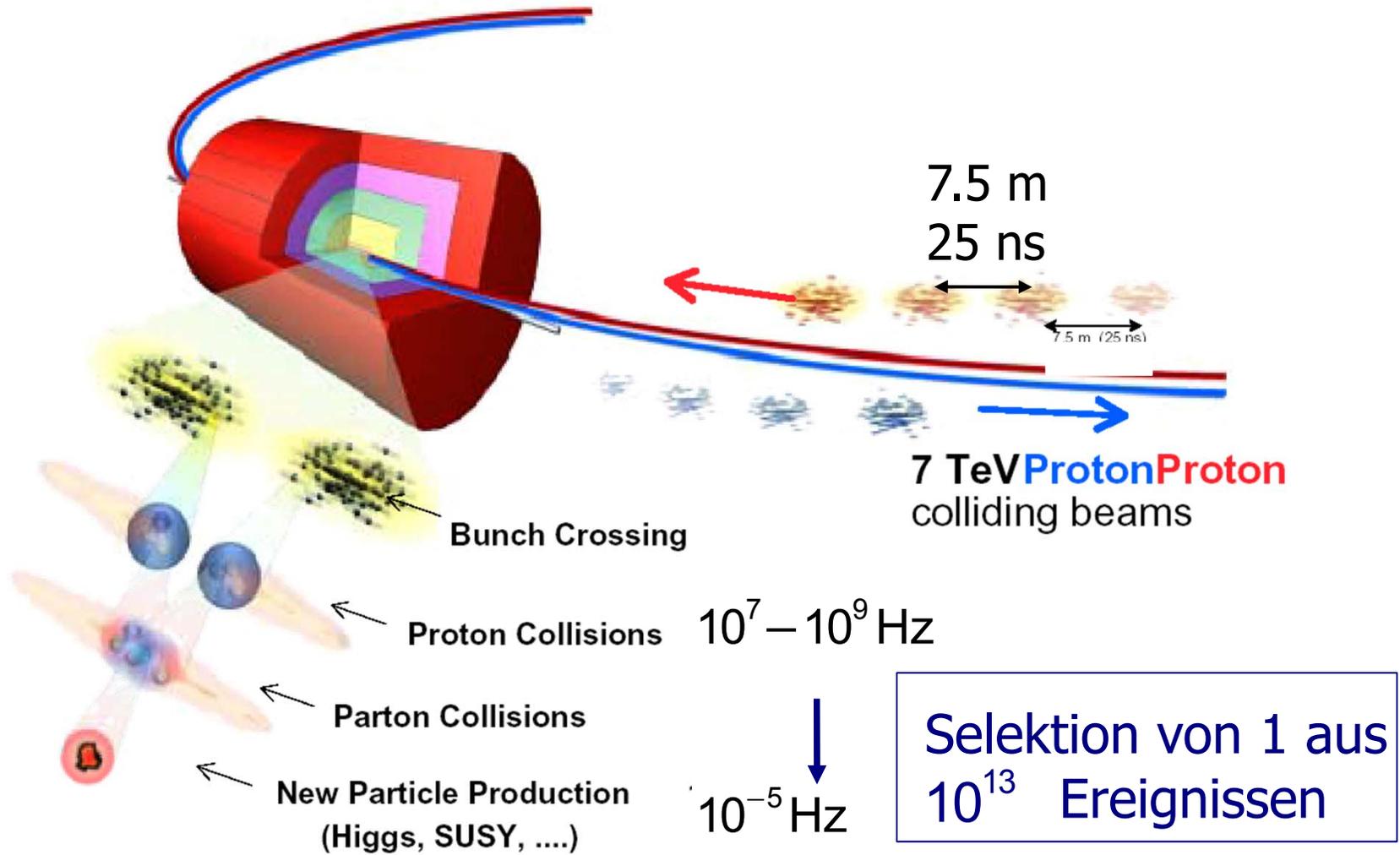
# Das ATLAS-Areal überirdisch



# Die unterirdische Kaverne von ATLAS



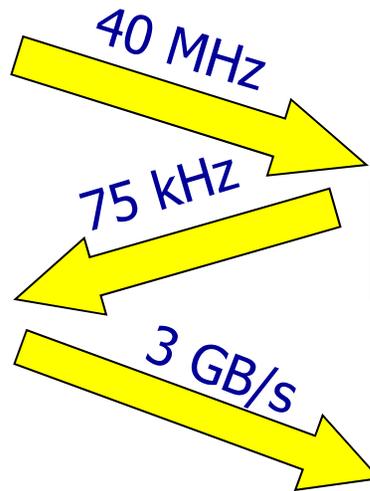
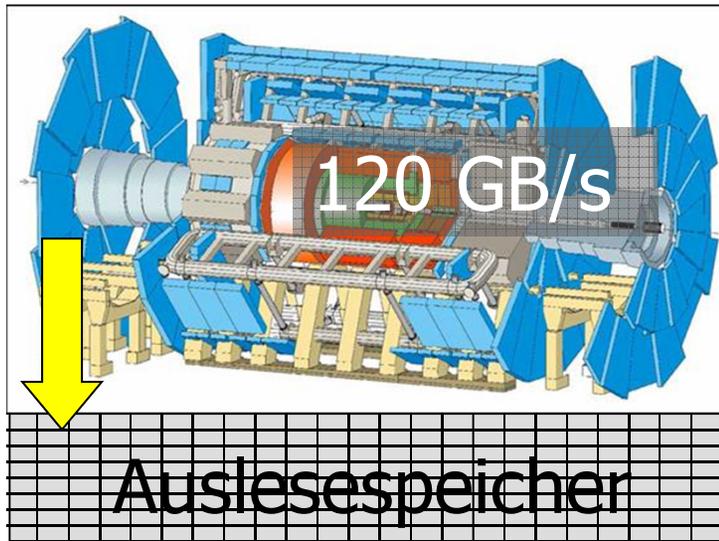
# Teilchenkollisionen bei LHC



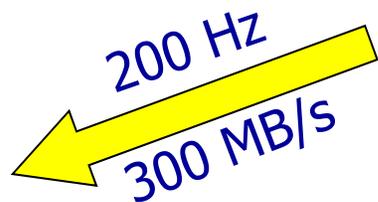
# Der ATLAS Kontrollraum



# Datennahme und Speicherung



Hardware Trigger



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



# Computing



140 Institute  
35 Länder  
9.000 Benutzer

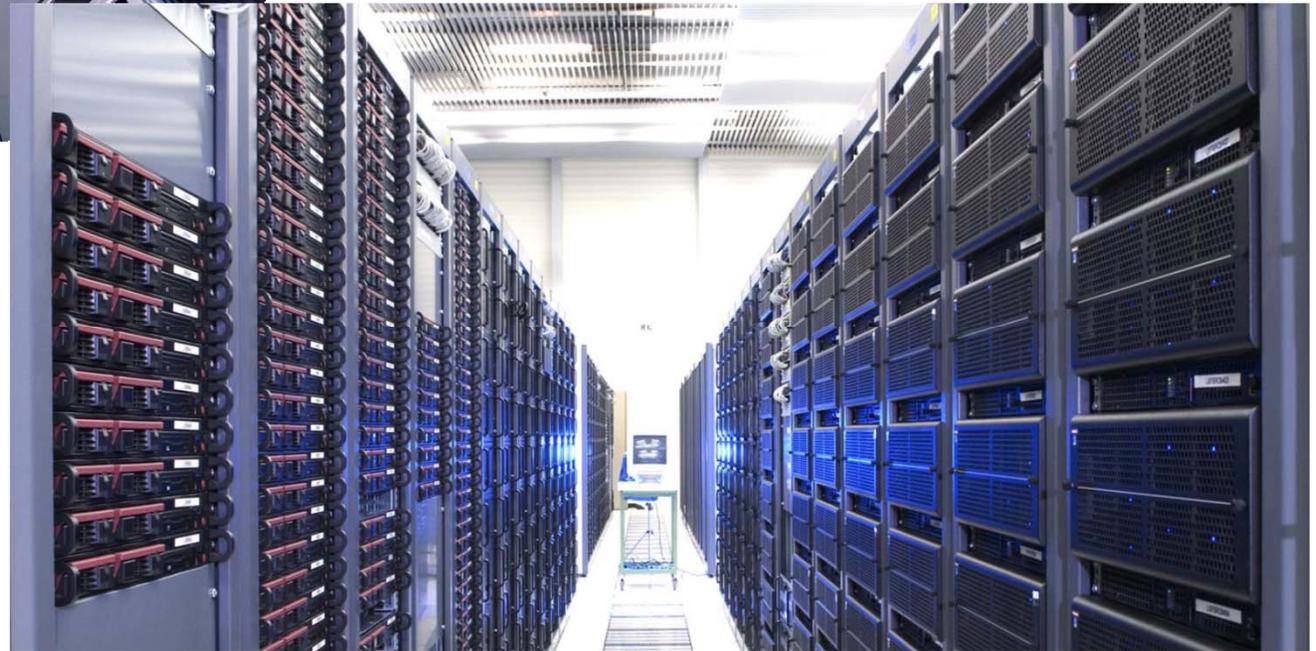
Dynamisches  
Datenmanagement und  
Jobverarbeitung in einem  
weltweitem Computernetzwerk



# Das CERN Rechenzentrum



Weltweit eines der  
größten Rechenzentren



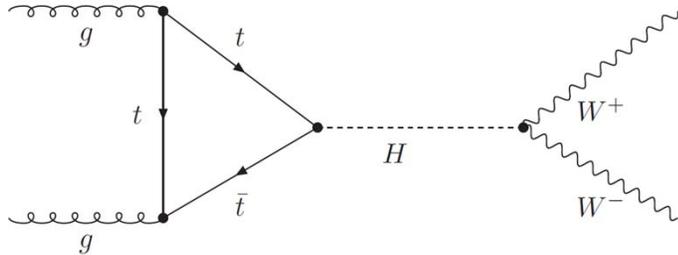
# GRID-Computing

- **LHC wird ca. 15 Pb/ Jahr an Daten produzieren (~ 3 Mio DVDs)**
- Nur handhabbar mit weltweit verteilter Speicherung und Analyse der Daten
  - LHC Computing GRID
  - z.Z. 100.000 Prozessoren in 140 Zentren in 33 Ländern
  - Ca. 100 Mio Rechenjobs pro Jahr

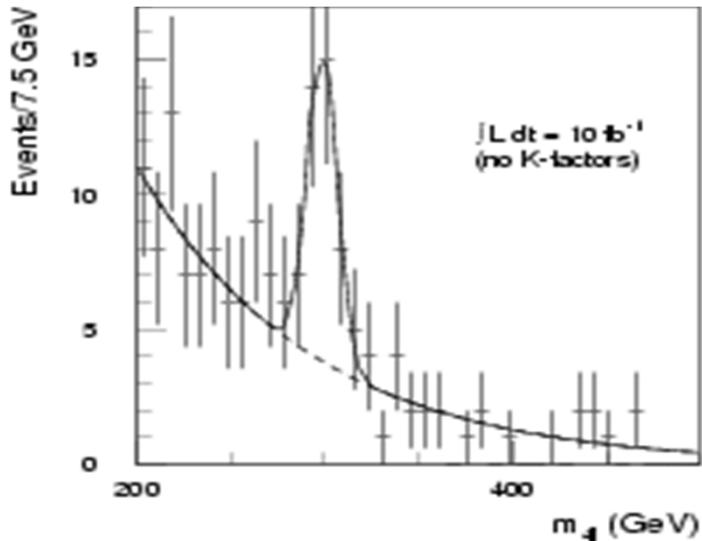


# Ausblick: Vermessung des Higgs

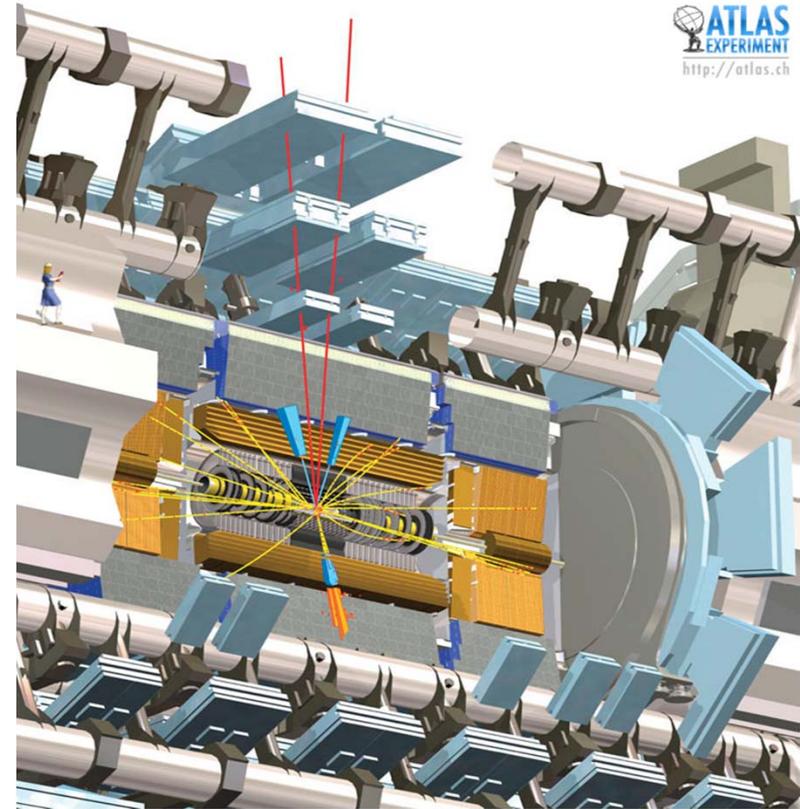
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Zu erwartendes Higgs-Signal nach 1 Jahr Messen



Optimaler Kanal zur Entdeckung des Higgs-Teilchens bei LHC



***Simulation*** eines Higgs Zerfalles Ereignisses