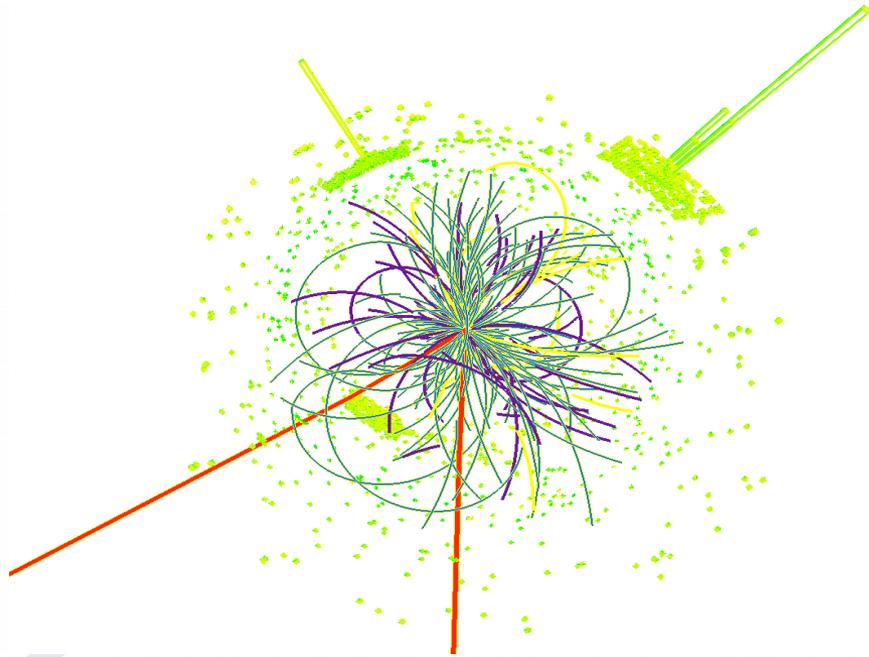


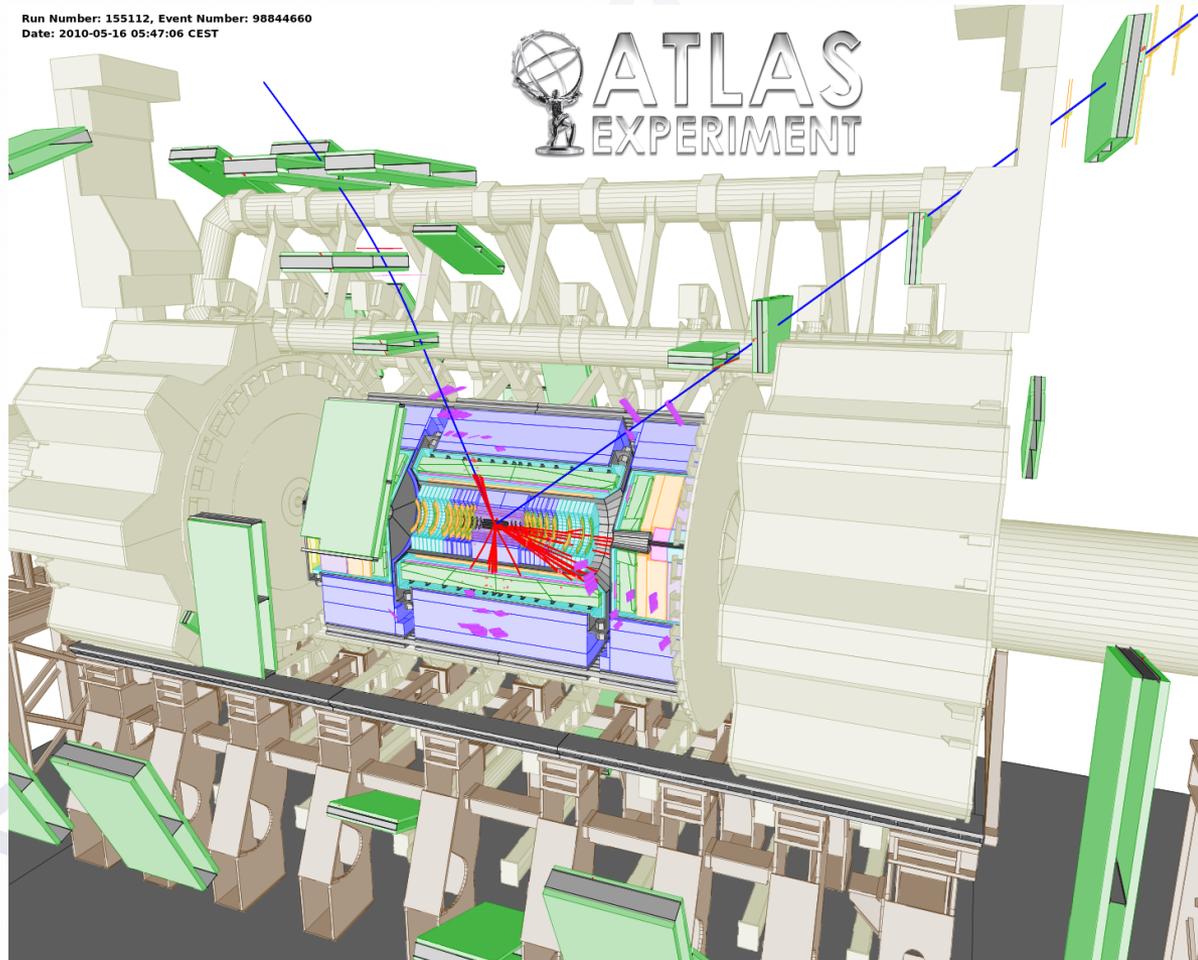
# Das Unsichtbare sichtbar machen: Detektoren



CERN MasterClass 2017  
Dr. Martin zur Nedden  
Humboldt-Universität zu Berlin  
und CERN / ATLAS

# Der Versuch

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



# Die Augen der Teilchenphysik

Teilchen sind zu klein, als dass wir sie sehen könnten

- Sie sind auch kleiner als Lichtwellenlängen!

Nur ein indirekter Nachweis ist möglich

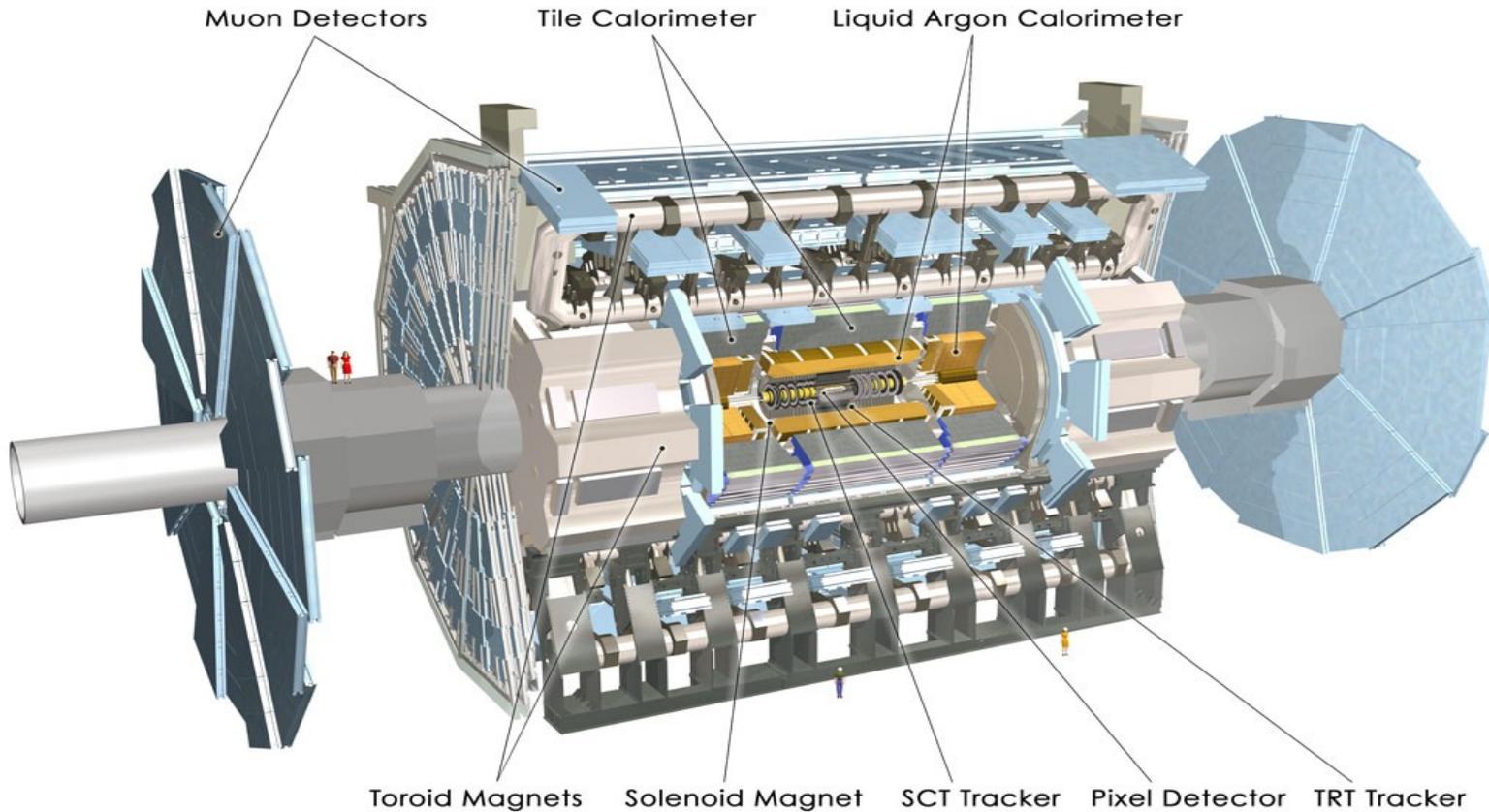
- Wechselwirkung von Teilchen mit Materie notwendig, um sie sichtbar zu machen

Moderne Teilchendetektoren

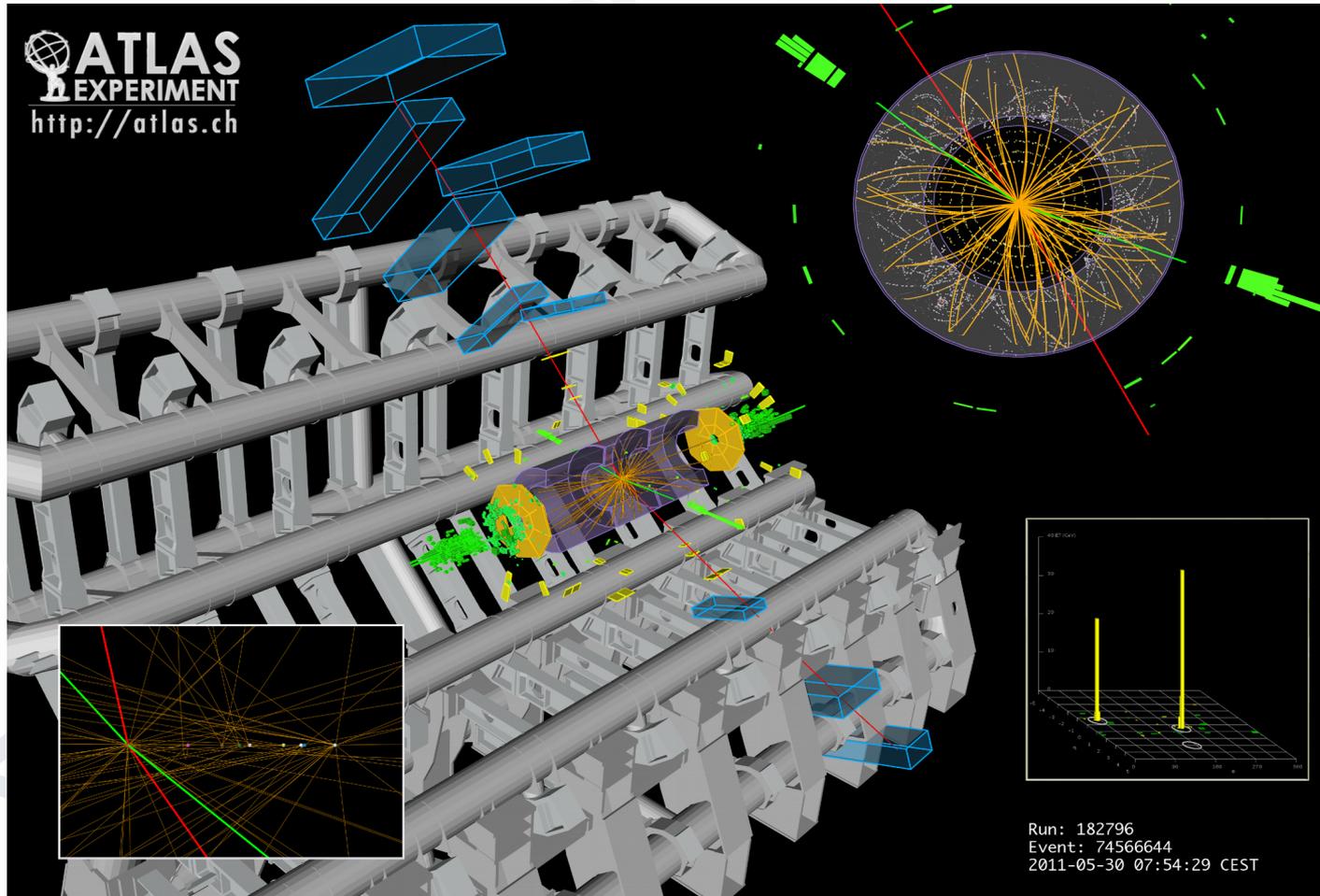
- Komplex aufgebaute Apparaturen
- Bestehen aus vielen spezialisierten Unterdetektoren
  - Messung der unterschiedlichen Komponenten und Aspekte einer Wechselwirkung
- Viele verschiedene gleichzeitige Messungen ( $\sim 10^8$ )
  - Alle Messungen müssen am Ende zusammengesetzt werden
- Gigantische Datenflut
  - Online Datenreduzierung überlebenswichtig
  - 99,995 % der Ereignisse werden online verworfen



# Der ATLAS-Detektor



# Wie deutet man solch ein Ereignisbild?



# Zur Erinnerung: Die Grundkräfte

## Elektromagnetische Kraft

- wirkt zwischen allen geladenen Teilchen
- verantwortlich z.B. für den Zusammenhalt von Atomen
- Ionisation, Szintillationslicht, elektromagnetischer Schauer

## Starke Kraft

- wirkt zwischen den Quarks
- verantwortlich für Aufbau von Elementarteilchen und Zusammenhalt der Kerne
- Hadronische Schauer

## Schwache Kraft

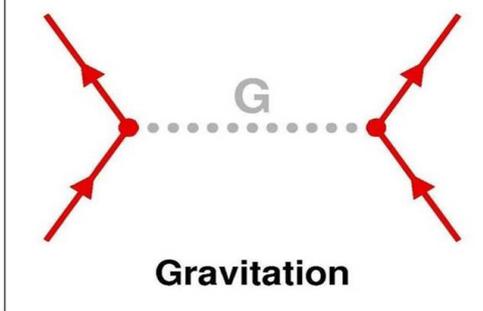
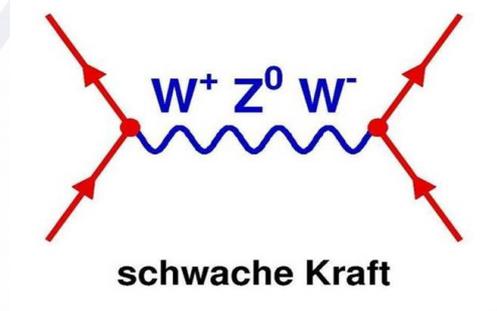
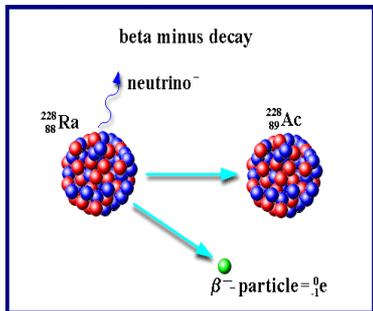
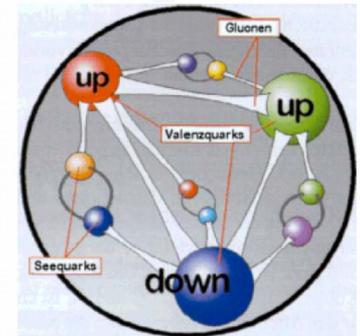
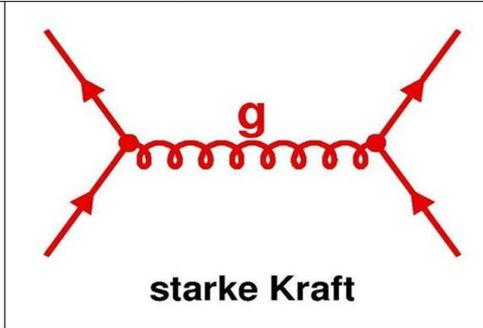
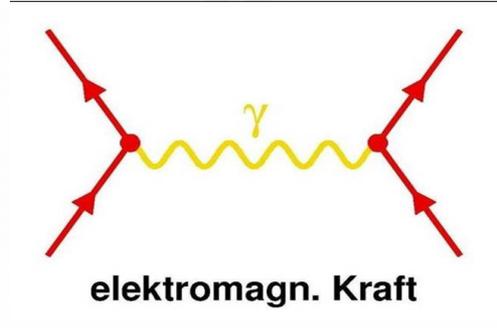
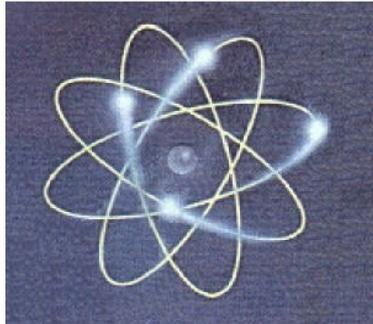
- verantwortlich für Umwandlungsprozesse von Elementarteilchen (z.B. Teilchenzerfälle)
- Neutrino-Nachweis

## Gravitationskraft

- $10^{36}$  mal schwächer als die starke Kraft
- spielt in der Teilchenphysik keine Rolle



# Kraftvermittler: Austauschteilchen



Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder  
Wesentlich für das Verständnis der WW Materie

# 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



# Experimente mit Teilchenstrahlen

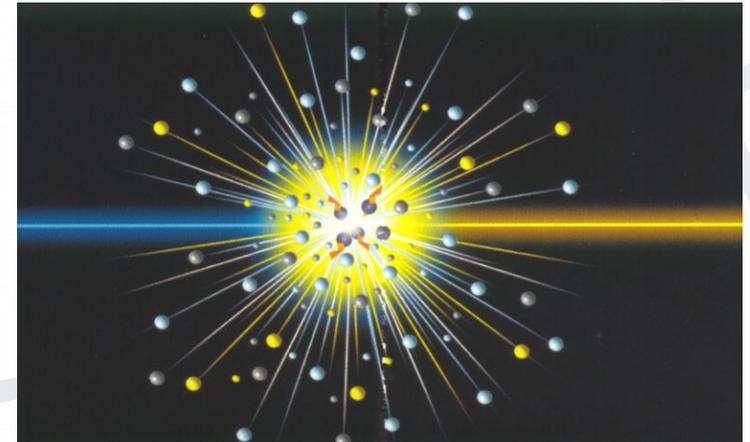
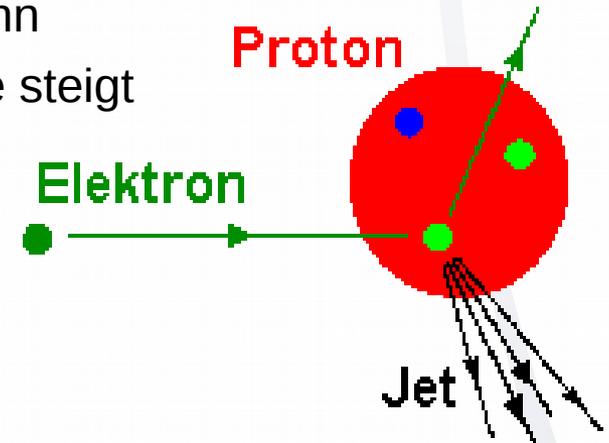
Teilchenstrahlen höchster Energie sind notwendig, denn mit steigender Energie  $E$  (bzw. Impuls  $p$ ) der Projektile steigt

die Fähigkeit,  
kleine Strukturen  $\Delta x$  zu erkennen  
 $\Delta x \Delta p = \hbar$  (Heisenberg)

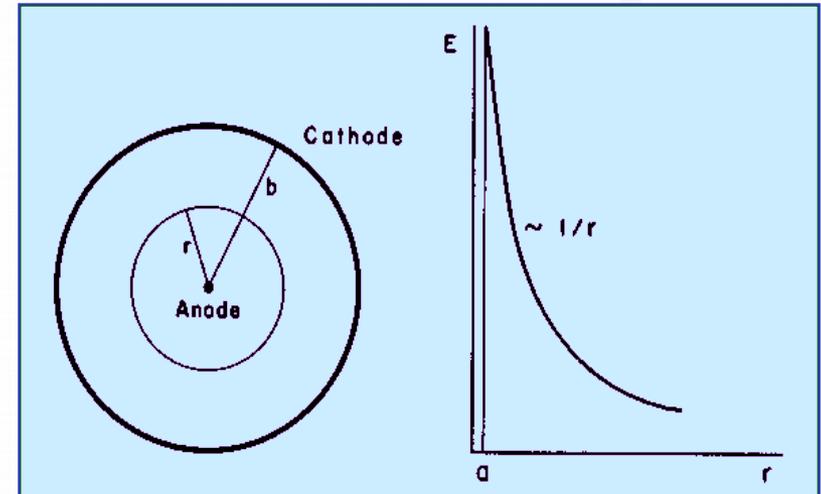
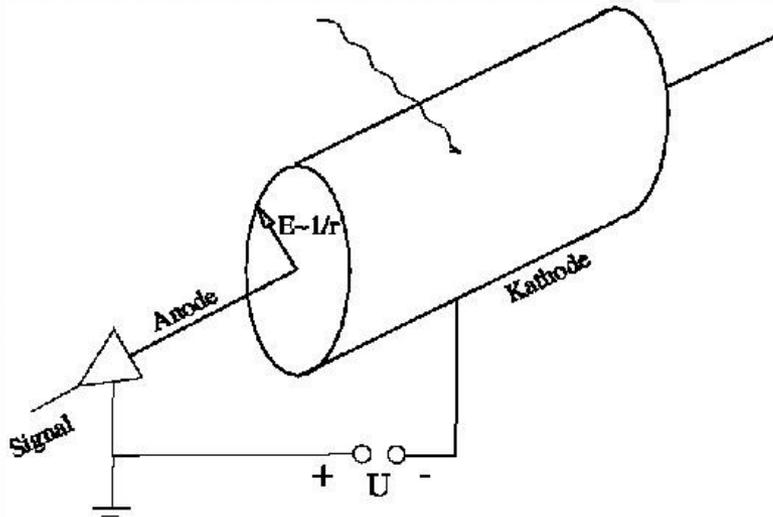
die Fähigkeit,  
neue schwere Teilchen zu erzeugen  
 $E = mc^2$  (Einstein)

## Streuexperimente

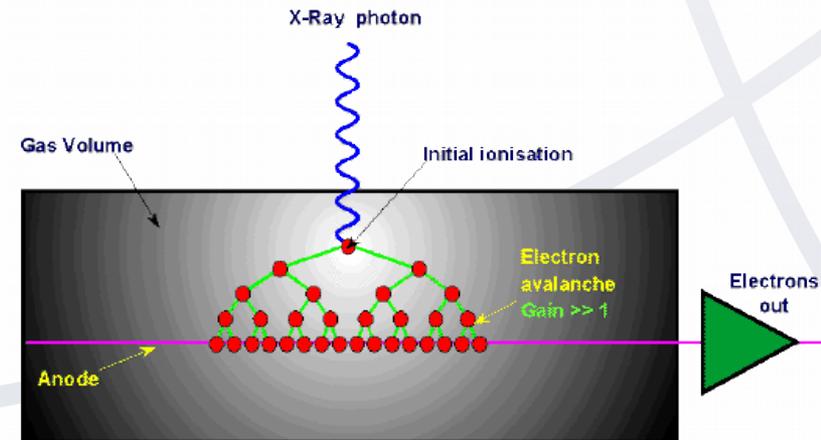
- Kollision von Teilchenstrahlen mit Materie
- Kollision von zwei Teilchenstrahlen



# Ortsmessung: z.B. Geiger-Müller-Zähler

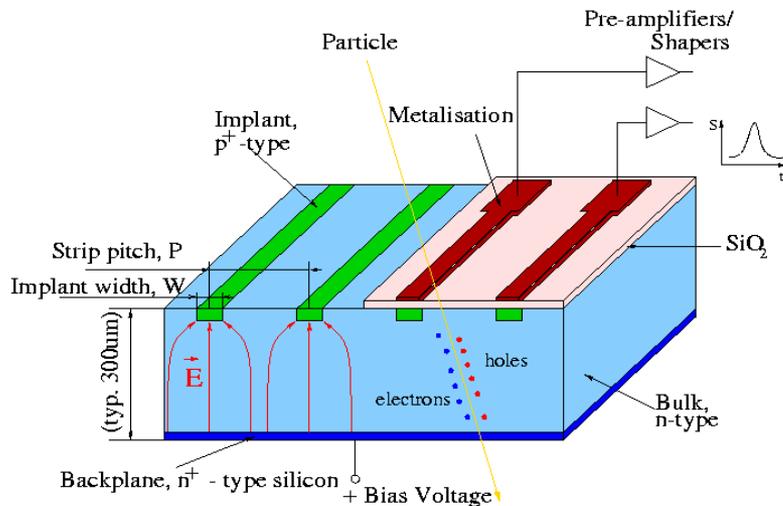


- Elektronischer Detektor
- Teilchen ionisieren das Gas im Detektor
- Ionisationsladungen driften zum Anodendraht
  - elektrisches Signal durch Gasverstärkung
- Elektronische Auslese



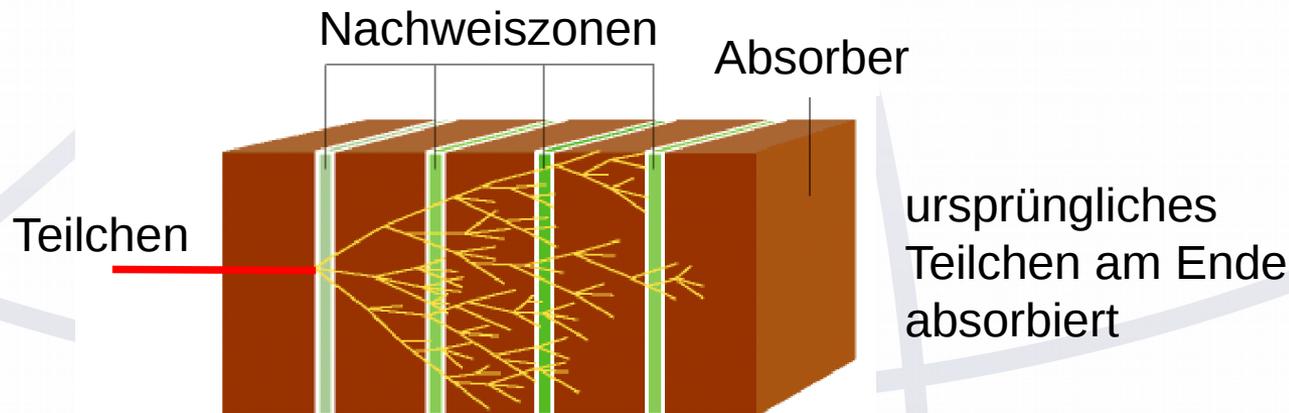
# Ortsbestimmung: Silizium

- Funktionsprinzip einer in Sperrrichtung geschaltete Diode
- Ionisierende Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare in Halbleiter
  - Signalerzeugung in den anliegenden Elektroden
- Auflösung definiert über die Pixel/Streifenbreite ( $\sim 20 \mu\text{m}$ )
- In der Nähe des Wechselwirkungspunktes angebracht
- Standard-Technologie bei modernen Experimenten der Teilchenphysik



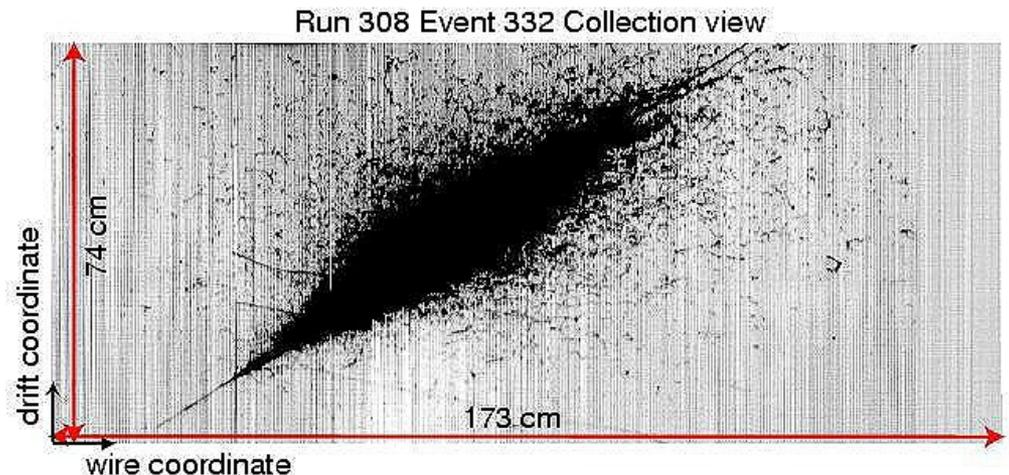
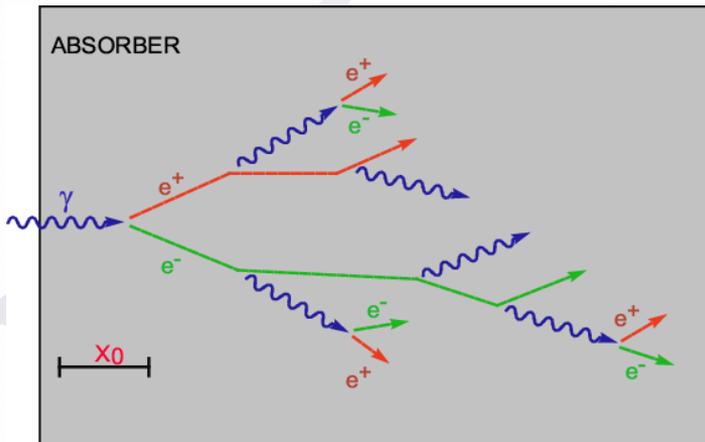
# Energiemessung: Prinzip

- Hochenergetische Teilchen wechselwirken mit den Kernen der Materie, die sie durchdringen
  - Ausbildung eines Schauers
- Anzahl der entstehenden Teilchen im Schauer ist proportional zur Energie
- Art des Schauers abhängig von den Eigenschaften des Teilchens
- Messung von Szintillationslicht in den Nachweiszonen zwischen dem Absorber



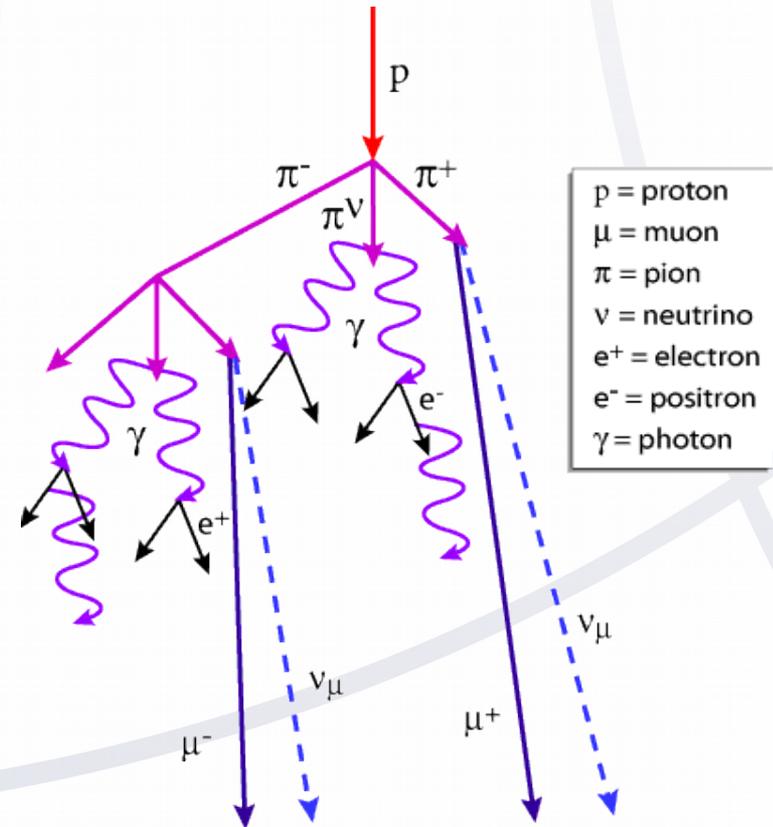
# Elektromagnetische Kalorimeter

- Prinzip: Bremsstrahlung (Elektron) und Paarbildung (Photon)
- Proportional zu  $Z^2$  des Absorbers:
  - Geeignete Materialien: Blei, Uran, Wismuth...
- Elektronen und Photonen erzeugen die selben Schauer
  - Die Schauer sind ununterscheidbar ohne weitere Information
- Kurze, kompakte Schauer

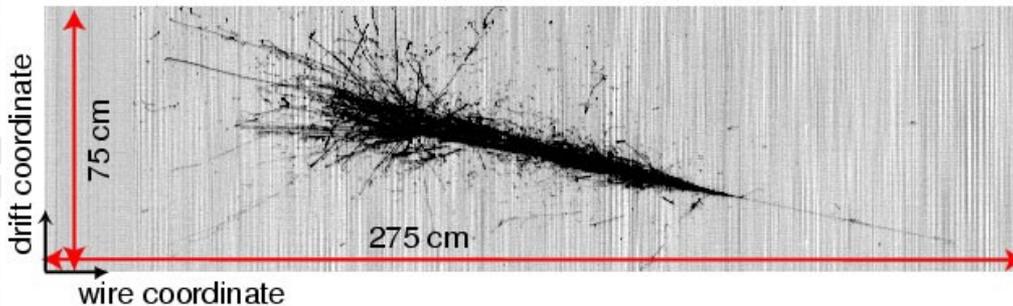


# Hadronische Kalorimeter

- Hadronen (z.B. Protonen, Pionen, Neutronen) verursachen in Materie Schauer aus weiteren Hadronen
  - Hadronische Wechselwirkung mit dem Kern
- Proportional zu  $A^{2/3}$  des Materials
- Ein Teil zerfällt in Photonen
  - Begleitender elektromagnetischer Schauer
- Kleines Z bei großem A: Fe
- tiefe, ausgedehnte Schauer

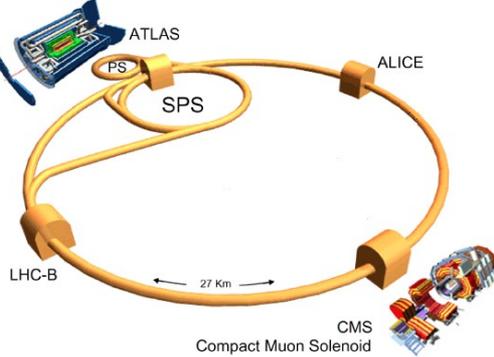
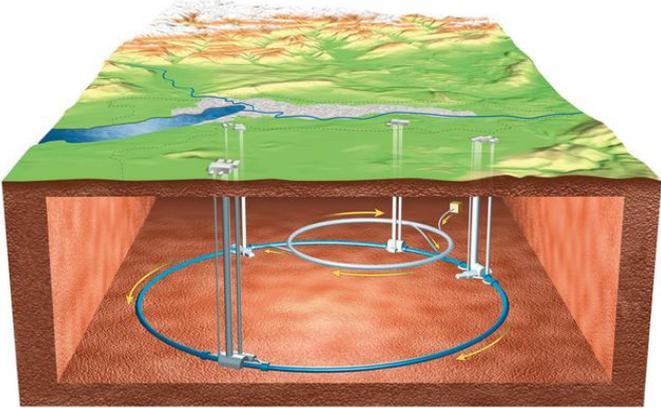


Run 308 Event 7 Collection view

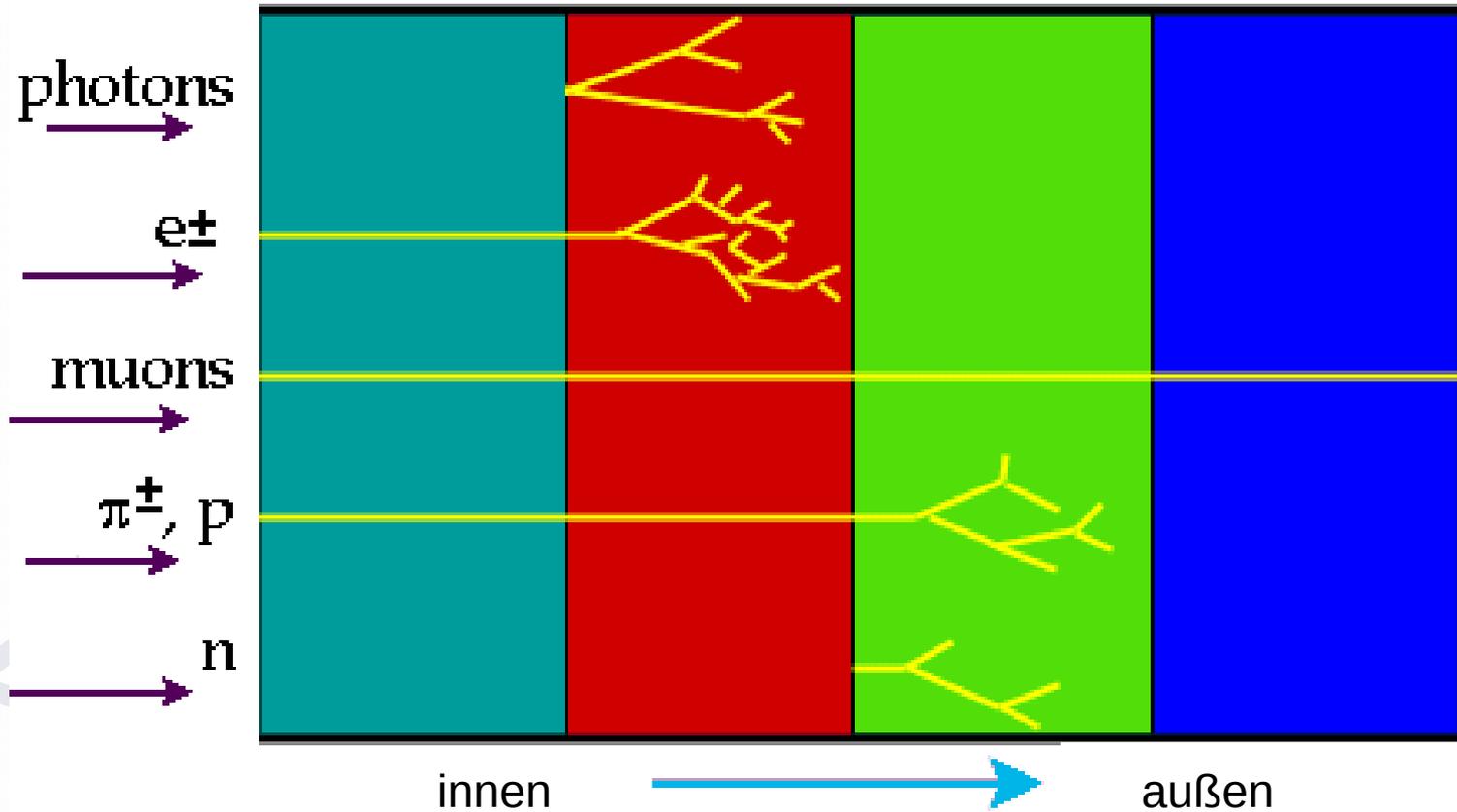


# Der Beschleuniger LHC

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

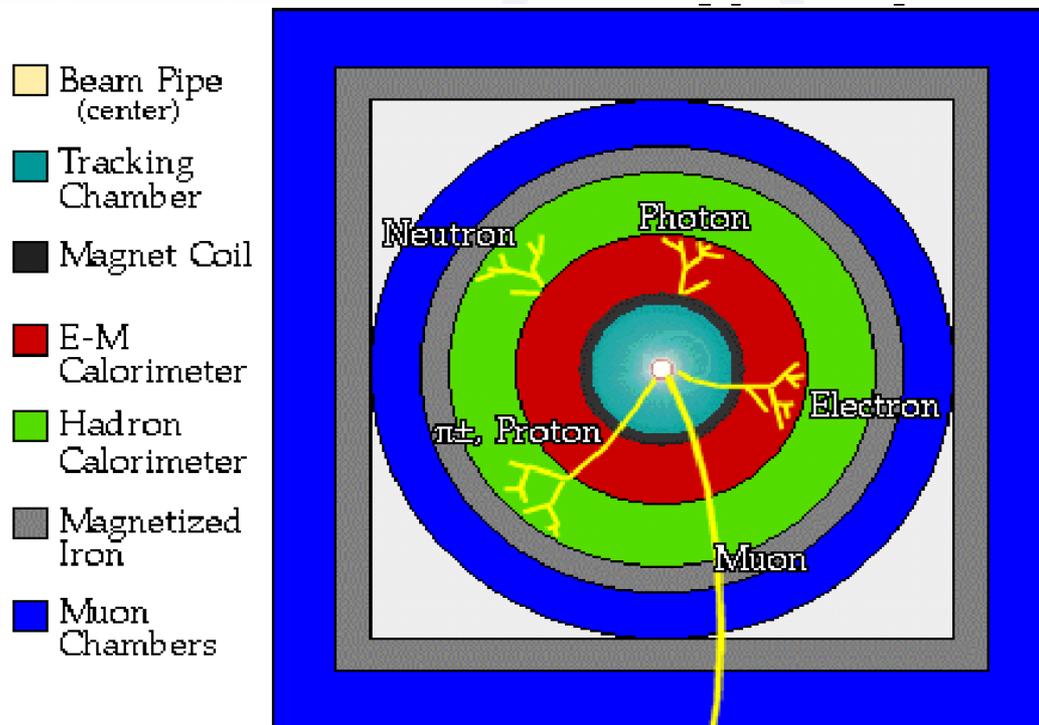


# Teilchennachweis im Detektor



# Schematischer Detektoraufbau

Zwiebelschalenartiger Aufbau aus verschiedenen Komponenten



# Das ATLAS-Experiment



# Gruppenbild der ATLAS Kollaboration



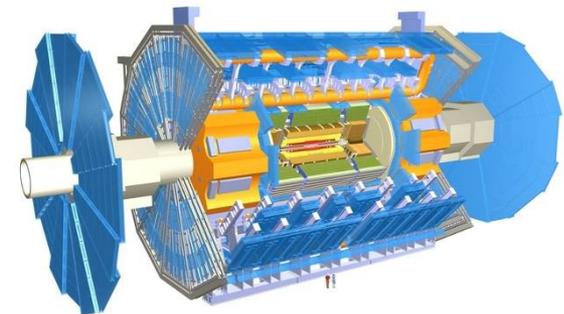
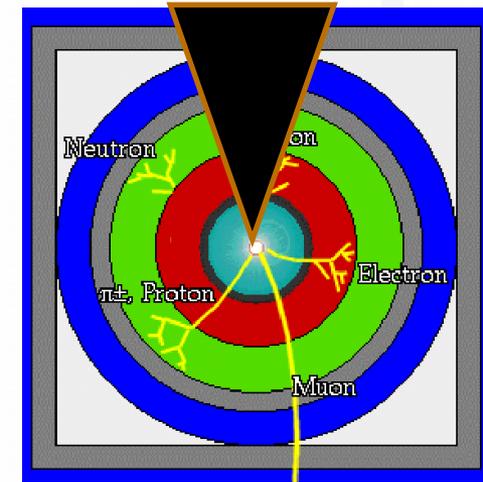
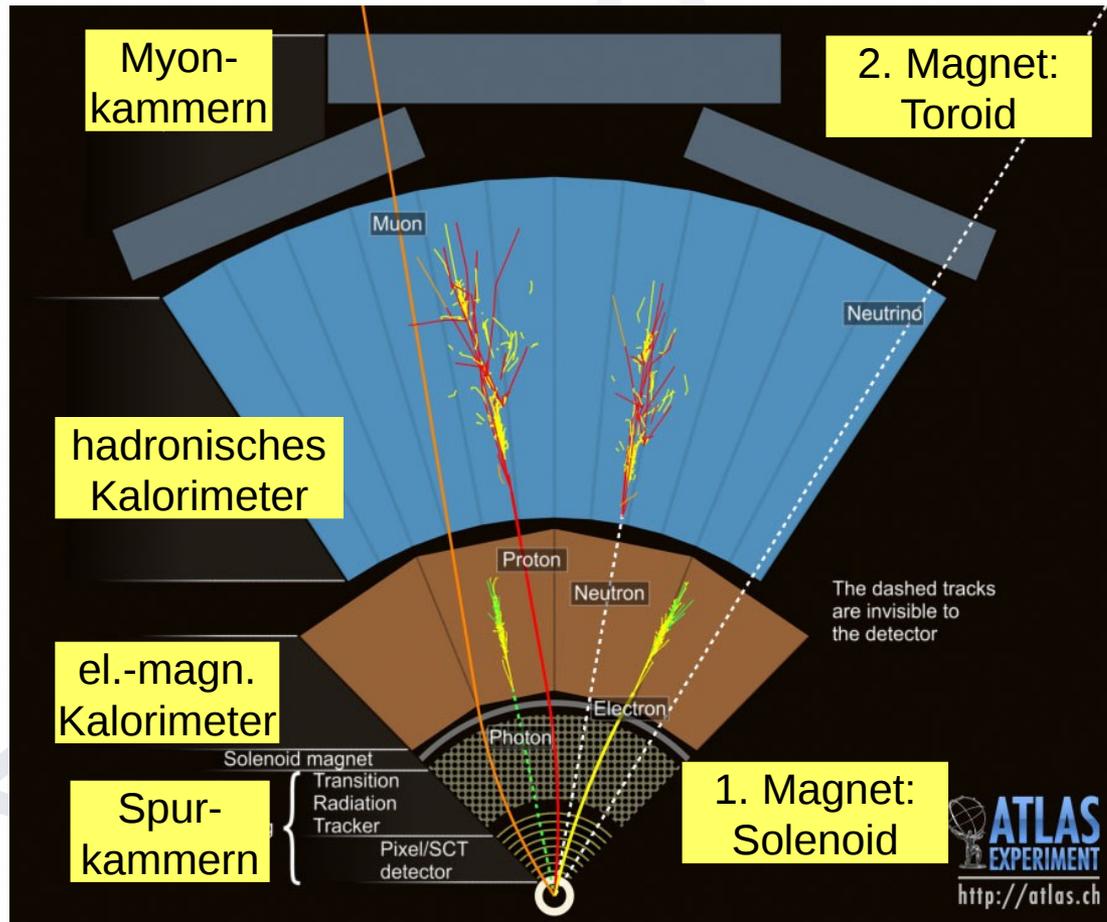
# Das ATLAS-Areal oberirdisch



# Erste Kollisionen von Run 2



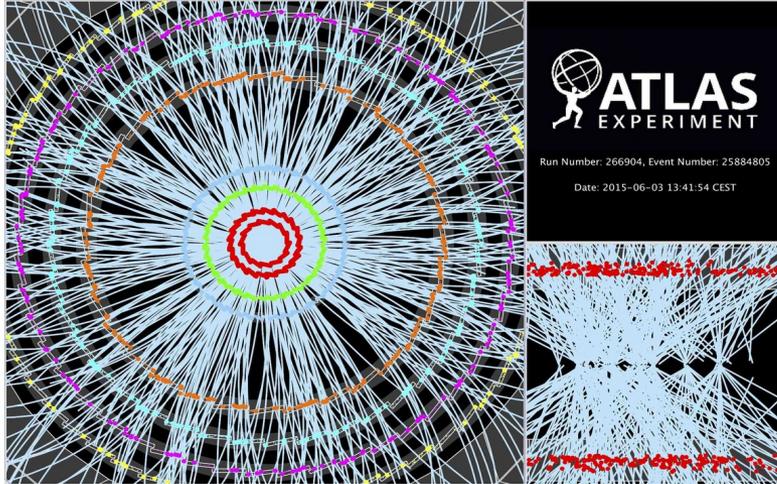
# Teilchen im ATLAS-Detektor



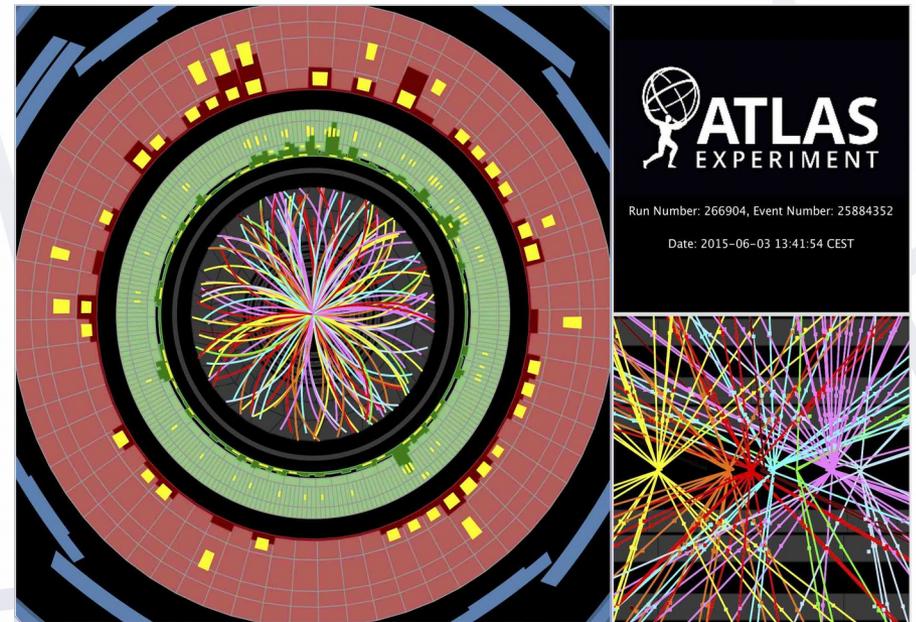
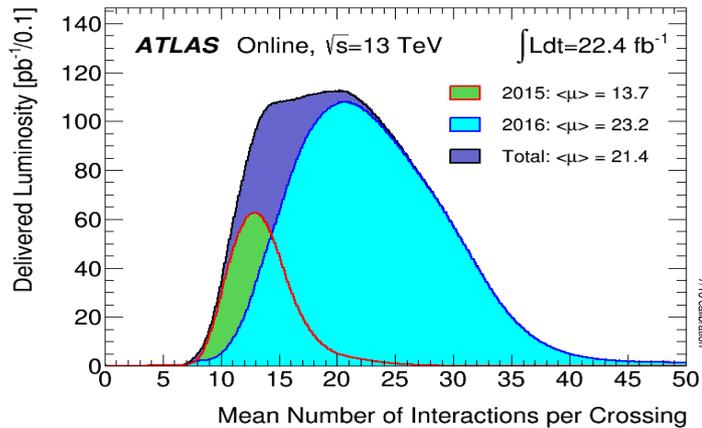
# Routine im ATLAS-Kontrollraum



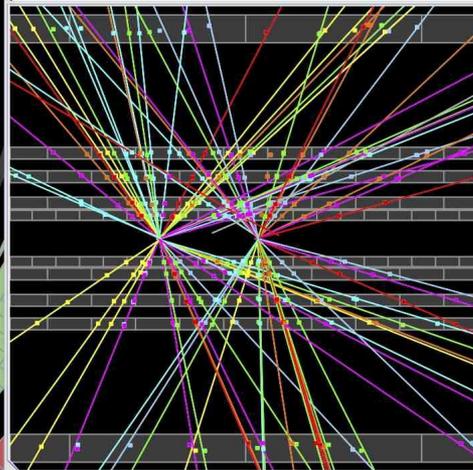
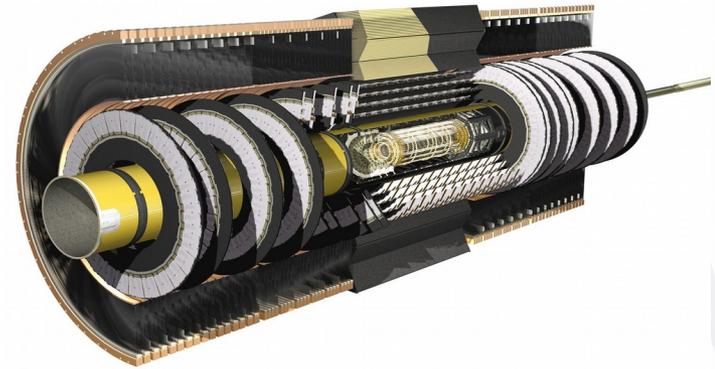
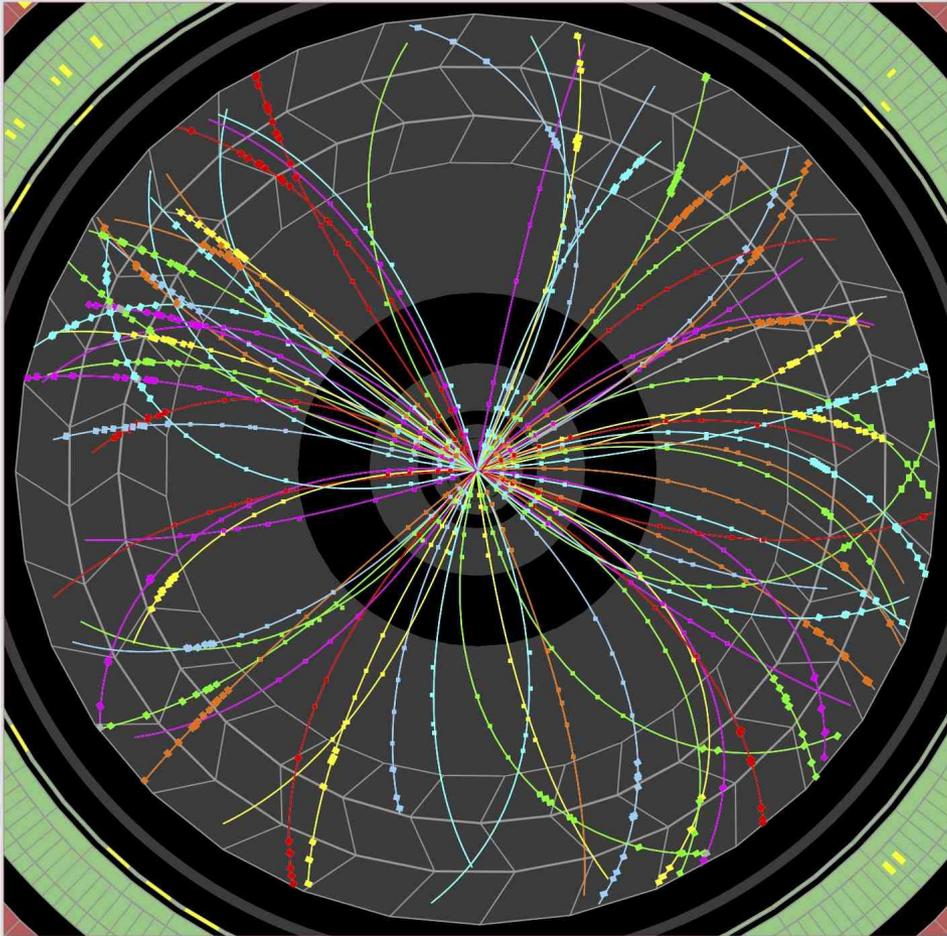
# Proton-Proton-Kollision im Detektor



Hohe Strahlintensität führt zur Überlagerung von vielen Ereignissen in einer Strahlkreuzung (bis zu 50)

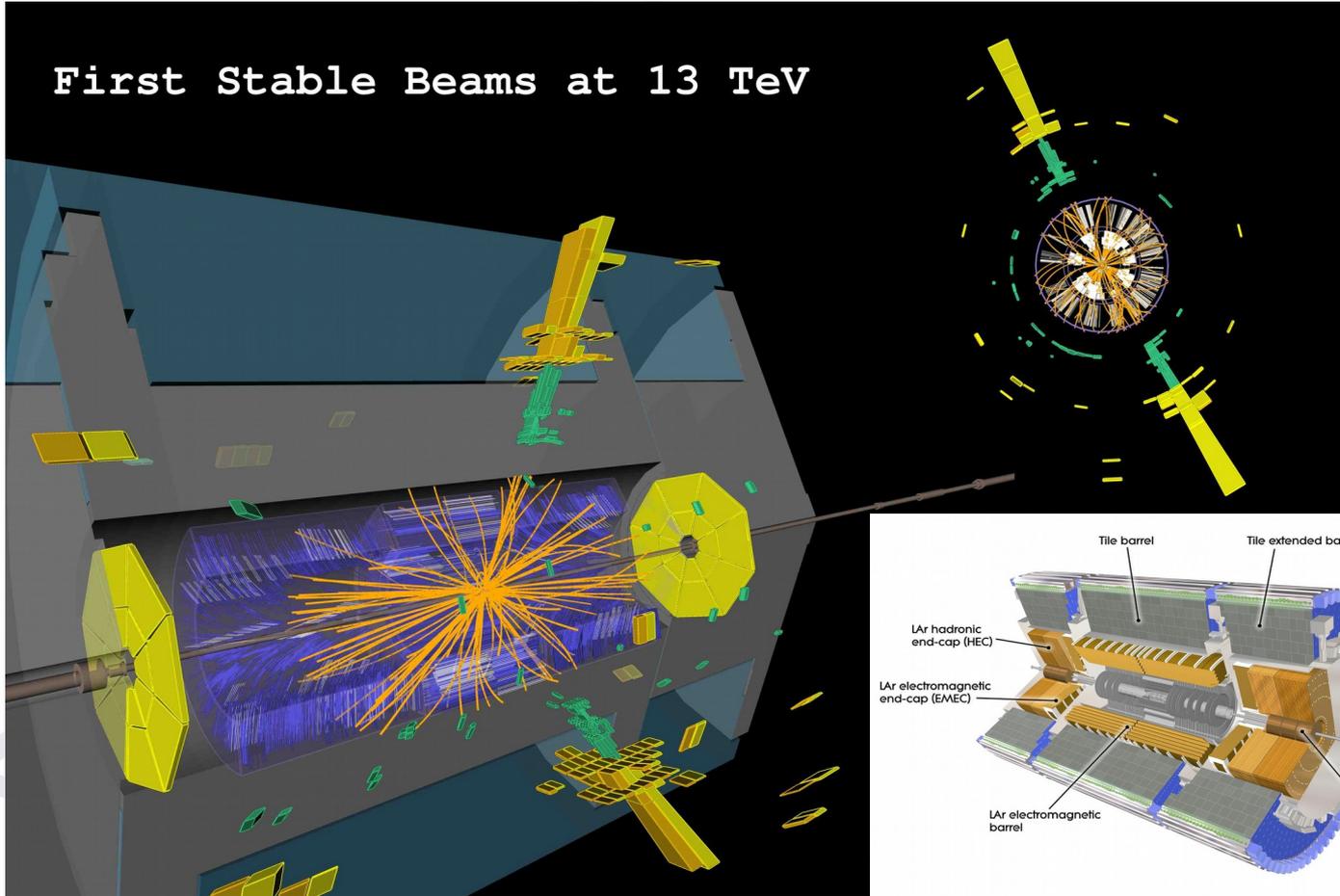


# Nachweis von Flugbahnen (tracks)

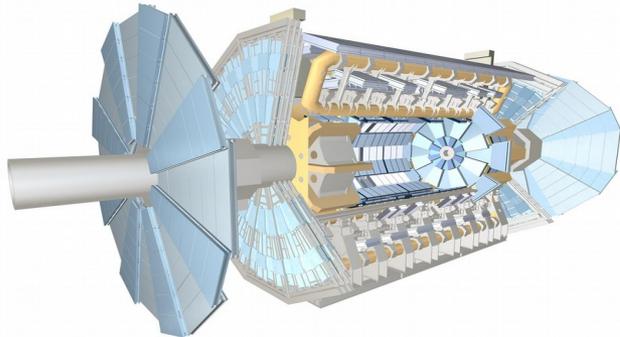


# Nachweis von Teilbündeln (Jets)

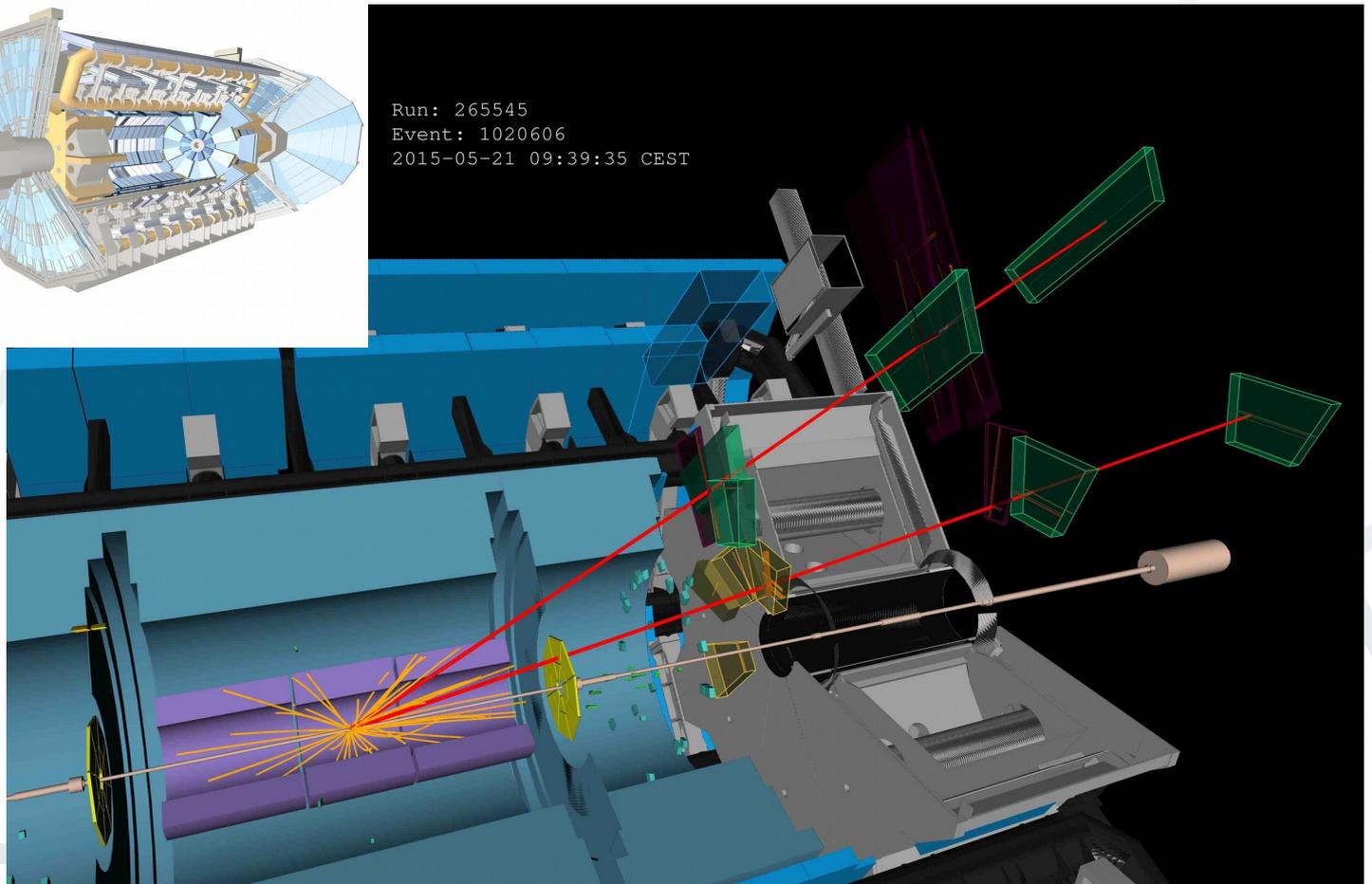
First Stable Beams at 13 TeV



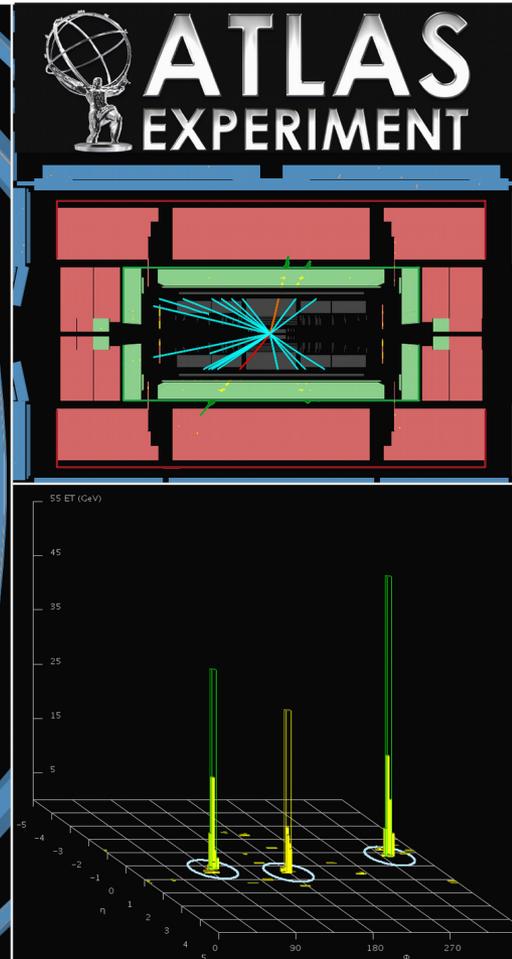
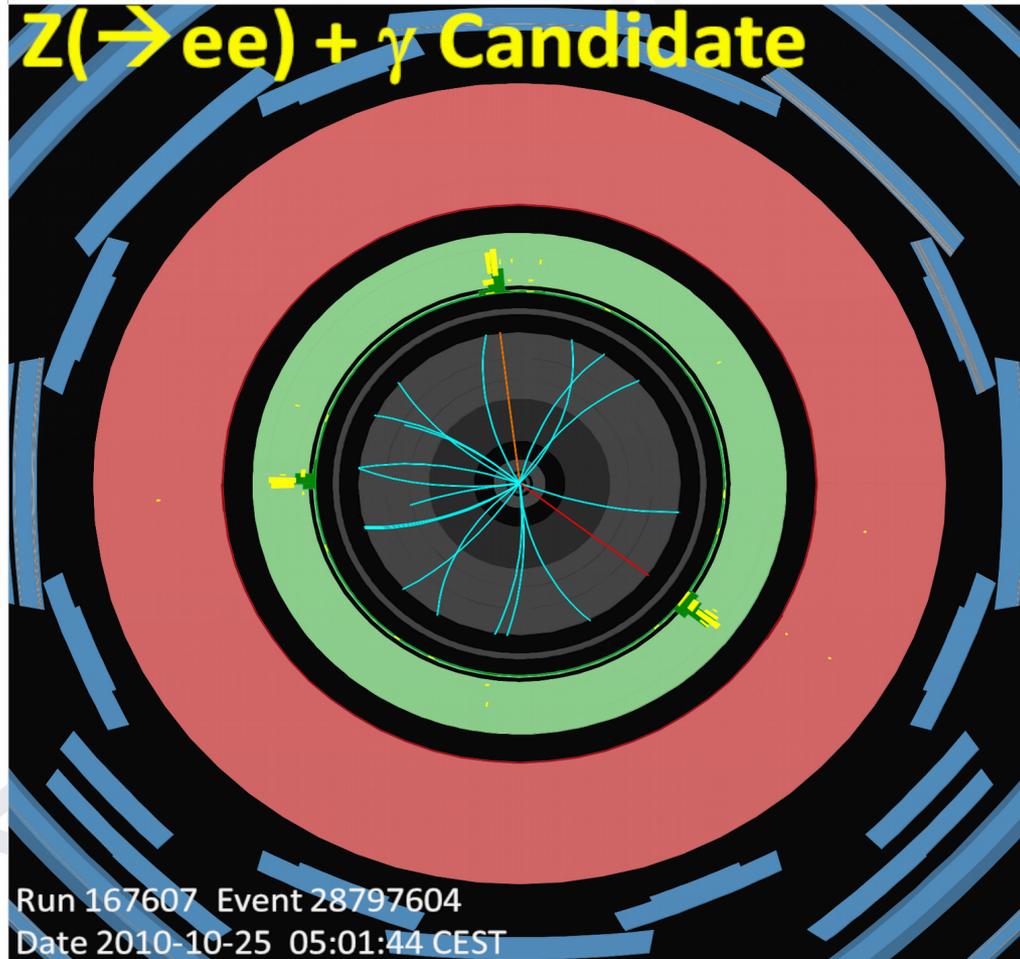
# Nachweis von Myonen



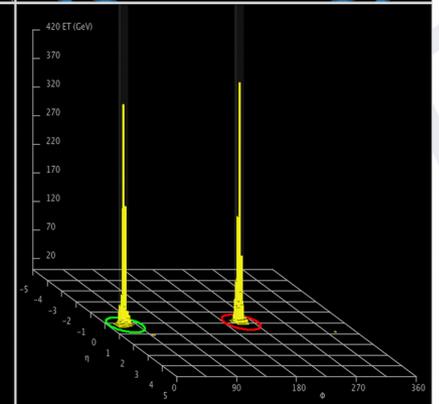
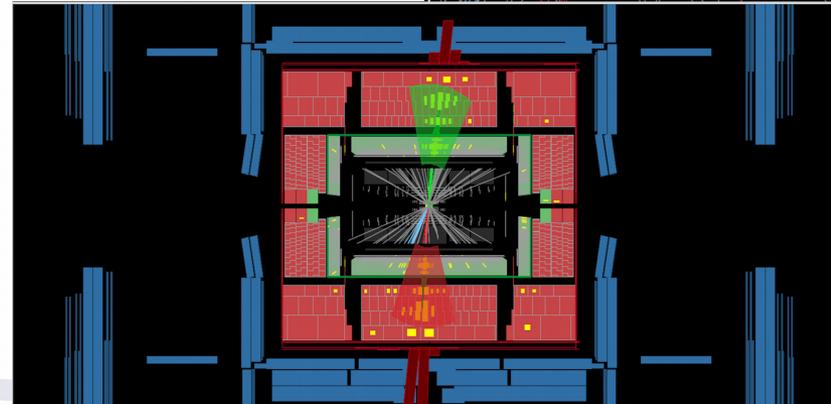
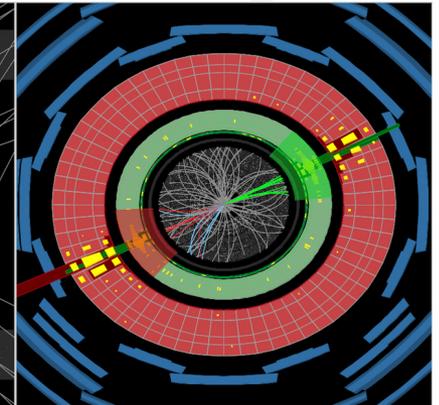
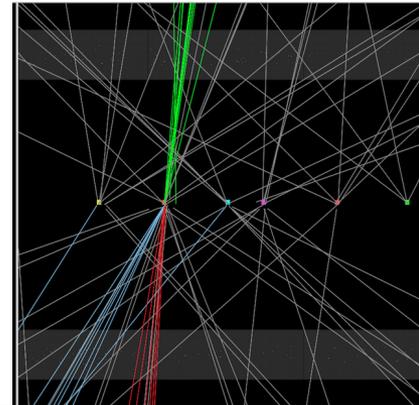
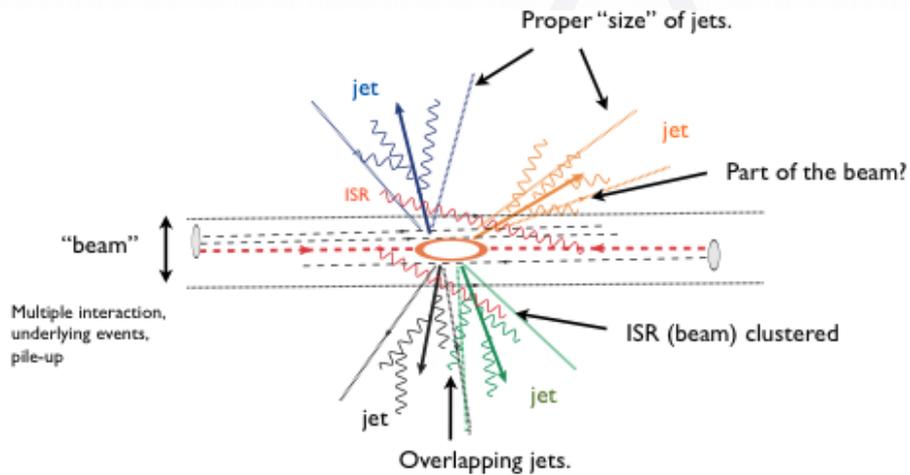
Run: 265545  
Event: 1020606  
2015-05-21 09:39:35 CEST



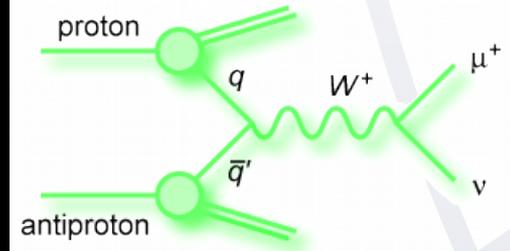
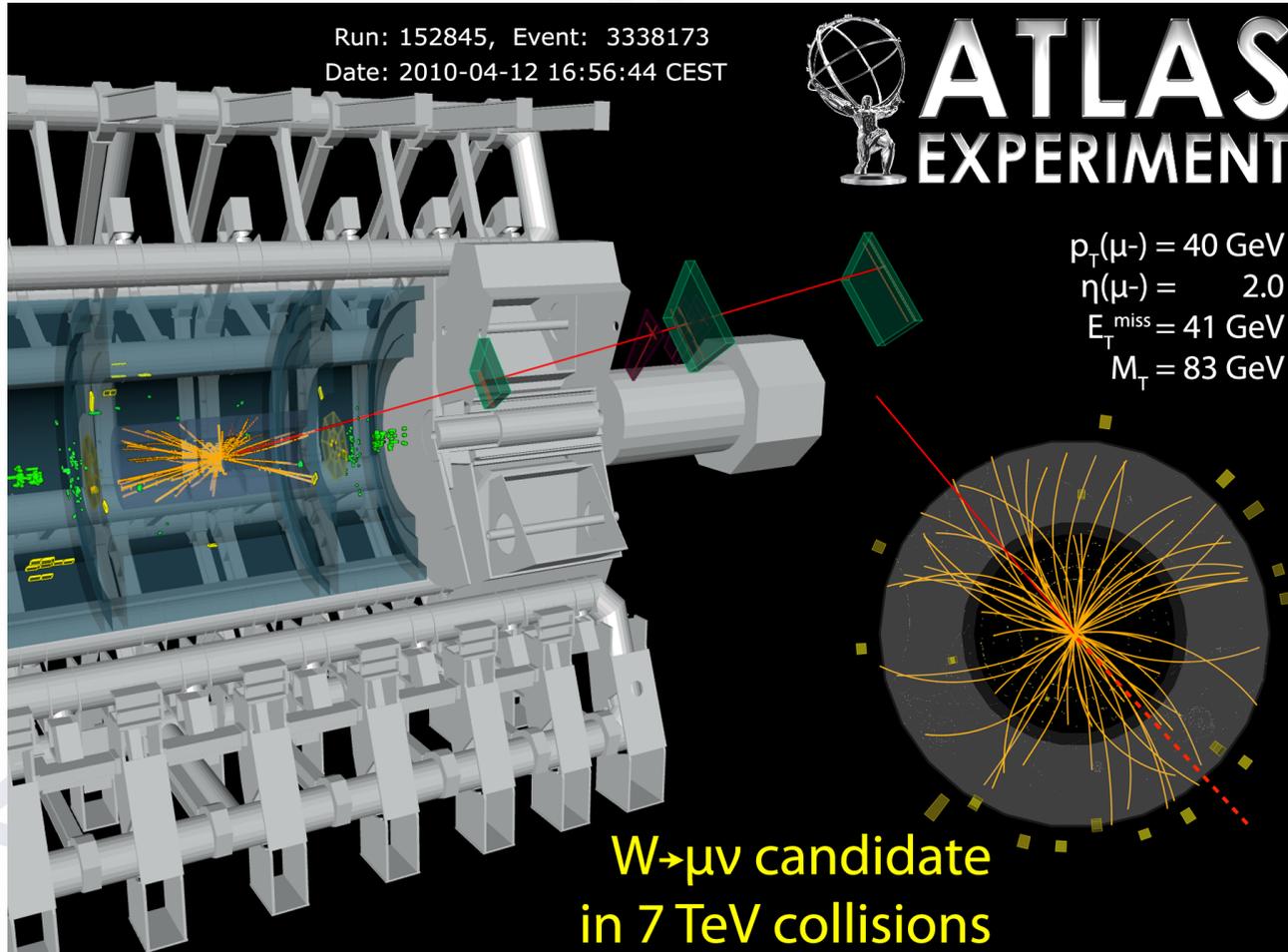
# Nachweis elektromagnetischer Teilchen



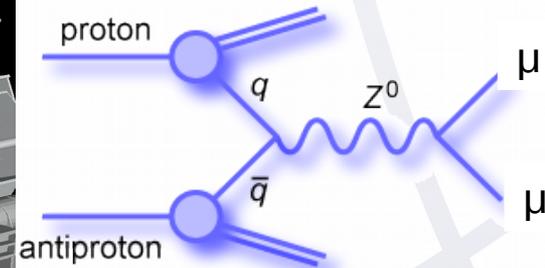
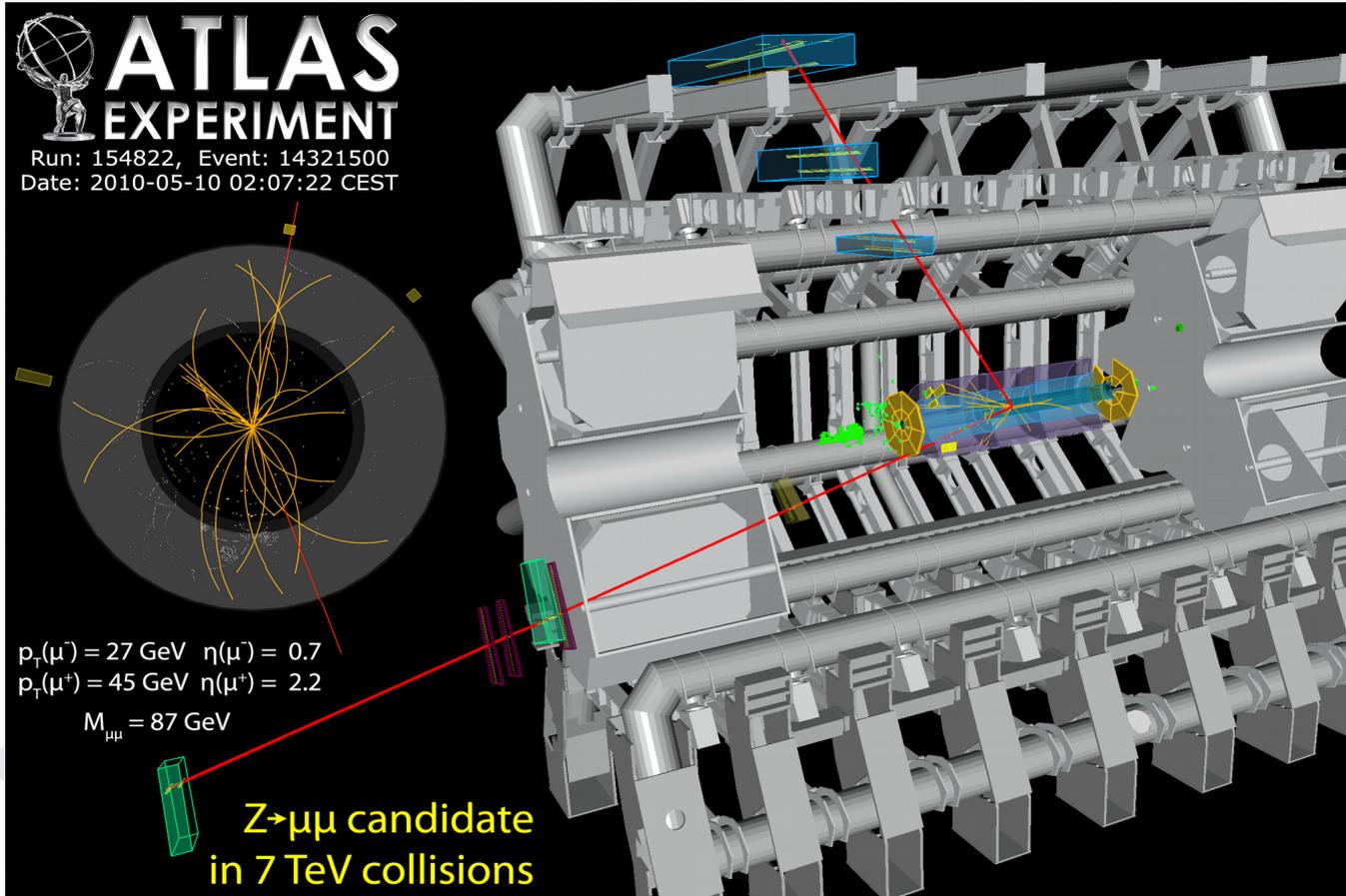
# Starke Wechselwirkung: 2 Jets



# W-Boson am LHC



# Z-Boson am LHC



# Zerfall des Z-Bosons: Invariante Masse

## Newtonsche Masse

$$E = \frac{m}{2} v^2 = \frac{m^2}{2m} v^2 = \frac{p^2}{2m}$$

## Relativitätstheorie

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

$$mc^2 = \sqrt{E^2 - (pc)^2}$$



$E, p$

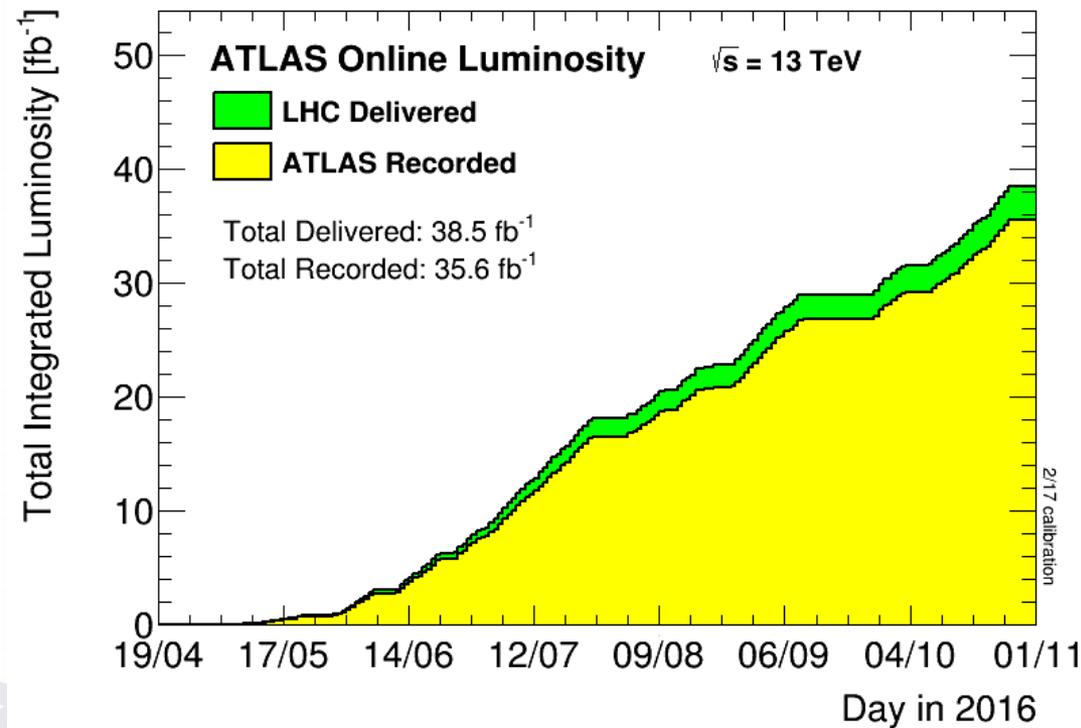


$$E = E_{\mu^+} + E_{\mu^-}$$

$$p = p_{\mu^+} + p_{\mu^-}$$

- Teilchenmasse = Ruhemasse = Invariante Masse
- Müssen zwei Größen ( $E, p$ ) messen, um Ruhemasse zu bestimmen
- Zerfallsprodukte:
  - Durch Messung aller  $E$  und  $p$  der Zerfallsprodukte kann auf die invariante Masse des Mutterteilchens zurückgerechnet werden

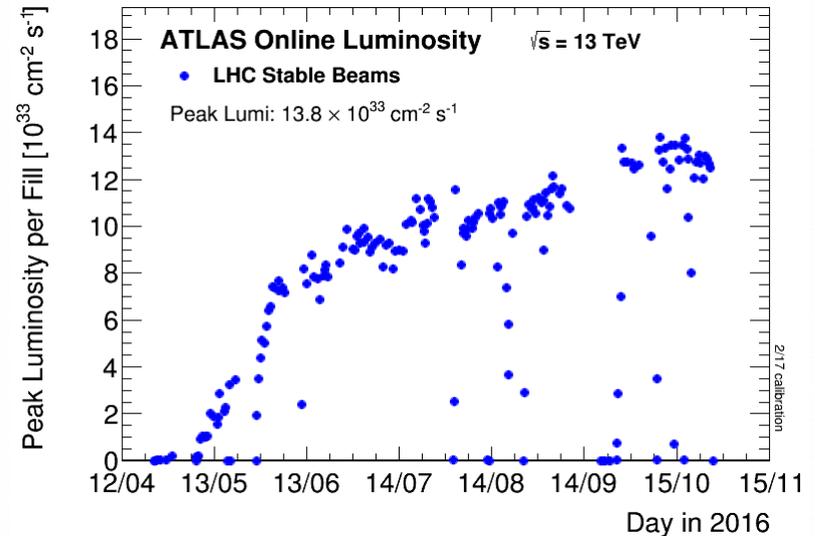
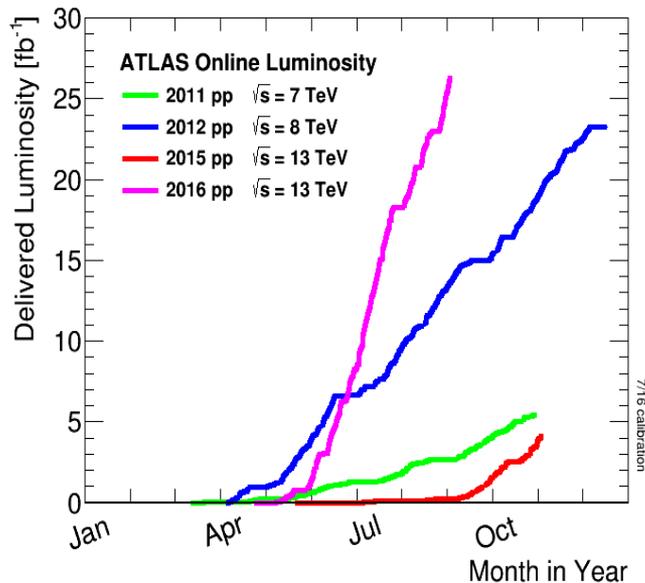
# Datennahme Run 2016



- Aufsummierter Datensatz als Funktion der Zeit
- Exzellente Funktionalität von LHC
- Erfolgreiche Datennahme
- Daten von hoher Qualität

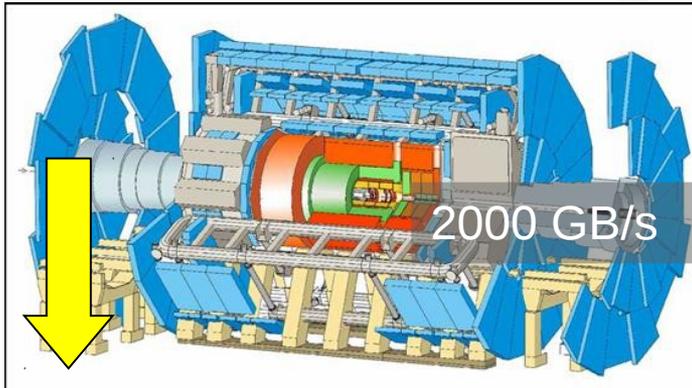
# Datennahme 2010 bis 2016

- Sehr erfolgreiche Steigerung der Datennahme seit 2010
- Designwert 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

# Datennahme und Speicherung



Auslesespeicher



Massenspeicher



2-Stufen Trigger  
LVL1: Hardware  
HLT:  
Computerfarm  
mit 40.000 CPUs

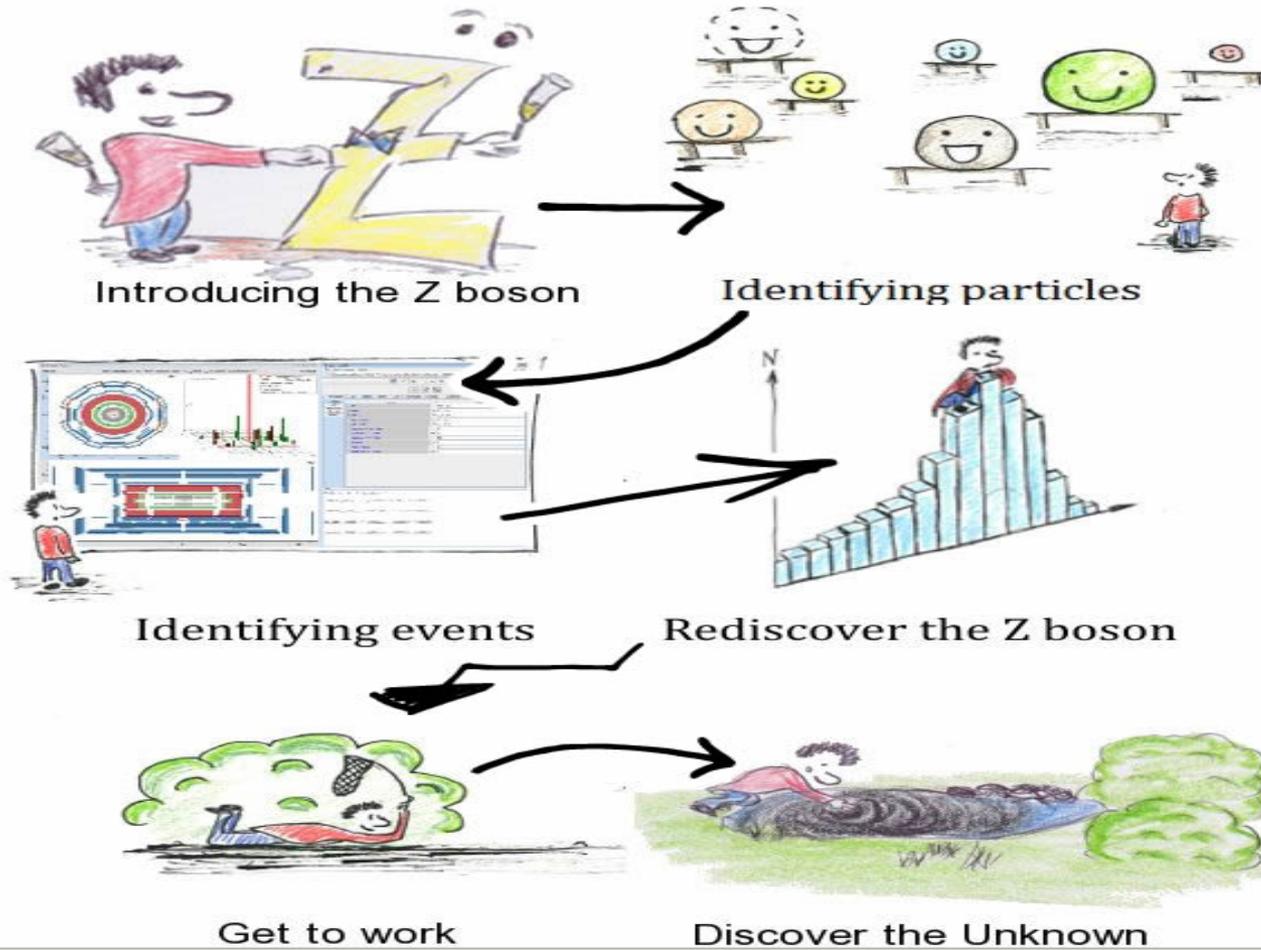


**1 Petabyte  
pro Jahr**  
( $10^6$  Gigabyte)

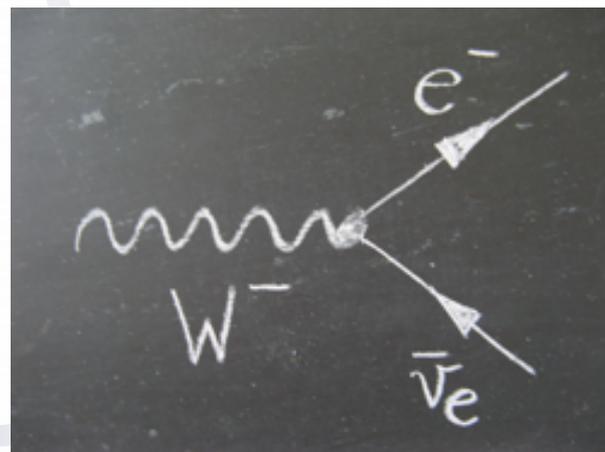
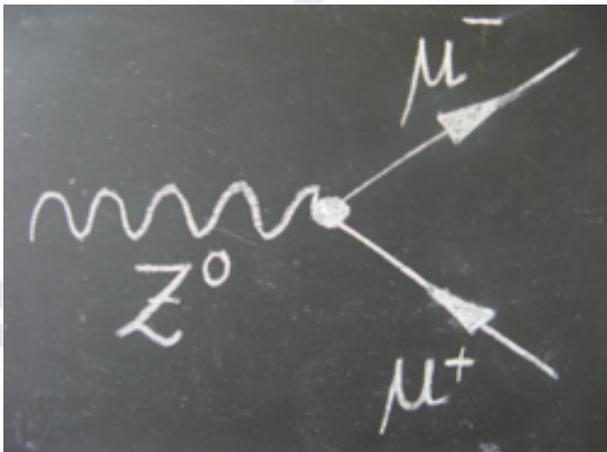
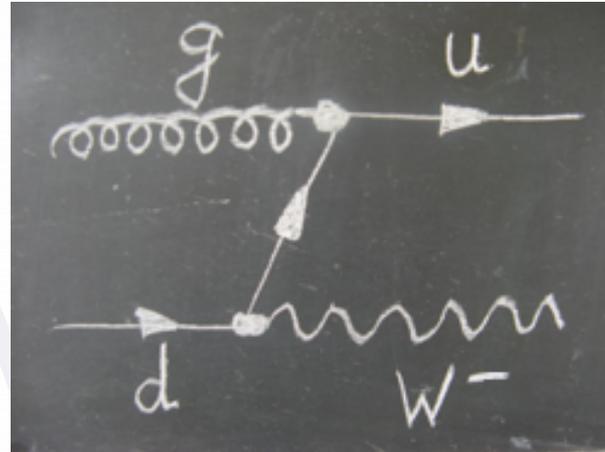
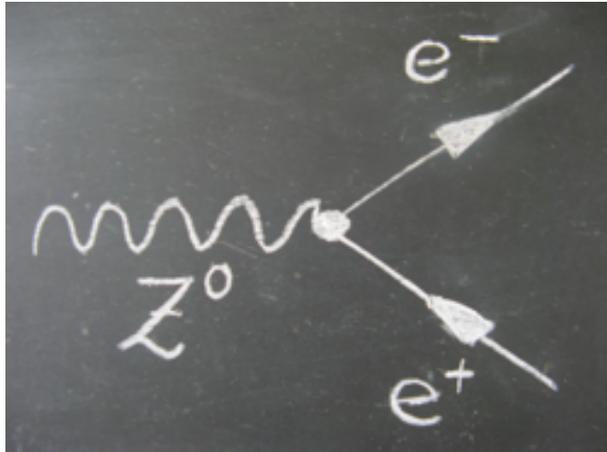
# Der Supercomputer zur Datennahme



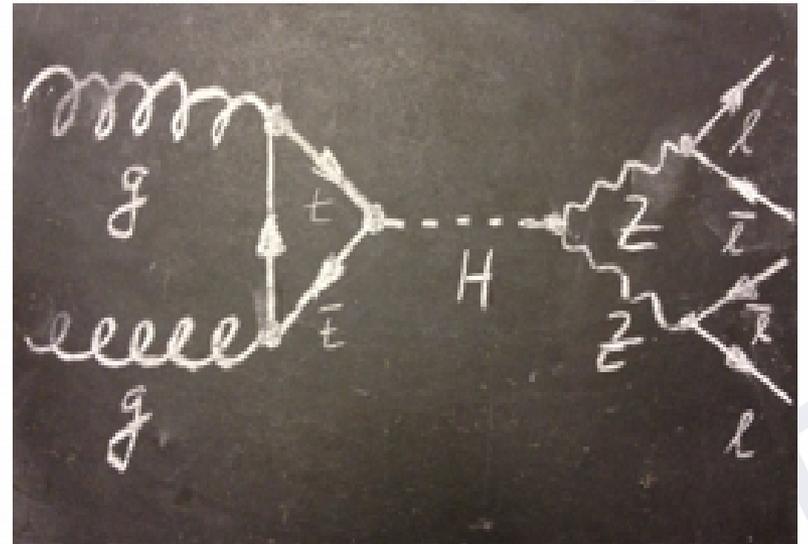
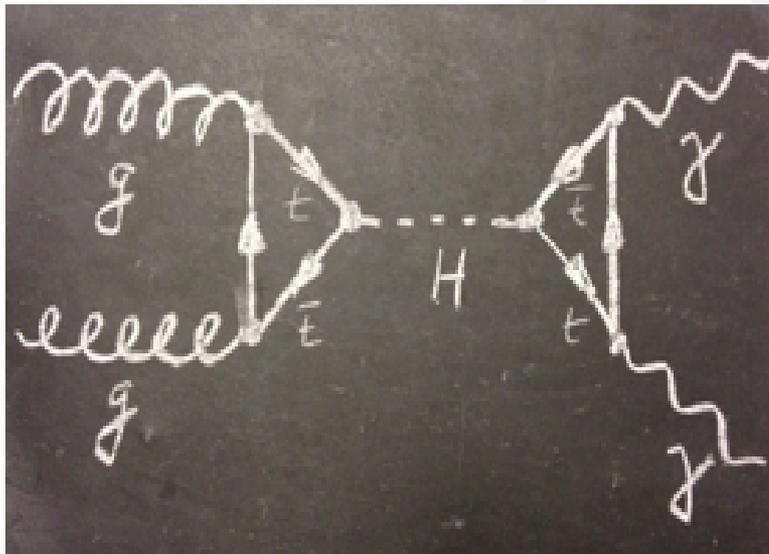
# Unser Plan für heute



# Z-Boson: Signal und Untergrund



# Higgs-Zerfälle



# Suche nach neuem $Z'$

