

Teilchenphysik: Eine Reise vom Kristall bis zum Higgs-Boson

Philip Bechtle



Physikalisches
Institut

08. November 2023

- 1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung
- 2 Kosmische Strahlung
 - Erste Beobachtungen
 - Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
 - Eigenschaften der kosmischen Strahlung
 - Experimente für kosmische Strahlung
- 3 Teilchenphysikdetektoren
- 4 Das Higgs-Boson
- 5 Das Higgs-Boson am LHC

1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung

2 Kosmische Strahlung

- Erste Beobachtungen
- Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
- Eigenschaften der kosmischen Strahlung
- Experimente für kosmische Strahlung

3 Teilchenphysikdetektoren

4 Das Higgs-Boson

5 Das Higgs-Boson am LHC

Ordnung auf jeder Skala

Aus unserer Alltagswelt – Der Kristall



Ordnung auf jeder Skala

Das Periodensystem der Elemente

| | Hauptgruppen-Elemente | | Nebengruppen-Elemente (d-Elemente) | | | | | | | | | | Hauptgruppen-Elemente | | | | | Edelgase |
|--------|-----------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Gruppe | IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VII B | VIII B | | IB | II B | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | VIIIA | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| | 1 H 1.0079 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He 4.0026 |
| | 3 Li 6.941 | 4 Be 9.0122 | | | | | | | | | | | 5 B 10.81 | 6 C 12.01115 | 7 N 14.0067 | 8 O 15.9994 | 9 F 18.9984 | 10 Ne 20.179 |
| | 11 Na 22.9898 | 12 Mg 24.305 | | | | | | | | | | | 13 Al 26.9815 | 14 Si 28.086 | 15 P 30.9738 | 16 S 32.06 | 17 Cl 35.453 | 18 Ar 39.948 |
| | 19 K 39.09 | 20 Ca 40.08 | 21 Sc 44.956 | 22 Ti 47.90 | 23 V 50.941 | 24 Cr 51.996 | 25 Mn 54.9380 | 26 Fe 55.847 | 27 Co 58.9332 | 28 Ni 58.71 | 29 Cu 63.45 | 30 Zn 65.37 | 31 Ga 69.72 | 32 Ge 75.59 | 33 As 74.9216 | 34 Se 78.96 | 35 Br 79.909 | 36 Kr 83.80 |
| | 37 Rb 85.467 | 38 Sr 87.62 | 39 Y 88.906 | 40 Zr 91.22 | 41 Nb 92.9064 | 42 Mo 95.94 | 43 Tc 98.906 | 44 Ru 101.07 | 45 Rh 102.905 | 46 Pd 106.4 | 47 Ag 107.868 | 48 Cd 112.40 | 49 In 114.82 | 50 Sn 118.69 | 51 Sb 121.75 | 52 Te 127.60 | 53 I 126.904 | 54 Xe 131.30 |
| | 55 Cs 132.905 | 56 Ba 137.33 | 57 La 138.905 | 72 Hf 178.49 | 73 Ta 180.947 | 74 W 183.85 | 75 Re 186.2 | 76 Os 190.2 | 77 Ir 192.2 | 78 Pt 195.09 | 79 Au 196.967 | 80 Hg 200.59 | 81 Tl 204.37 | 82 Pb 207.2 | 83 Bi 208.980 | 84 Po (209) | 85 At (210) | 86 Rn (222) |
| | 87 Fr (223) | 88 Ra 226.025 | 89 Ac (227) | 104 Rf 261.109 | 105 Db 262.114 | 106 Sg 263.118 | 107 Bh 262.123 | 108 Hs | 109 Mt | 110 Ds | 111 Uuu | 112 Uub | 113 Uuq | 114 Uuq | 115 | 116 | 117 | 118 |

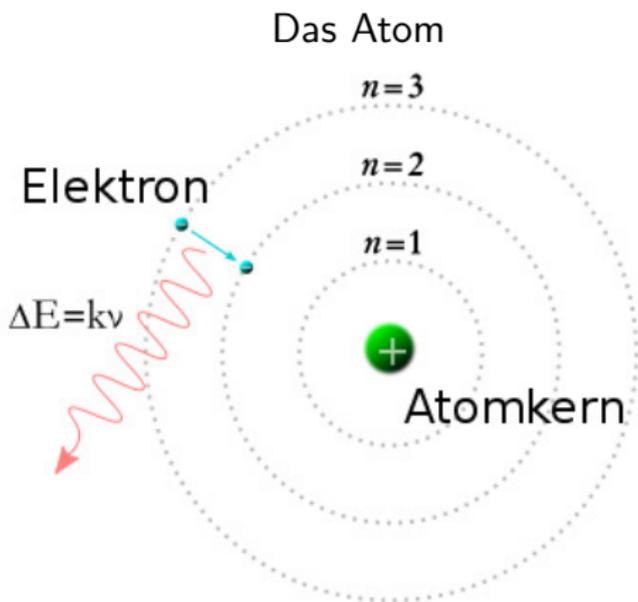
f-Elemente (Seltene Erden)

Lanthaniden

Actiniden

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 58 Ce 140.12 | 59 Pr 140.907 | 60 Nd 144.24 | 61 Pm (145) | 62 Sm 150.4 | 63 Eu 151.96 | 64 Gd 157.25 | 65 Tb 158.925 | 66 Dy 162.50 | 67 Ho 164.930 | 68 Er 167.26 | 69 Tm 168.934 | 70 Yb 173.04 | 71 Lu 174.97 |
| 90 Th 232.038 | 91 Pa 231.036 | 92 U 238.029 | 93 Np 237.05 | 94 Pu (244) | 95 Am (243) | 96 Cm (247) | 97 Bk (247) | 98 Cf (251) | 99 Es (254) | 100 Fm (257) | 101 Md (258) | 102 No (259) | 103 Lr (260) |

Ordnung auf jeder Skala

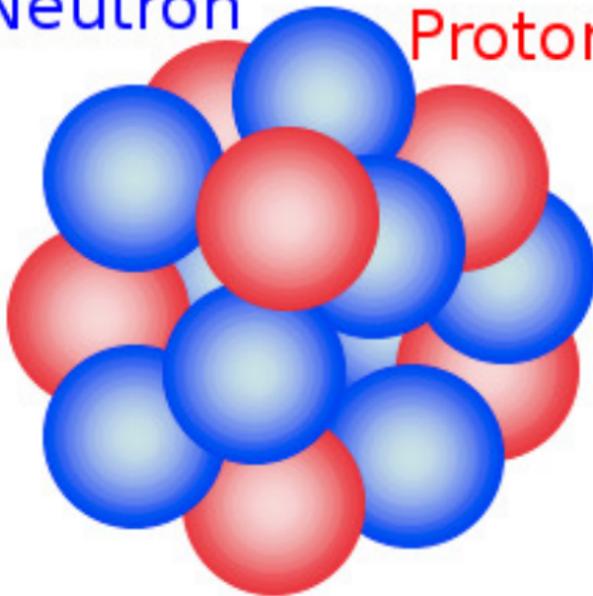


Ordnung auf jeder Skala

Der Atomkern

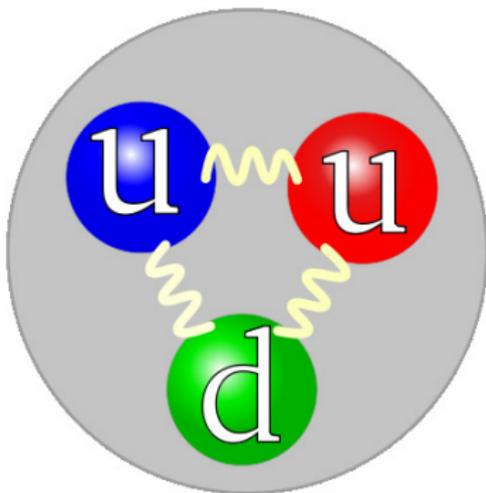
Neutron

Proton



Ordnung auf jeder Skala

Die Protonen und Neutronen



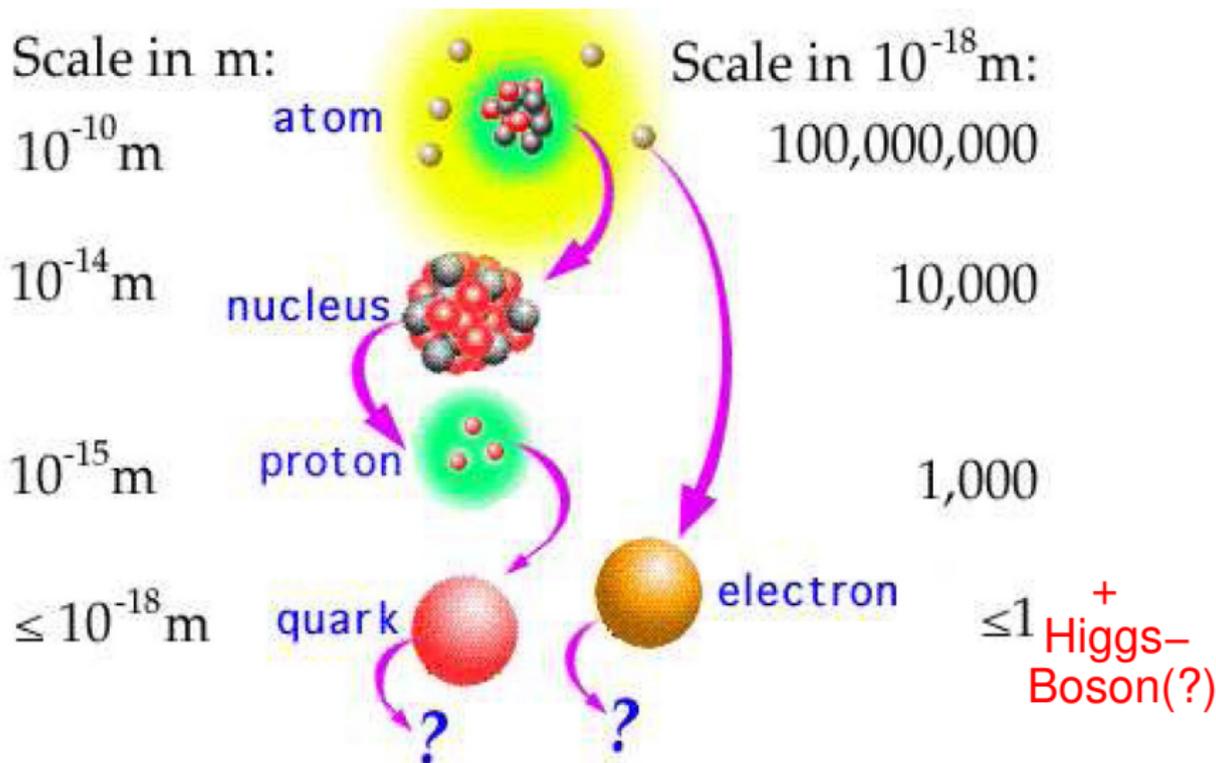
Ordnung auf jeder Skala

Bausteine



Ordnung auf jeder Skala

Die fundamentalen Bausteine der Materie



Bekannte Bausteine der Materie

Three Generations of Matter (Fermions)

| | I | II | III | |
|----------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| mass → | 2.4 MeV/c ² | 1.27 GeV/c ² | 171.2 GeV/c ² | 0 |
| charge → | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 |
| spin → | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| name → | u up | c charm | t top | γ photon |
| Quarks | 4.8 MeV/c ² | 104 MeV/c ² | 4.2 GeV/c ² | 0 |
| | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | d down | s strange | b bottom | g gluon |
| Leptons | <2.2 eV/c ² | <0.17 MeV/c ² | <15.5 MeV/c ² | 91.2 GeV/c ² |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | Z⁰ Z boson |
| | 0.511 MeV/c ² | 105.7 MeV/c ² | 1.777 GeV/c ² | 80.4 GeV/c ² |
| | -1 | -1 | -1 | ± 1 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | e electron | μ muon | τ tau | W[±] W boson |
| | | | | Gauge Bosons |

Symmetrie liegt der mathematischen Beschreibung zugrunde!

Warum wir wissen, dass wir einiges noch nicht wissen

- Experimental Knowledge: The SM is incomplete!



- In the SM, there are no particles with the correct properties for Dark Matter





Why is the electromagnetic force of the tiny magnet stronger than the gravity of **all** the earth combined?

A warning: Order without fundamental reason



Der Large Hadron Collider LHC

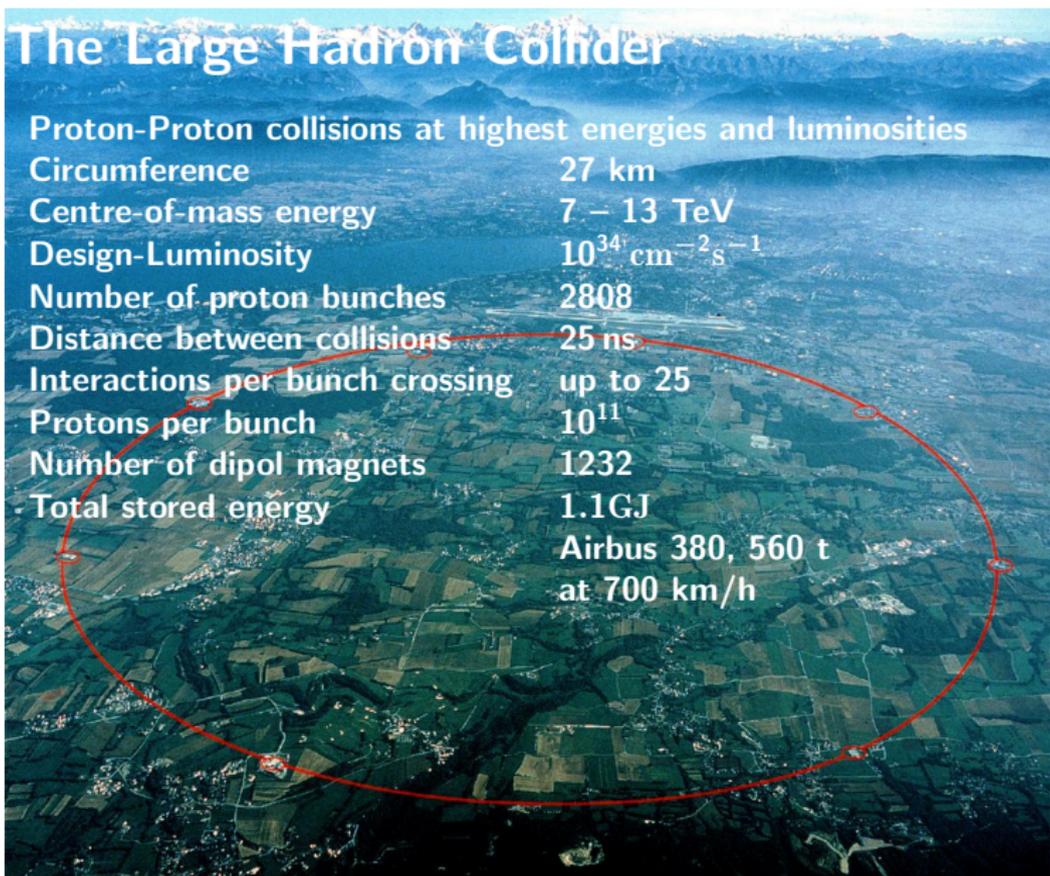
The most powerfull collider ever
27km long, 100m below surface



The Large Hadron Collider

Proton-Proton collisions at highest energies and luminosities

| | |
|---------------------------------|--|
| Circumference | 27 km |
| Centre-of-mass energy | 7 – 13 TeV |
| Design-Luminosity | $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| Number of proton bunches | 2808 |
| Distance between collisions | 25 ns |
| Interactions per bunch crossing | up to 25 |
| Protons per bunch | 10^{11} |
| Number of dipol magnets | 1232 |
| Total stored energy | 1.1GJ |
| | Airbus 380, 560 t at 700 km/h |



1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung

2 Kosmische Strahlung

- Erste Beobachtungen
- Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
- Eigenschaften der kosmischen Strahlung
- Experimente für kosmische Strahlung

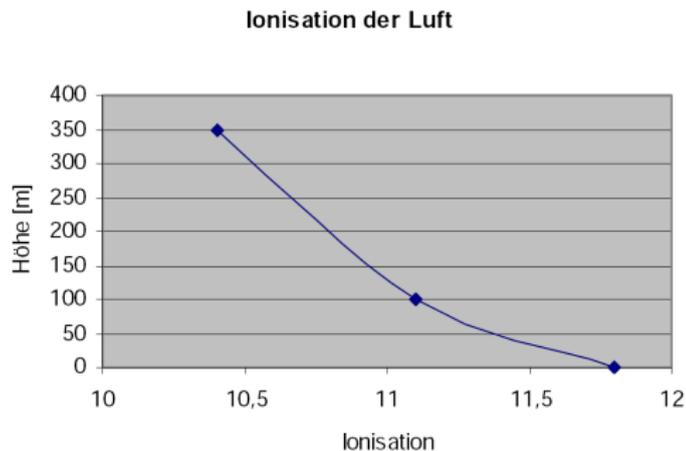
3 Teilchenphysikdetektoren

4 Das Higgs-Boson

5 Das Higgs-Boson am LHC

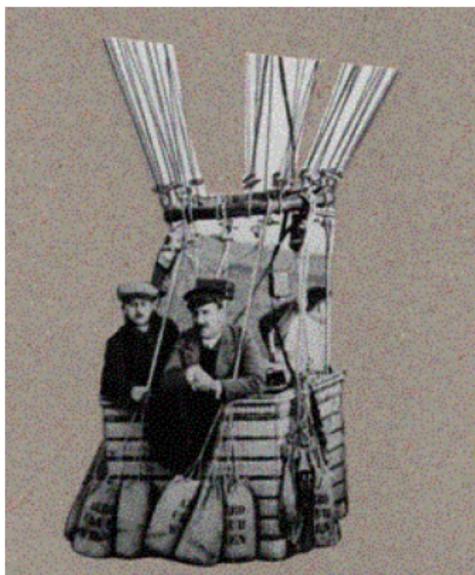
Ionisation durch Strahlung aus der Erde?

- Die Ladung fließt über ionisierte Atome in der Luft ab!

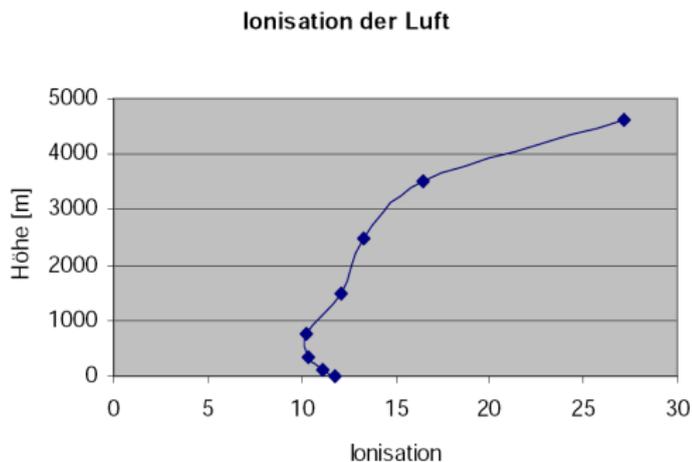


- Woher kommt die Ionisation? Natürliche Radioaktivität aus dem Boden?

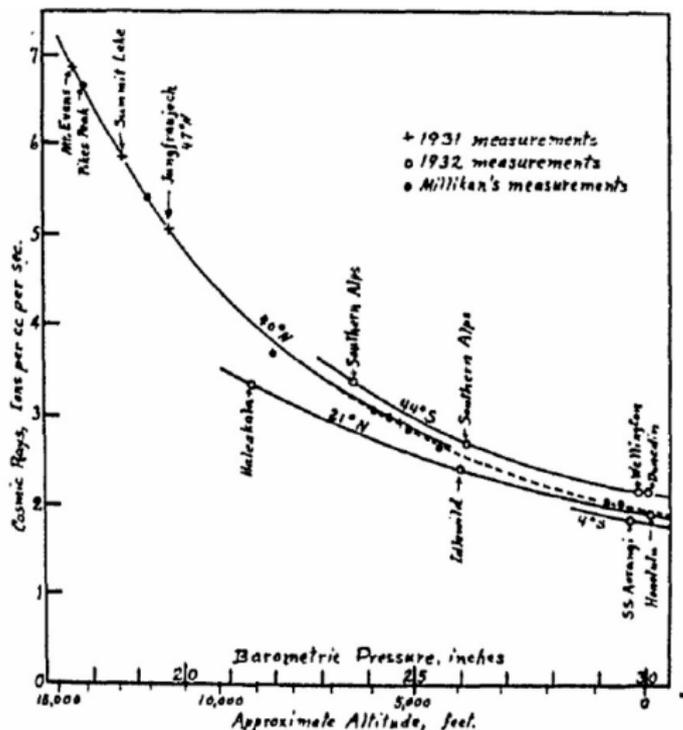
Ionisation durch Strahlung aus dem All!



- Victor Hess, 1912: Ballonexperiment: Ionisation wird in steigender Höhe wieder viel stärker!

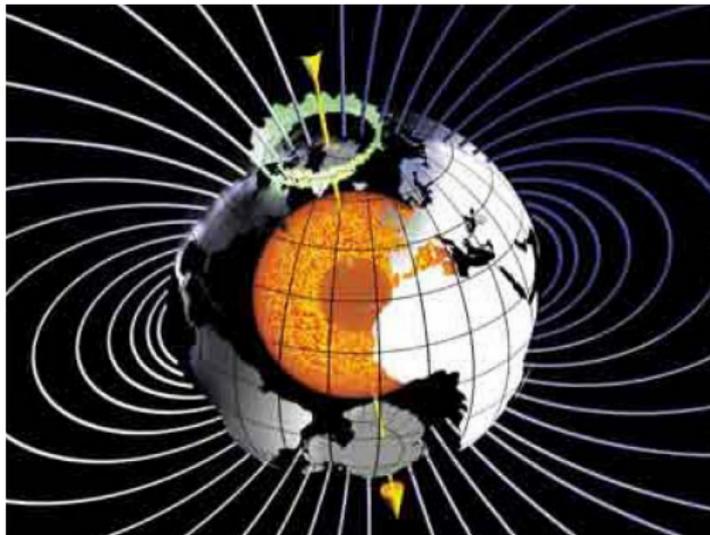


Woraus besteht die kosmische Strahlung?



- Wie kann man herausfinden, woraus die Strahlung besteht?
- Gibt es noch andere Variationen, außer der Höhe?
- Was ist mit der nördl./südl. Breite?

Woraus besteht die kosmische Strahlung?



- Erdmagnetfeld lenkt Teilchen ab!
- Schlußfolgerung: Die Strahlung aus dem All besteht aus geladenen Teilchen!

Was können Sie selbst messen?

- Ist ein geeigneter Detektor vorhanden, können Schüler sehr viel selbst über die kosmische Strahlung herausfinden!
 - Sind es Teilchen, die diese Phänomene verursachen?
 - Kommt diese Strahlung von oben oder unten?
 - Kommt sie von der Sonne?
 - Wie schnell sind diese Teilchen?
 - Wodurch werden sie abgelenkt → was für Teilchen sind es?
- Brauchen:
 - Effizienten Detektor
 - Automatisches Datennahmesystem
 - Analyseumgebung
 - Vergleich der eigenen Daten mit Daten aus anderen Regionen
- All das kann der im weiteren vorgestellte Detektor
- Die Schüler lernen sehr viel über moderne Physik und den Aufbau und Betrieb moderner Experimente (Physik des Detektors, Kalibration, Kontrolle der Daten, internationale Zusammenarbeit, etc)

Nachweis der Teilchen auf der Erde



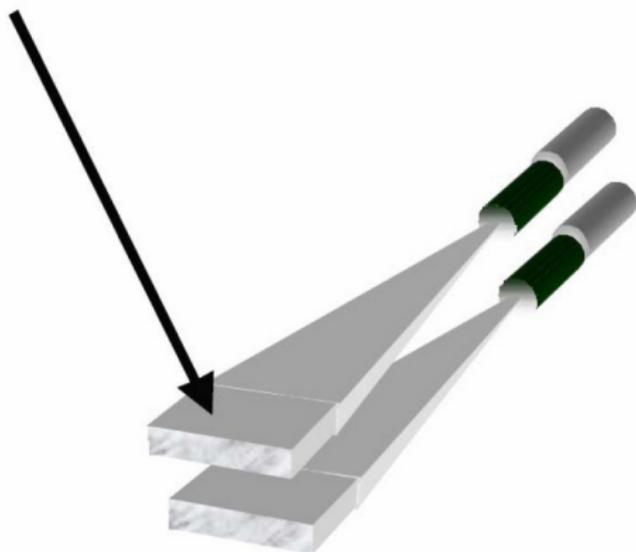
Funkenkammer



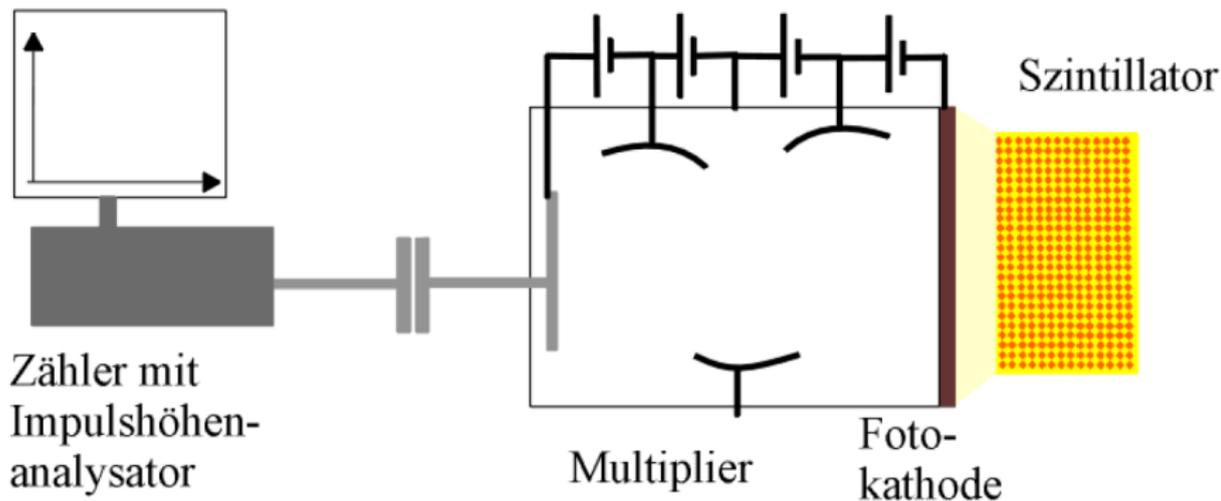
Nebelkammer

Scintillatoren

- Keine Lust (und nicht schnell genug), jedes Teilchen von Hand zu zählen . . .
- Benutze **szintillierendes Material**: Plastik oder Kristall, dessen Moleküle oder Atome beim Durchgang eines geladenen Teilchens angeregt werden und Licht aussenden
- Einfach, billig, schnell!



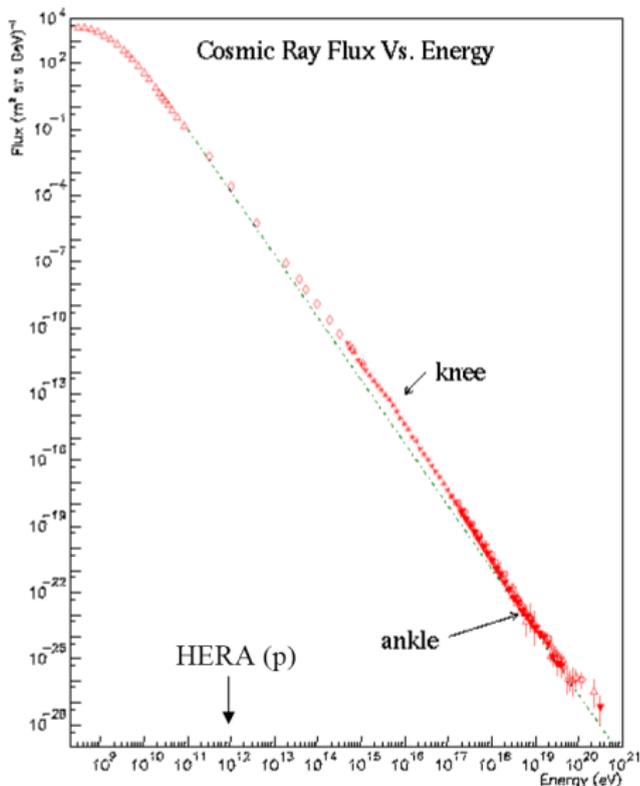
Photomultiplier



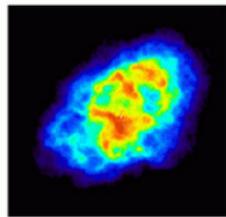
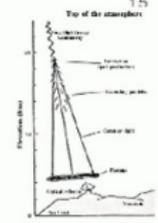
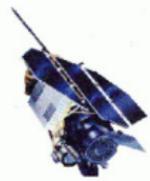
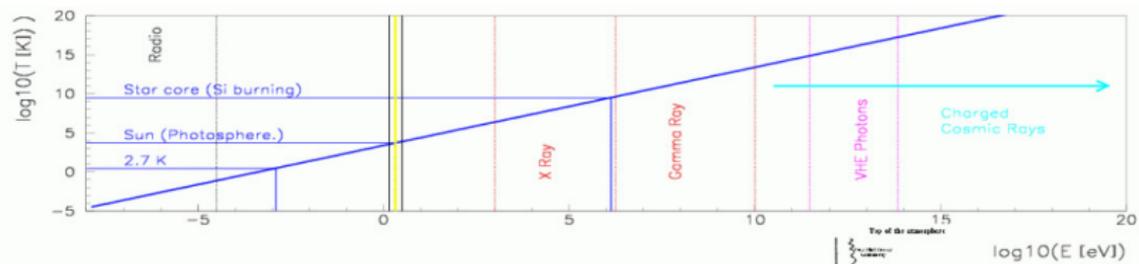
- Nun muß nur noch ein Computer die Lichtblitze aus dem Szintillator messen
- Benutze z.B. einen **Photomultiplier**, der Lichtsignale in ein elektrisches Signal umwandelt

Energie der kosmischen Teilchen

- Versuche, die Energie der auf die Erdatmosphäre eintreffenden Teilchen zu messen
- Es gibt sehr viele mit wenig Energie: **hunderte Teilchen fliegen pro Sekunde durch uns hindurch** ...
- Es gibt sehr wenige mit **sehr hoher Energie**: Oberhalb des „Knöchels“ weniger als 1 Teilchen pro km^2 und Jahr!



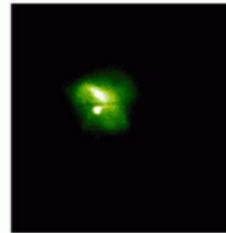
Woher kommen die kosmischen Teilchen?



0.1 deg

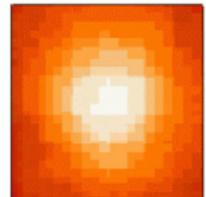


0.1 deg

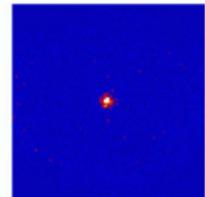


0.1 deg

γ- Rays from the Crab Nebula
EGRET (>100 MeV) HEGRA CT (TeV)

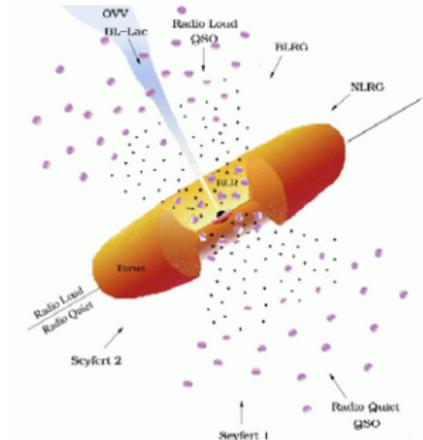
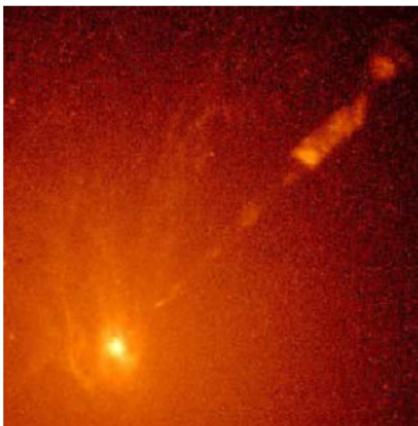
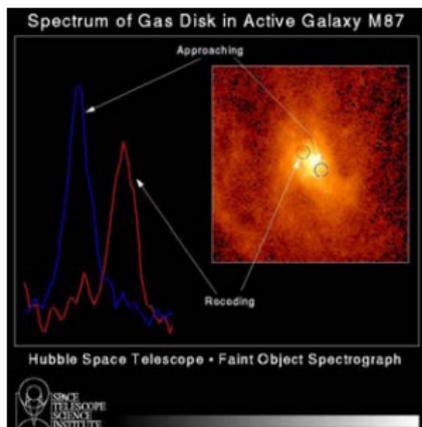


4 deg



4 deg

Mögliche Beschleuniger



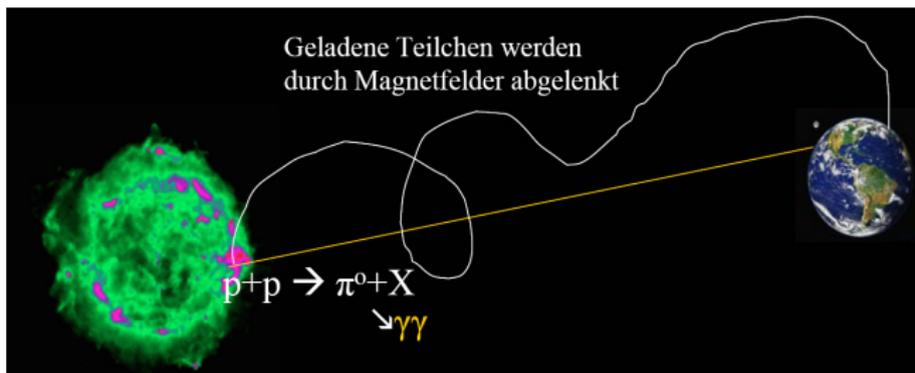
- Wahrscheinlichster Kandidat für die Erzeugung der hochenergetischen kosmischen Teilchen: Ein Beschleuniger!
- Sogenannte **Active Galactic Nuclei**: Sehr schwere Schwarze Löcher im Zentrum einer Galaxie, mit starken elektrischen und magnetischen Feldern in der **Accretion Disc**
- Wirkt fast genau wie ein Beschleuniger wie HERA am DESY...

Der Einfluß der magnetischen Felder

- Warum ist es so schwer, herauszufinden, woher die kosmischen Teilchen genau kommen?

Der Einfluß der magnetischen Felder

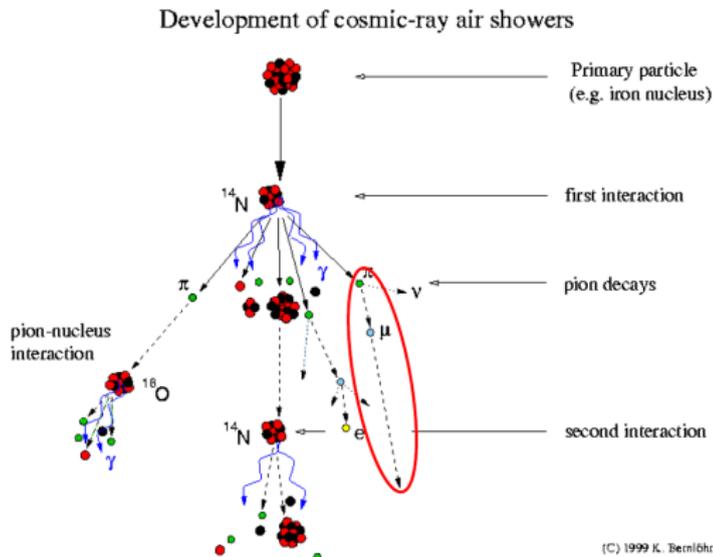
- Warum ist es so schwer, herauszufinden, woher die kosmischen Teilchen genau kommen?



- Die meisten Teilchen werden von schwachen (aber sehr weit ausgedehnten) Magnetfeldern im Weltraum abgelenkt
- Nur die ganz seltenen hochenergetischen Teilchen werden wenig abgelenkt

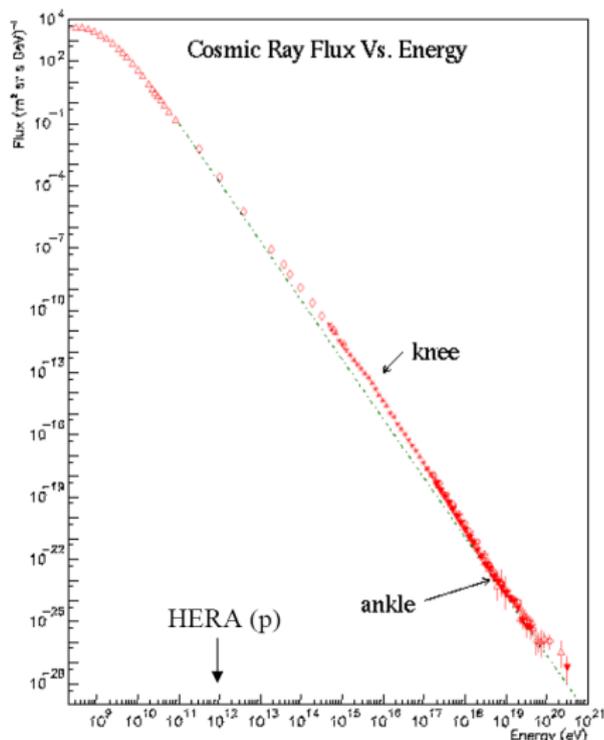
Luftschauer

- Was passiert mit den kosmischen Teilchen in der Atmosphäre?
- Es bildet sich ein Schauer aus vielen Teilchen
- Orientierung, Größe und Struktur des Schauers geben Auskunft über Richtung und Energie des kosmischen Teilchens



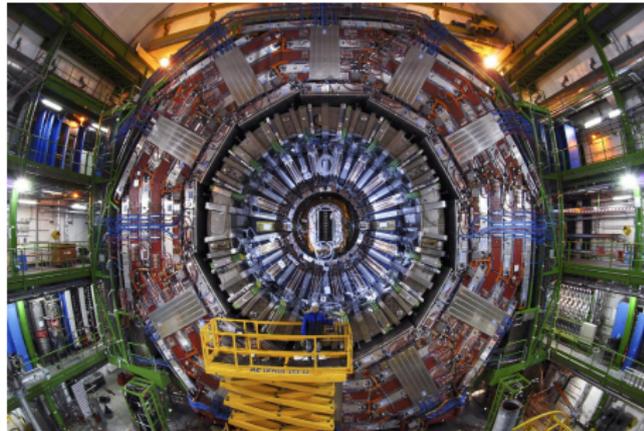
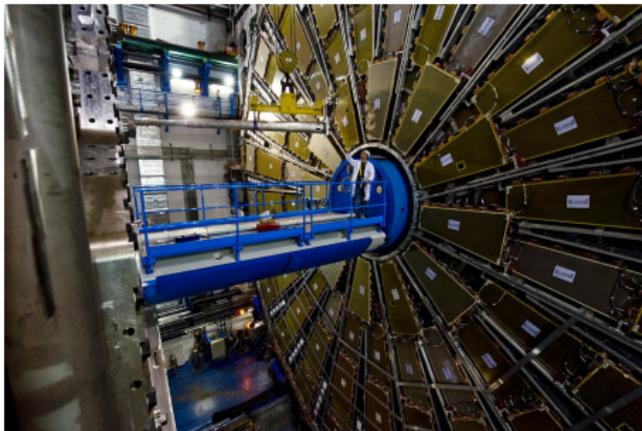
Luftschauer

- Was passiert mit den kosmischen Teilchen in der Atmosphäre?
- Es bildet sich ein Schauer aus vielen Teilchen
- Orientierung, Größe und Struktur des Schauers geben Auskunft über Richtung und Energie des kosmischen Teilchens



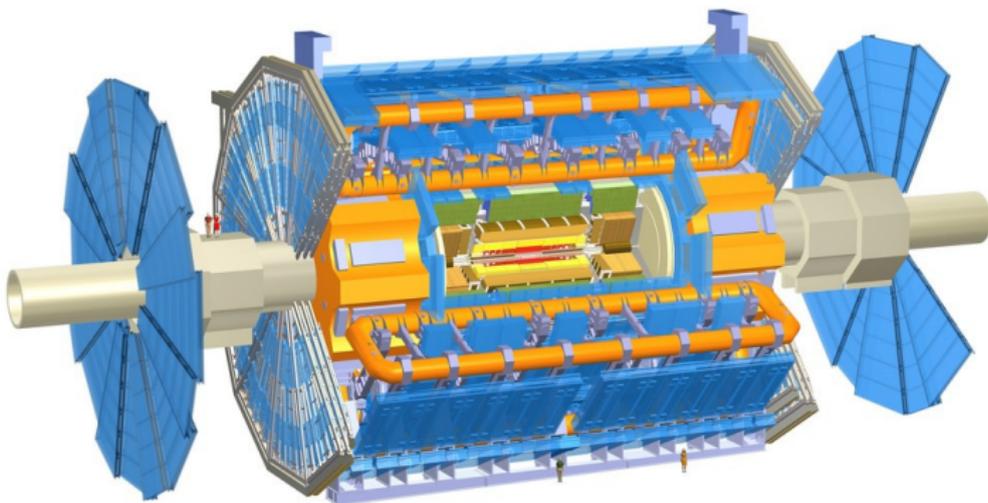
- 1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung
- 2 Kosmische Strahlung
 - Erste Beobachtungen
 - Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
 - Eigenschaften der kosmischen Strahlung
 - Experimente für kosmische Strahlung
- 3 Teilchenphysikdetektoren**
- 4 Das Higgs-Boson
- 5 Das Higgs-Boson am LHC

The LHC Detectors



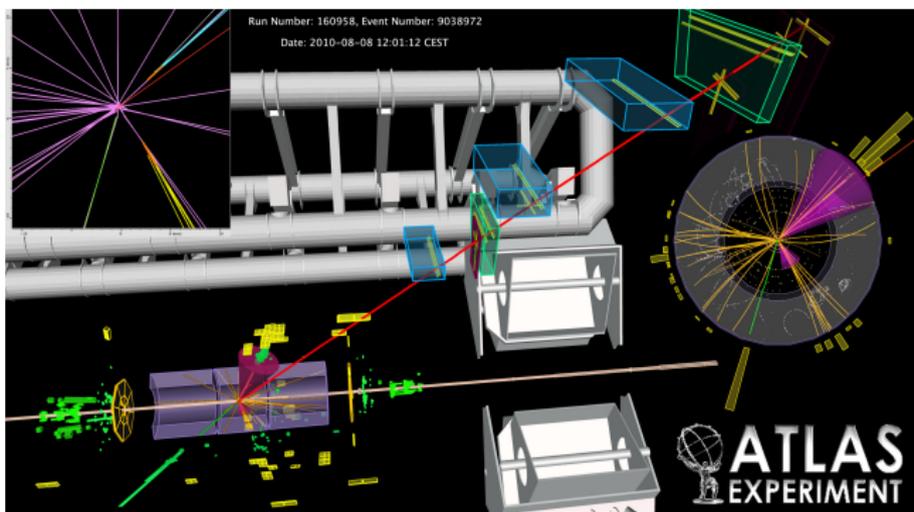
Example: The ATLAS Experiment

Together with CMS: The fastest and biggest digital camera on earth:



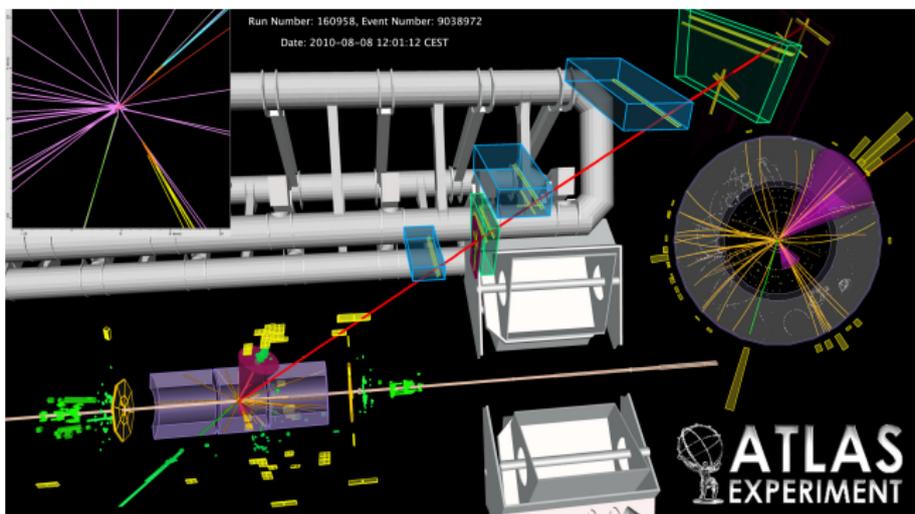
Example: The ATLAS Experiment

Together with CMS: The fastest and biggest digital camera on earth:



Example: The ATLAS Experiment

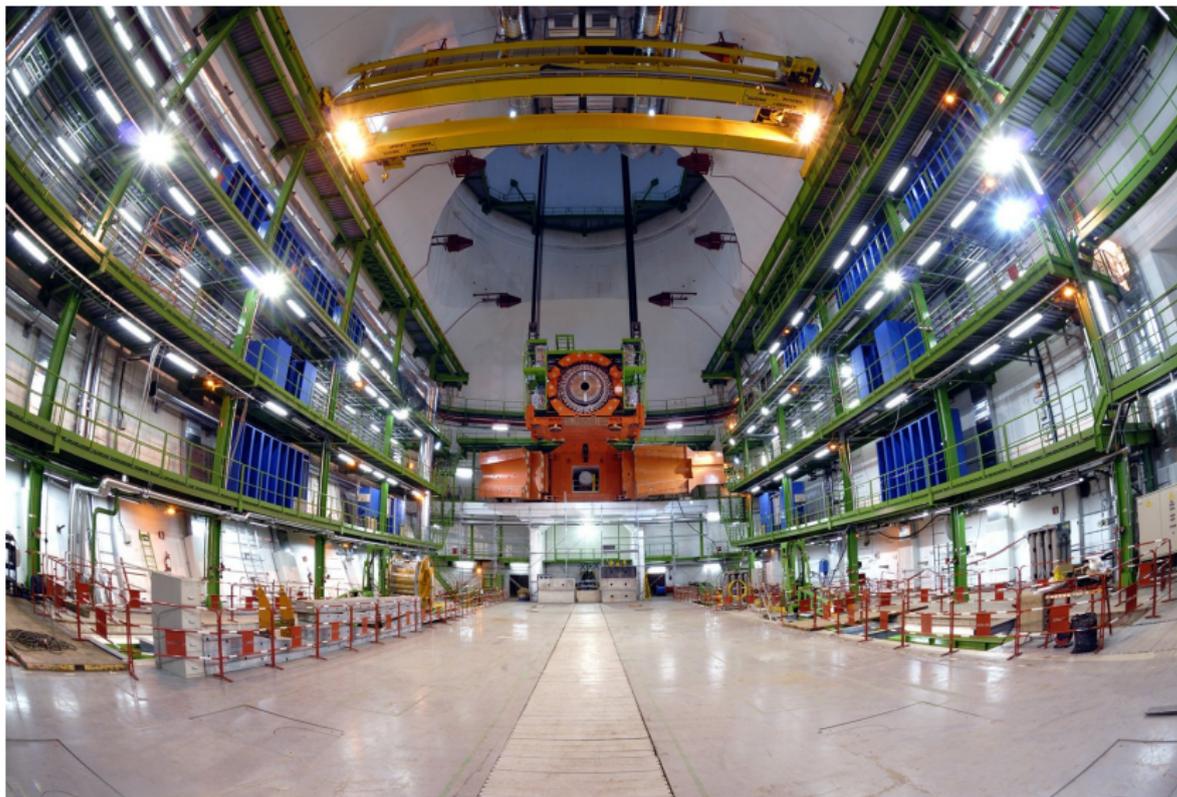
Together with CMS: The fastest and biggest digital camera on earth:



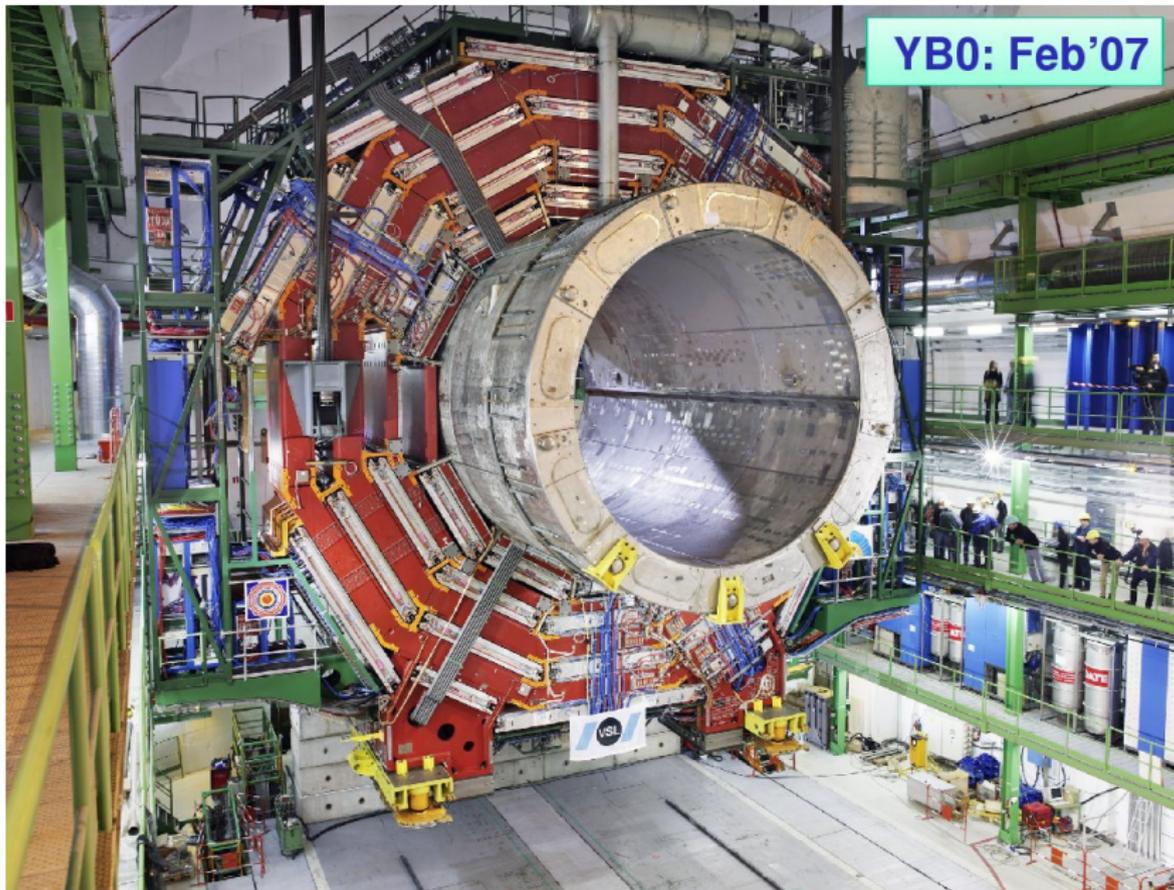
40 Millionen Pictures per second!

Data stream corresponds to 250 000 DVDs per second

Setting up the experiments



Setting up the experiments

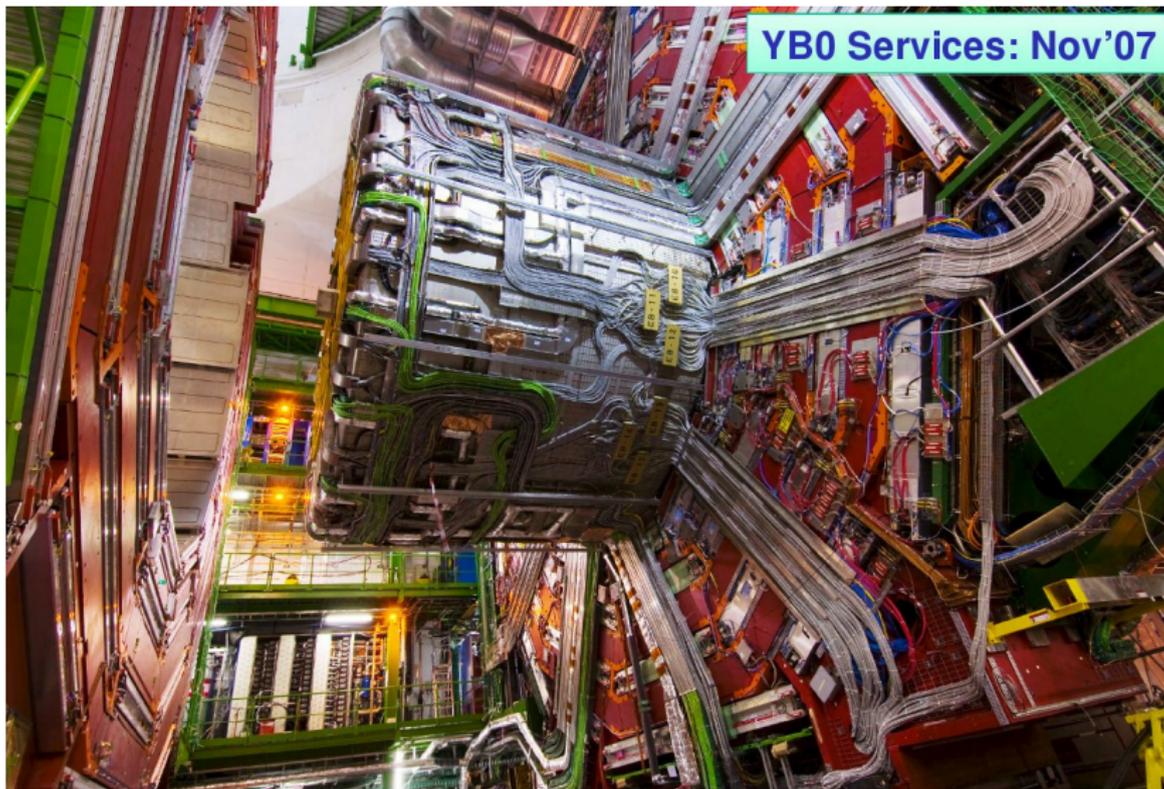


YB0: Feb'07

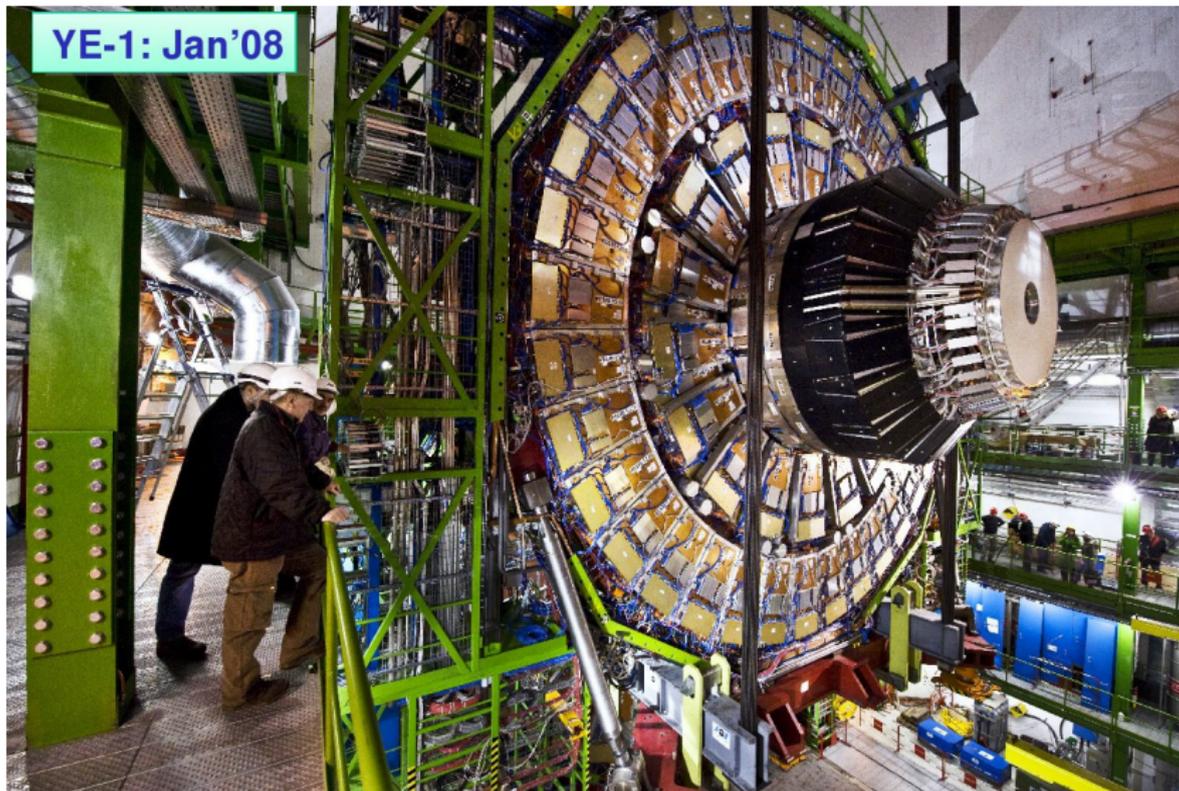


Setting up the experiments

YB0 Services: Nov'07



Setting up the experiments

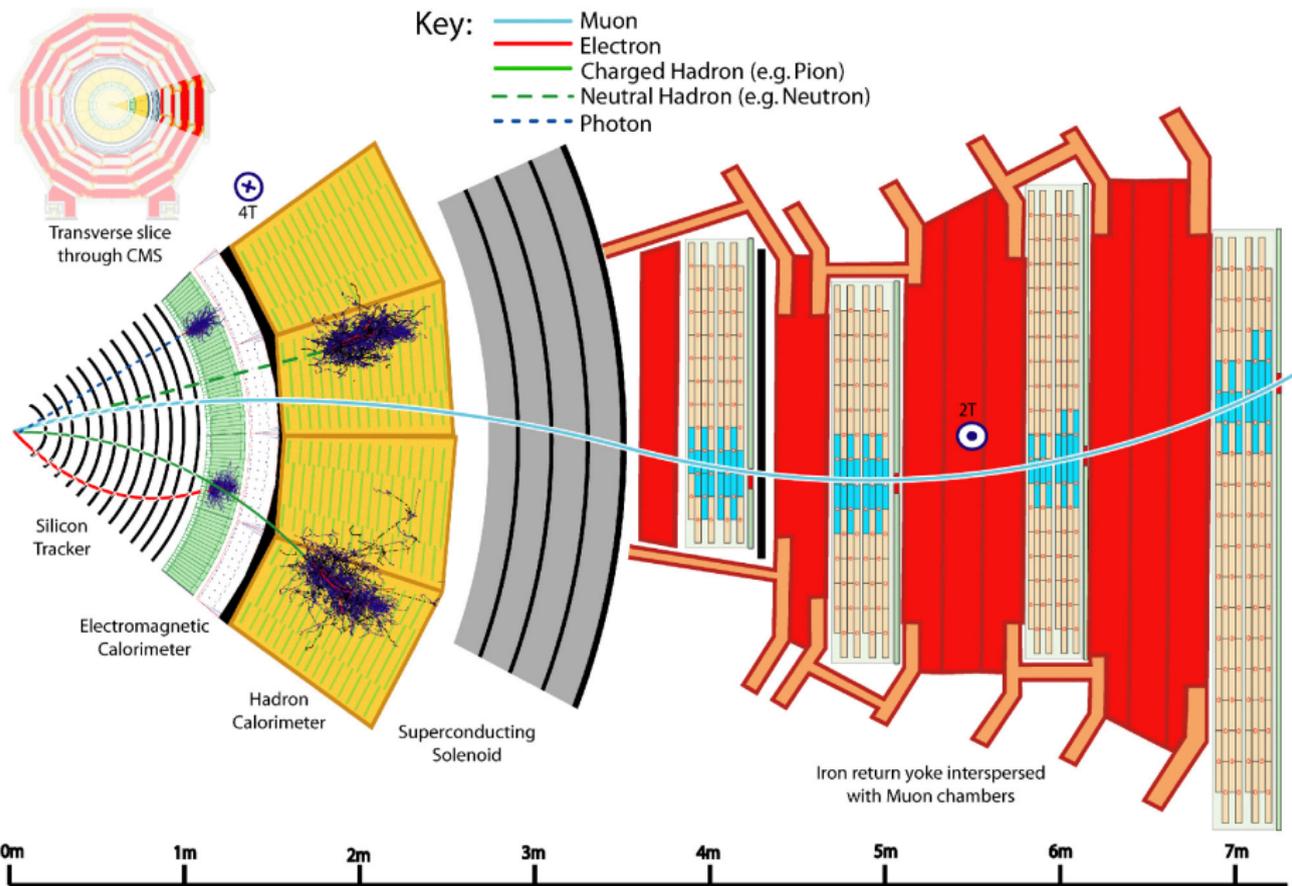


Setting up the experiments

3rd September



Let's have a detailed look



What do we need to measure?

- From where do all the particles come? → **Vertex Detector**
- Are there secondary decays (e.g. $B^0 \rightarrow W^- c + X$)?
→ **Vertex Detector**
- Where do all the particles point to?
→ **Vertex Detector, Tracking Detector**
- What are all the momenta of the charged particles ($r = p/(eB)$)?
→ **Tracking Detector, Magnetic Field**
- What is the energy of all particles? → **Calorimeters**
- Identify the particles → **all detectors!**
 - π^\pm, K^\pm, e : e.g. dE/dx in **Tracking Detector**
 - π^\pm, e : **Fraction of energy in the beginning and the end of the calorimeter**
 - μ : Muon System outside of the calorimeters
 - D, B, \dots : **Vertex Detector**
 - ...

- 1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung
- 2 Kosmische Strahlung
 - Erste Beobachtungen
 - Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
 - Eigenschaften der kosmischen Strahlung
 - Experimente für kosmische Strahlung
- 3 Teilchenphysikdetektoren
- 4 Das Higgs-Boson**
- 5 Das Higgs-Boson am LHC

Was ist Masse

$$E = m$$

Was ist Masse

$$E = mc^2$$

Was ist Masse

- Masse ist gespeicherte Energie

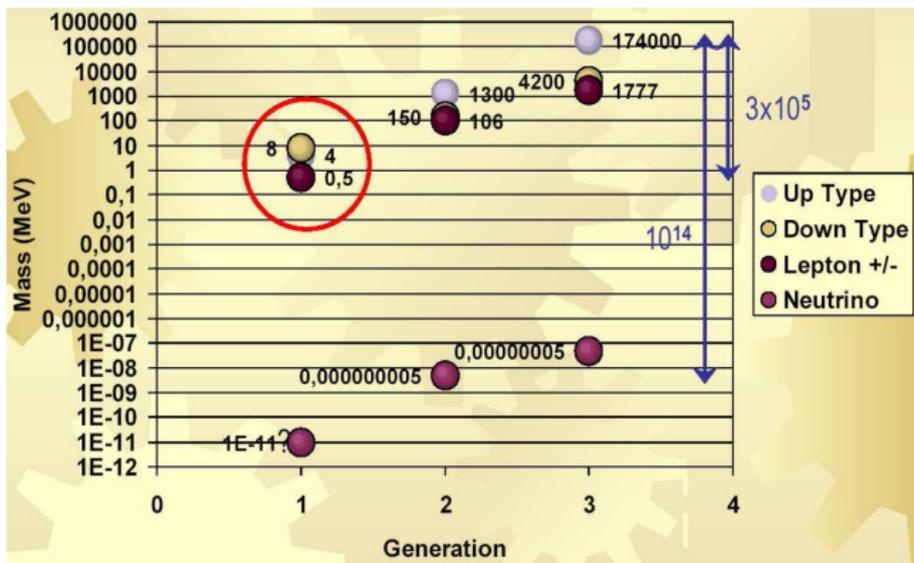


In einer Wechselwirkung



In Bewegungsenergie

Die Masse der Bausteine der Materie



- Wiederum ein geordnetes Muster
- Es ist extrem wichtig, daß dieses Muster so aussieht!

Der Higgs-Mechanismus

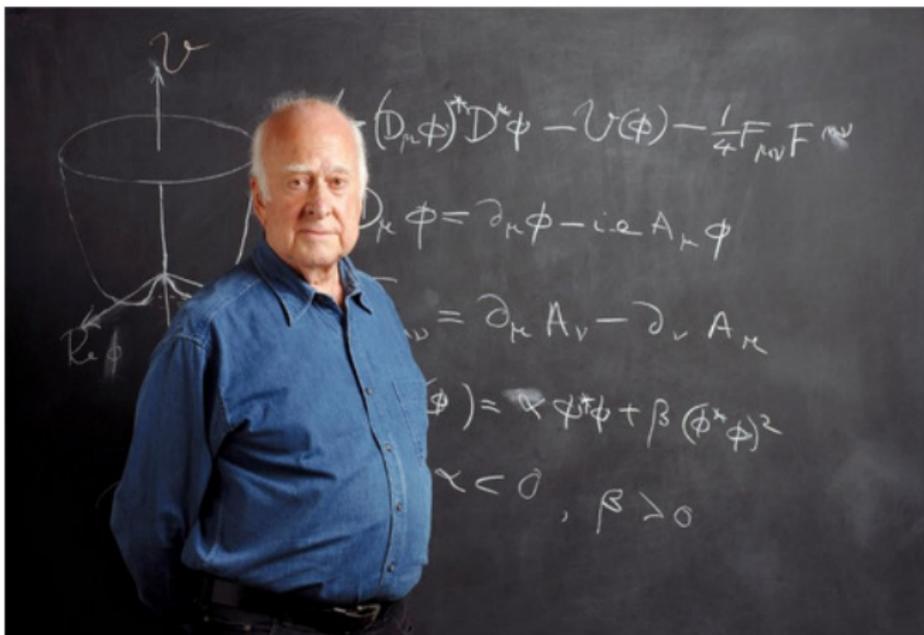
- Wir haben noch nicht viel **direkte** experimentelle Information darüber, wie die Masse der elementaren Teilchen erzeugt wird
- Aber sehr viel indirekte Information aus der Struktur der beobachteten Wechselwirkungen
- Und wir haben eine schöne Theorie: Der Higgs-Mechanismus

Die Erfinder des Higgs-Mechanismus



Kibble, Guralnik, Hagen, Englert, Brout

Die Erfinder des Higgs-Mechanismus



Peter Higgs

Der Higgs-Mechanismus



Der Higgs-Mechanismus

- Eigentlich verlangt die **Symmetrie**, daß alle Teilchen masselos sind!
- Das steht aber im Widerspruch zu unseren Experimenten! Die Teilchen haben Masse!
- **Masse** eines Teilchens: **Energie**, die in seiner Wechselwirkung mit dem **Higgs** gespeichert ist

Der Higgs-Mechanismus

- Eigentlich verlangt die **Symmetrie**, daß alle Teilchen masselos sind!
- Das steht aber im Widerspruch zu unseren Experimenten! Die Teilchen haben Masse!
- **Masse** eines Teilchens: **Energie**, die in seiner Wechselwirkung mit dem **Higgs** gespeichert ist



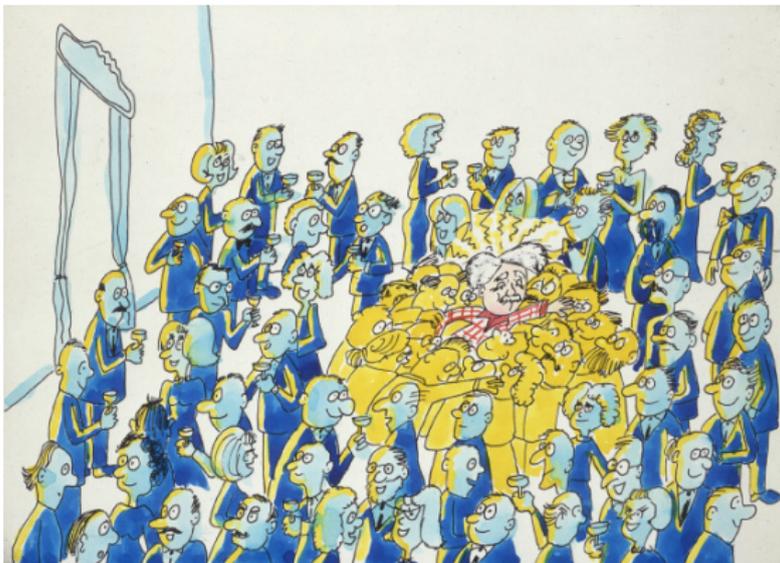
Der Higgs-Mechanismus

- Eigentlich verlangt die **Symmetrie**, daß alle Teilchen masselos sind!
- Das steht aber im Widerspruch zu unseren Experimenten! Die Teilchen haben Masse!
- **Masse** eines Teilchens: **Energie**, die in seiner Wechselwirkung mit dem **Higgs** gespeichert ist



Der Higgs-Mechanismus

- Eigentlich verlangt die **Symmetrie**, daß alle Teilchen masselos sind!
- Das steht aber im Widerspruch zu unseren Experimenten! Die Teilchen haben Masse!
- **Masse** eines Teilchens: **Energie**, die in seiner Wechselwirkung mit dem **Higgs** gespeichert ist



Das Higgs-Teilchen

- Experimentelle Überprüfung des Higgs-Mechanismus:
Finde das Higgs-Boson

Das Higgs-Teilchen

- Experimentelle Überprüfung des Higgs-Mechanismus:
Finde das Higgs-Boson



Das Higgs-Teilchen

- Experimentelle Überprüfung des Higgs-Mechanismus:
Finde das Higgs-Boson



Das Higgs-Teilchen

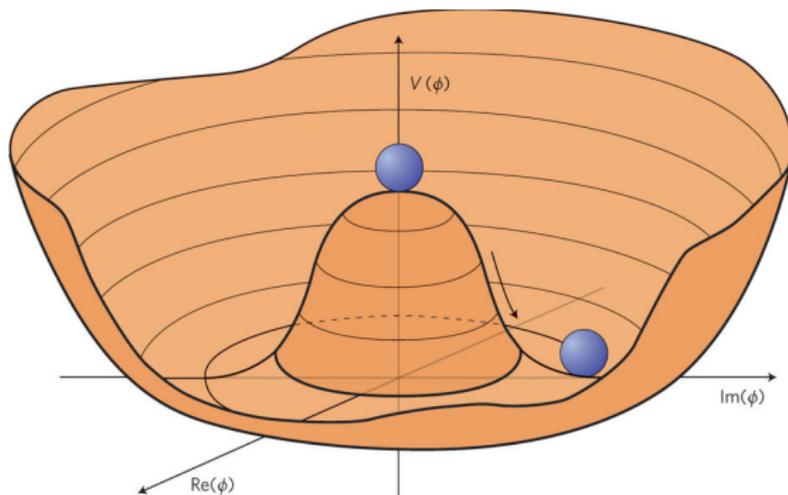
- Wenn die Party leer ist, haben alle Teilchen keine Masse!

Das Higgs-Teilchen

- Wenn die Party leer ist, haben alle Teilchen keine Masse!
- Kann nicht sein . . .

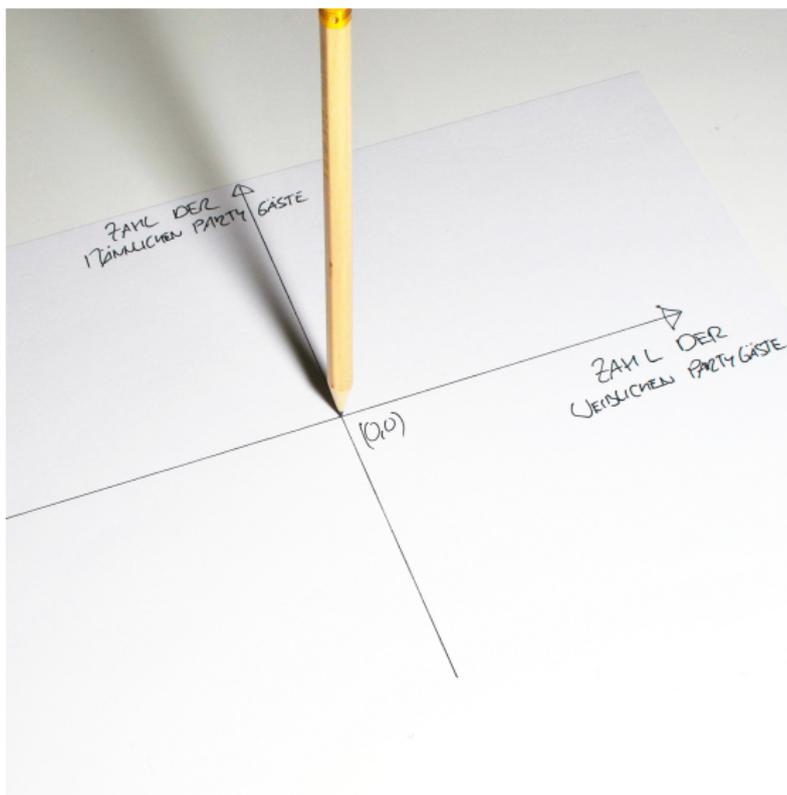
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



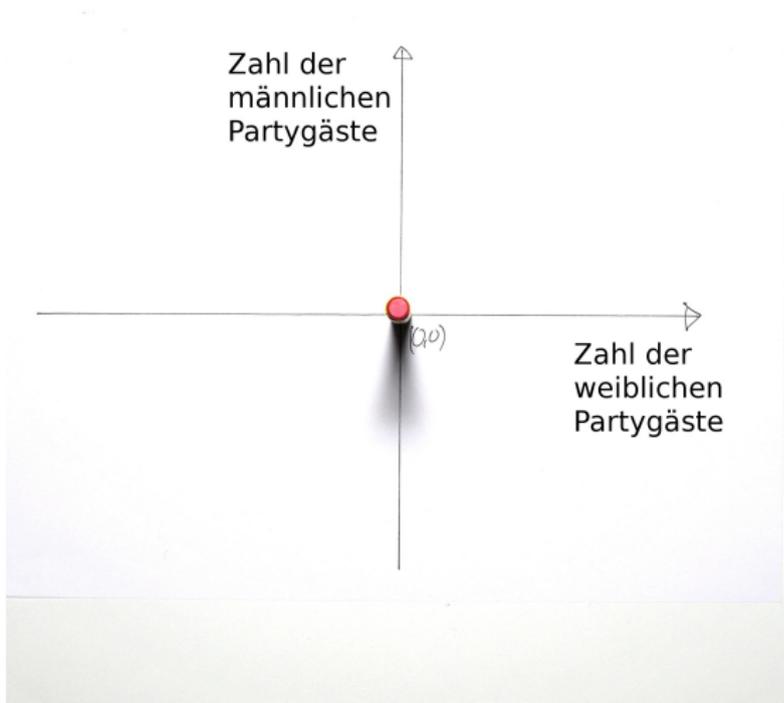
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



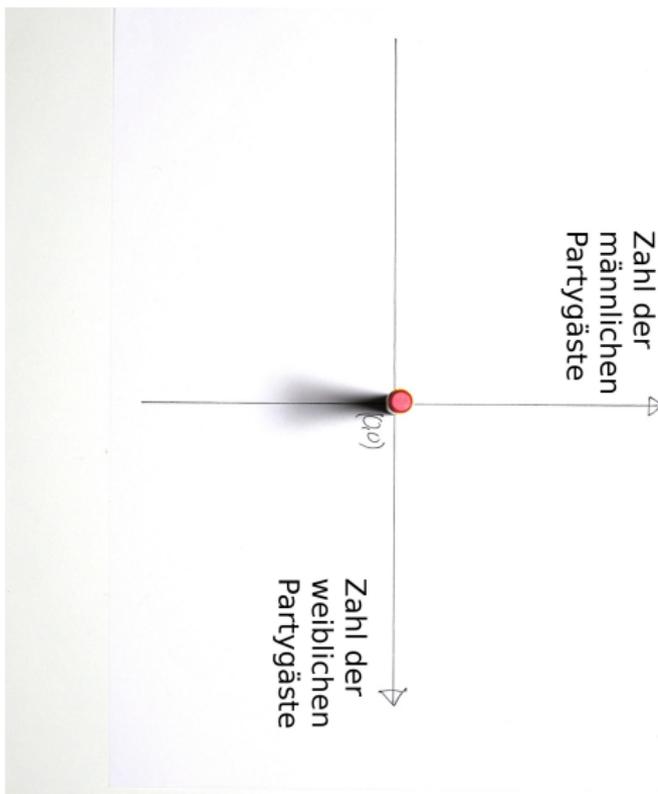
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



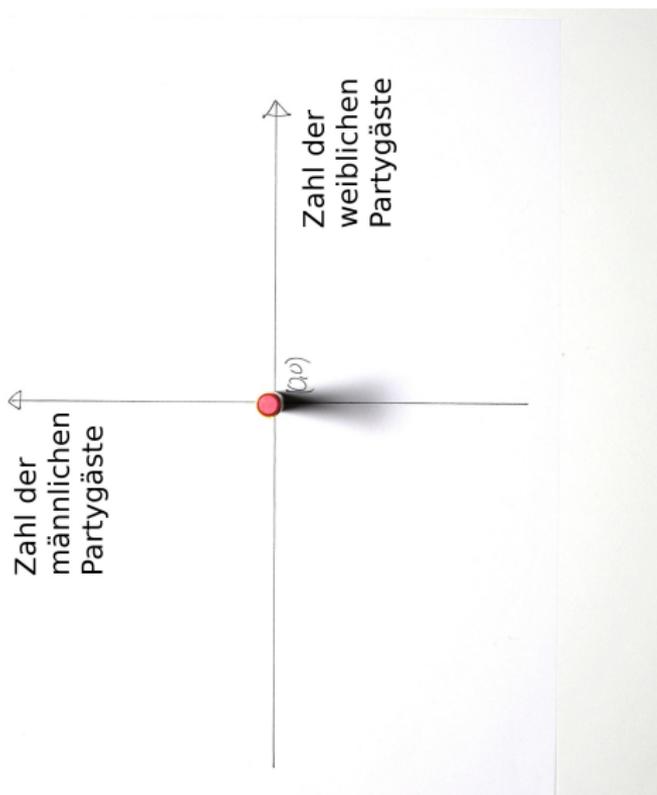
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



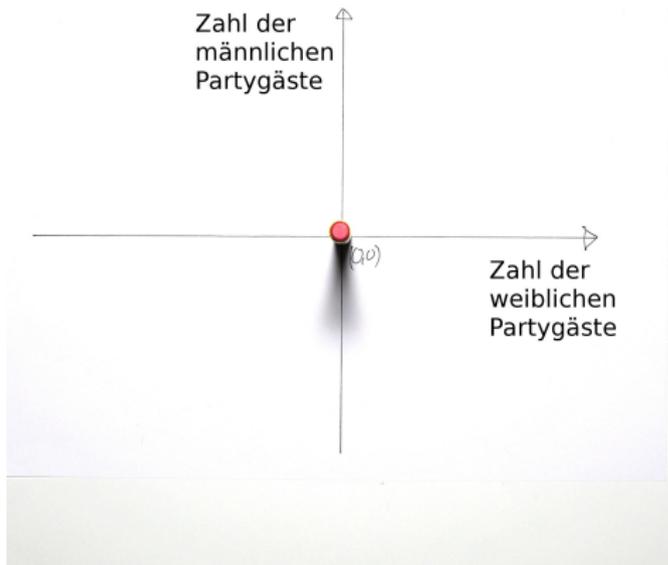
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



Der Higgs-Mechanismus

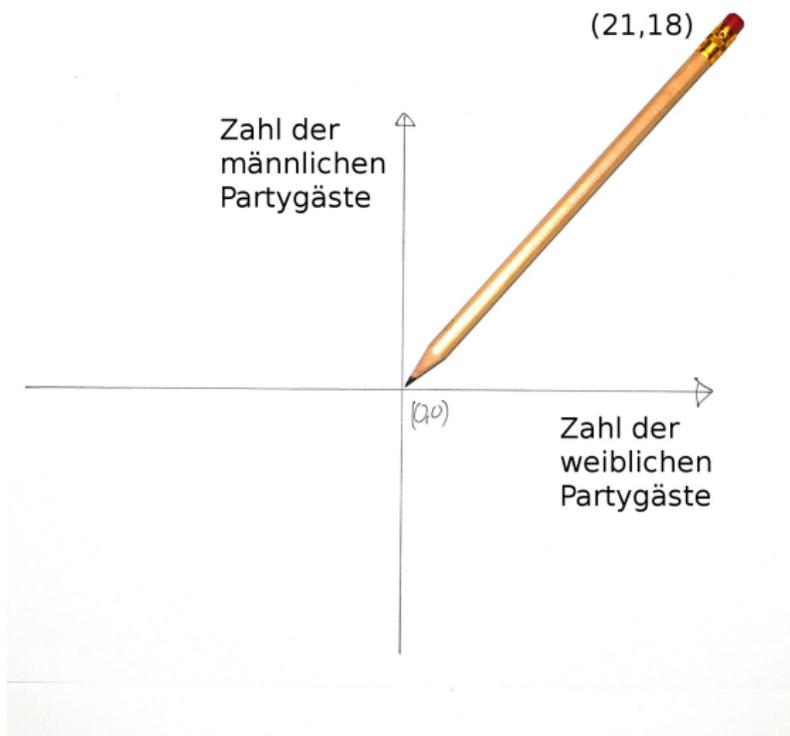
Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



Der **instabile** Ausgangszustand erfüllt die Symmetrie, aber es ist niemand auf der Party!

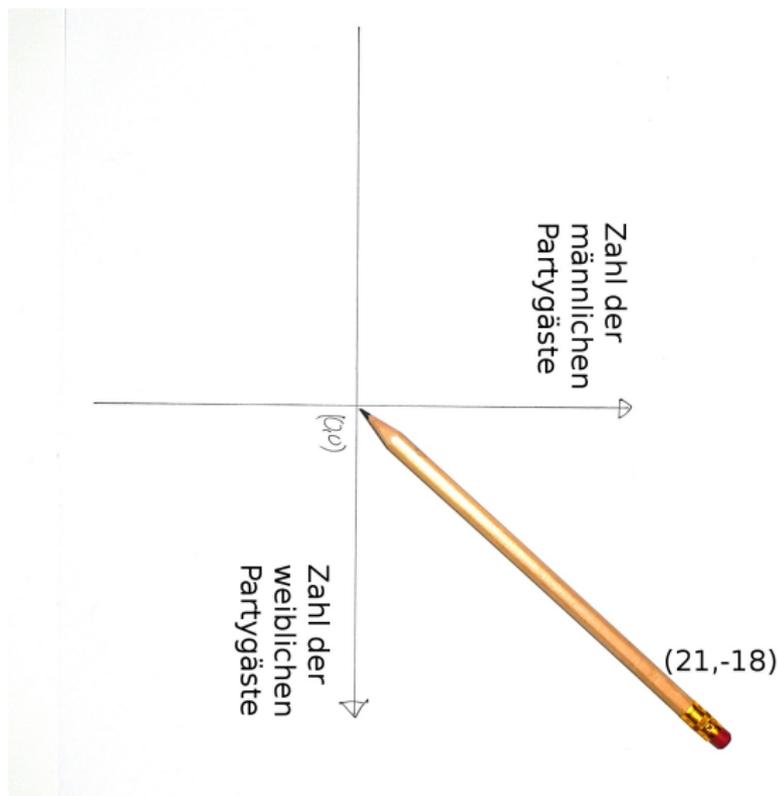
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



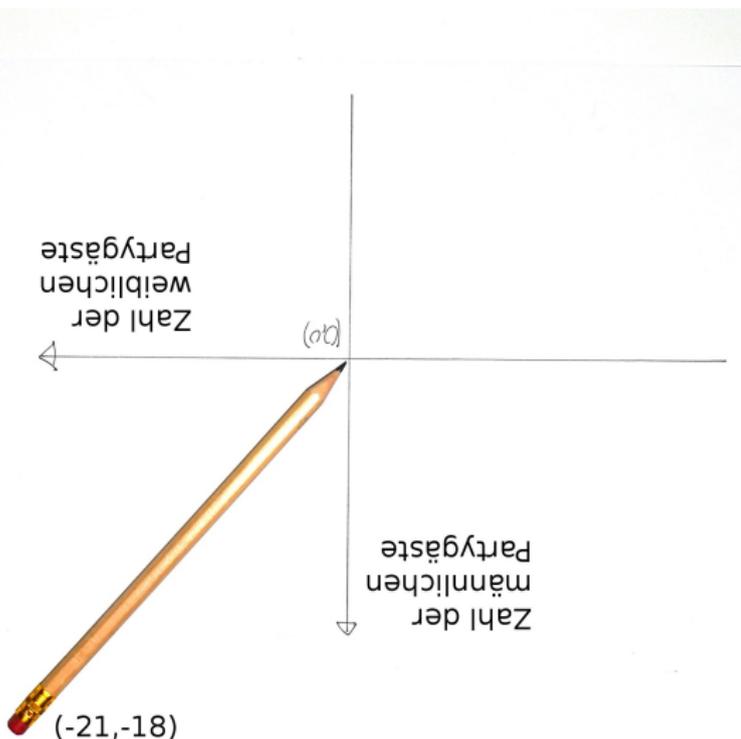
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



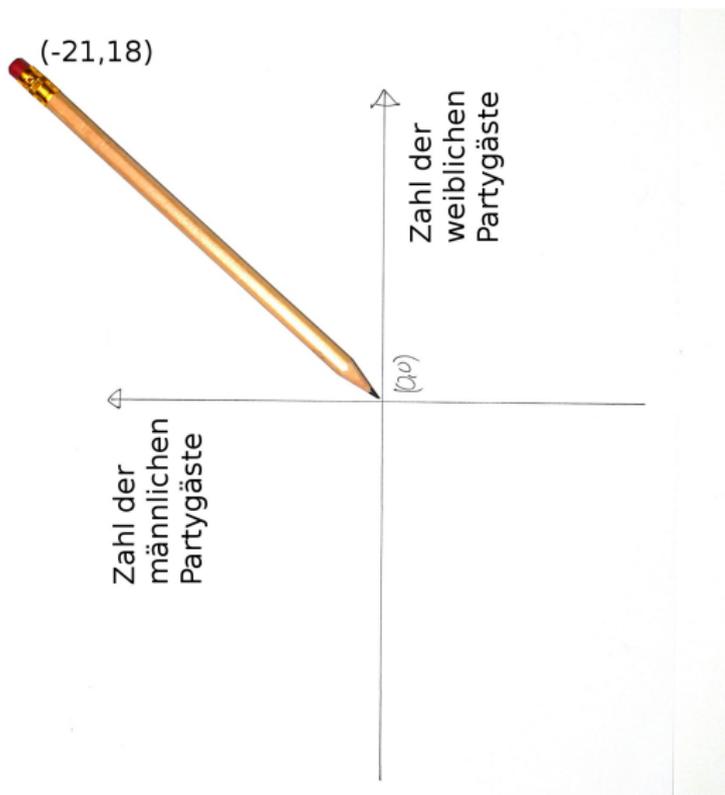
Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



Der Higgs-Mechanismus

Warum ist die Cocktail-Party eigentlich voller Leute?



Der Higgs-Mechanismus

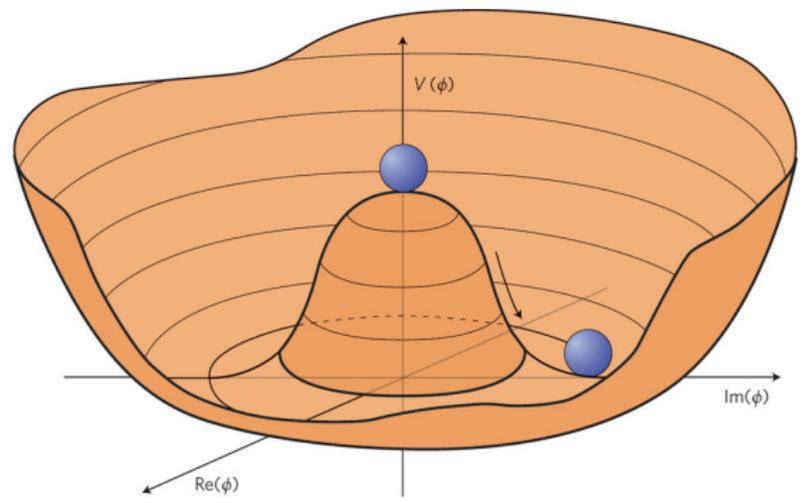
Darum ist die Cocktail-Party immer voller Leute!



Der **stabile** Grundzustand verletzt die Symmetrie *spontan*, ohne daß die Theorie die Symmetrie verletzt! Und er füllt die Party!

Der Higgs-Mechanismus

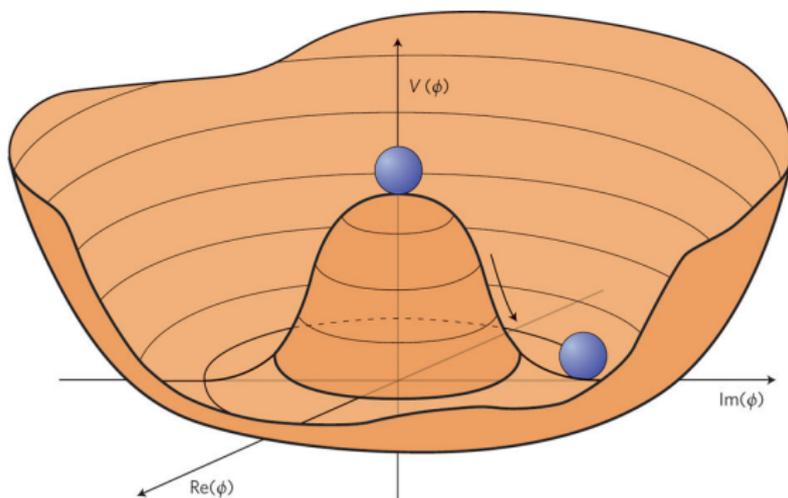
Darum ist die Cocktail-Party immer voller Leute!



Das nennt man "Spontane Symmetriebrechung". Dies ist der Schlüssel zur gesamten Struktur der Materie und ihrer Wechselwirkungen!

Der Higgs-Mechanismus

Darum ist die Cocktail-Party immer voller Leute!



Das nennt man “Spontane Symmetriebrechung”. Dies ist der Schlüssel zur gesamten Struktur der Materie und ihrer Wechselwirkungen!

Wir postulieren die Symmetrien und die Spontane Symmetriebrechung, und erklären damit die Struktur der Wechselwirkungen des Standardmodells.

Aber wodurch erklärt sich die spontane Symmetriebrechung?

Wechselwirkungsstärke und Massen

Die genaue Überprüfung des Higgs-Mechanismus

Nur ein Beispiel aus vielen Möglichkeiten: Beim Higgs-Mechanismus...



... bestimmt die „Berühmtheit“ g des Teilchens seine Masse:

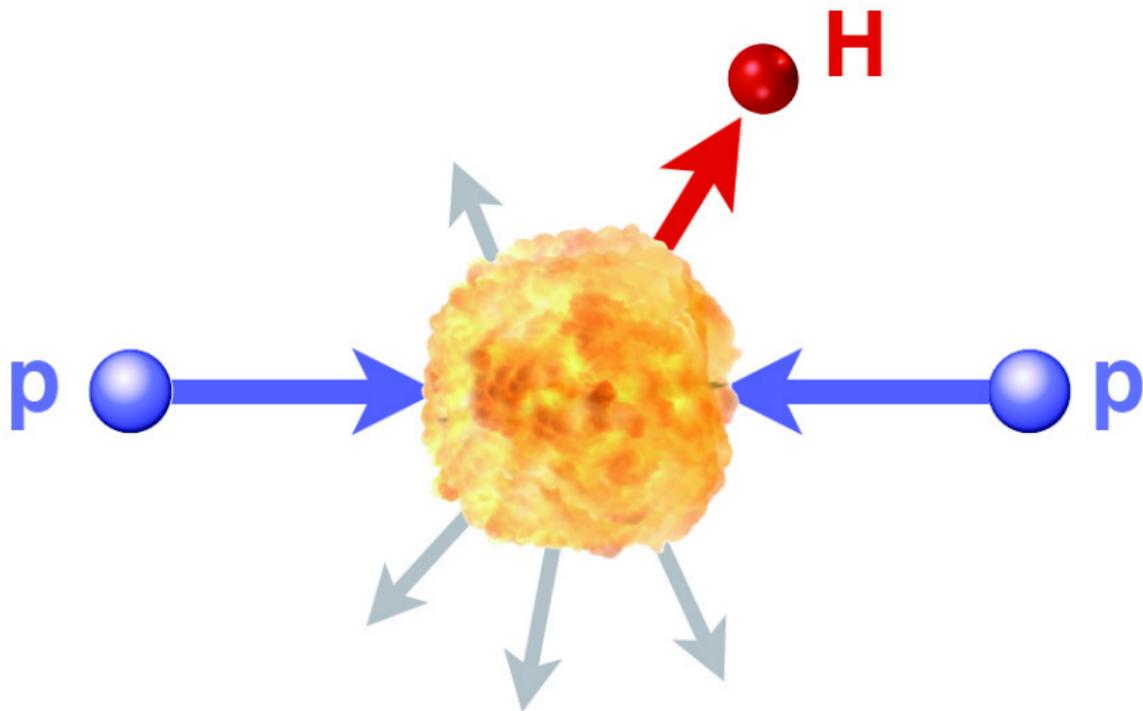
$$h \begin{matrix} \gamma \\ \leftarrow \left\{ g_{h\gamma\gamma} \right. \\ \gamma \end{matrix}$$

$$h \begin{matrix} Z^{0*}, W^{\mp*} \\ \leftarrow \left\{ g_{hZZ^*}, g_{hWW^*} \right. \\ Z^0, W^{\pm} \end{matrix}$$

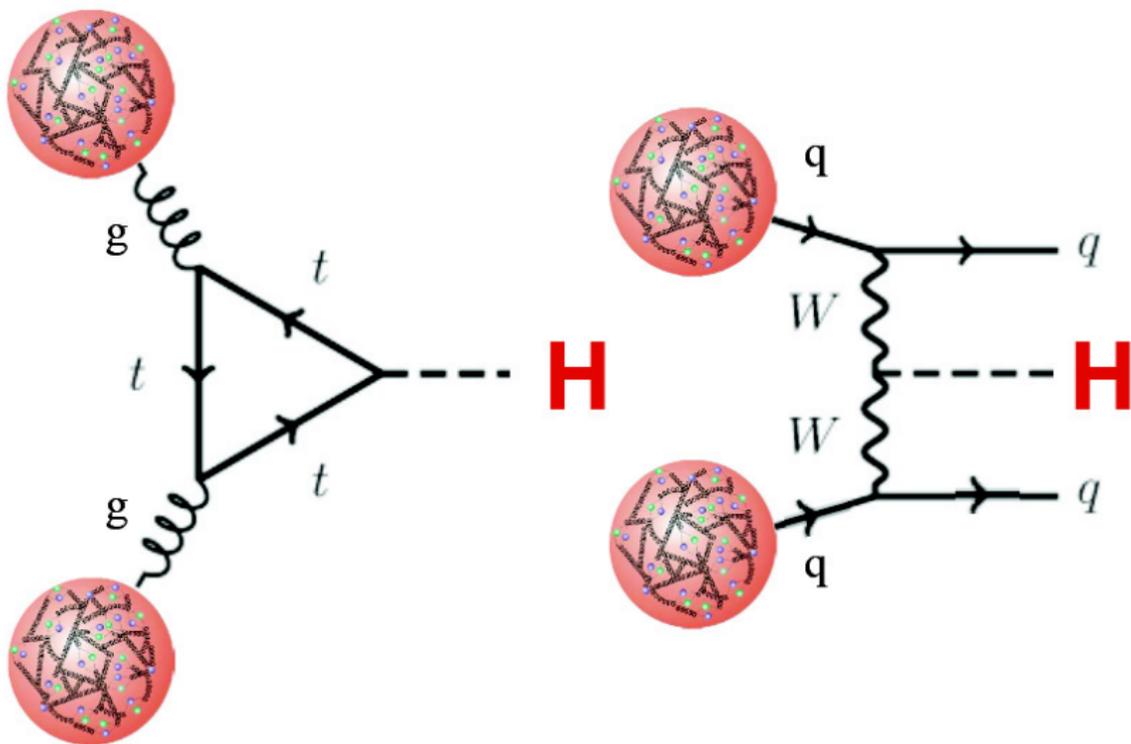
$$h \begin{matrix} \tau^{\mp}, \bar{b} \\ \leftarrow \left\{ g_{h\tau\tau}, g_{hb\bar{b}} \right. \\ \tau^{\pm}, b \end{matrix}$$

- 1 Die Suche nach Ordnung und ihrer Erklärung
- 2 Kosmische Strahlung
 - Erste Beobachtungen
 - Messung der kosmischen Strahlung mit modernen Detektoren
 - Eigenschaften der kosmischen Strahlung
 - Experimente für kosmische Strahlung
- 3 Teilchenphysikdetektoren
- 4 Das Higgs-Boson
- 5 Das Higgs-Boson am LHC**

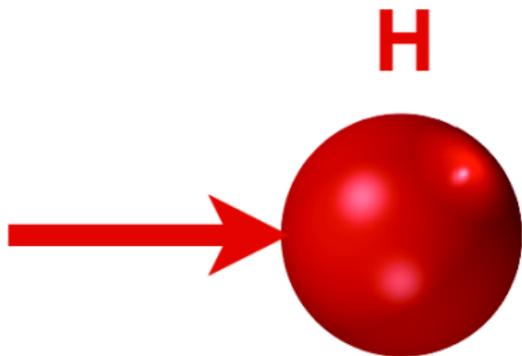
Wie erzeugt man ein Higgs-Teilchen?



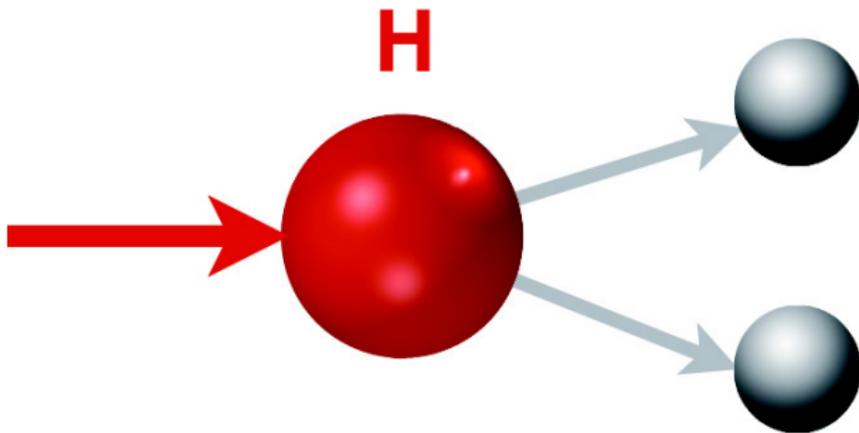
Wie erzeugt man ein Higgs-Teilchen genauer?



Wie beobachtet man ein Higgs-Teilchen?

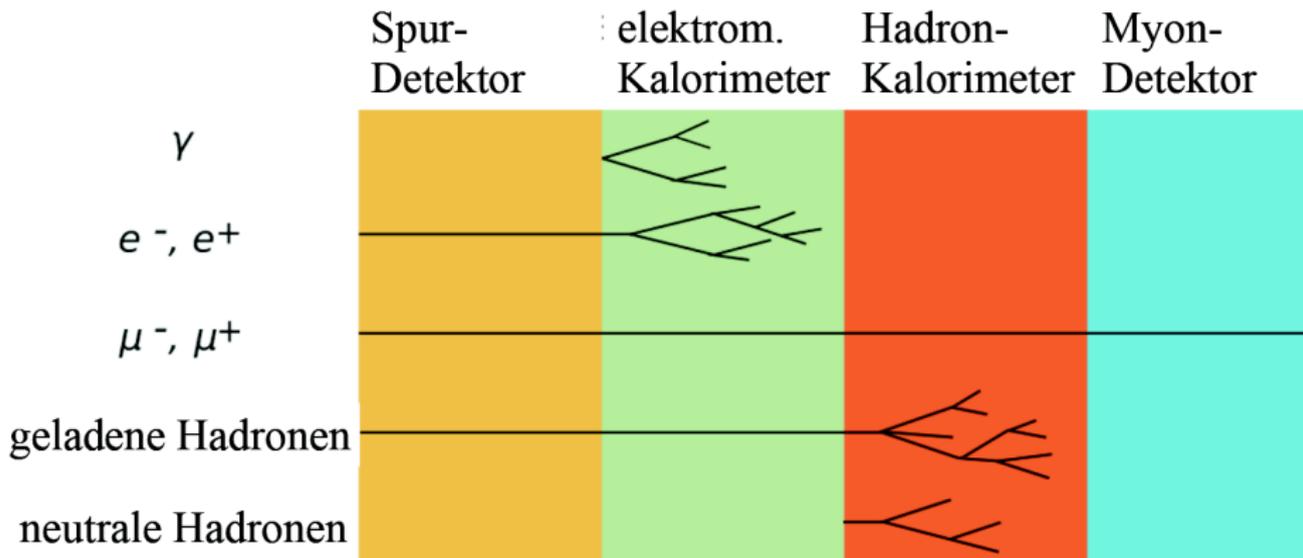


Wie beobachtet man ein Higgs-Teilchen?



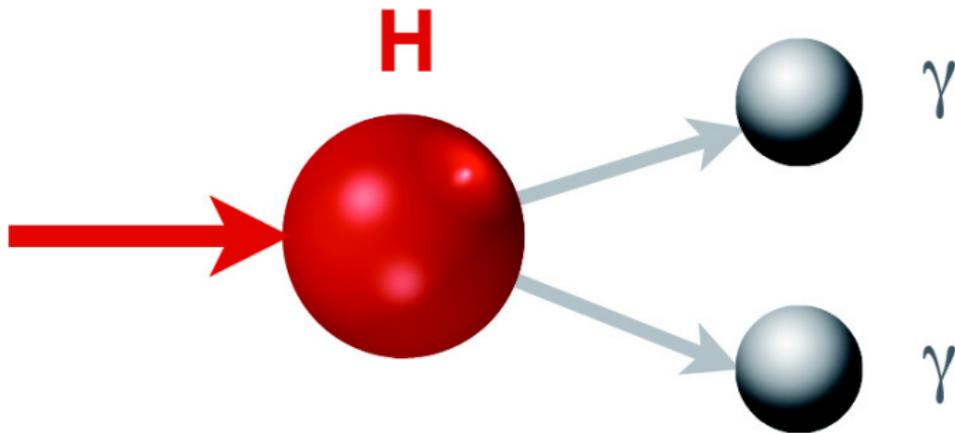
Teilchensignaturen im Detektor

- Jedes Teilchen hinterläßt eine eindeutige Signatur im Detektor:

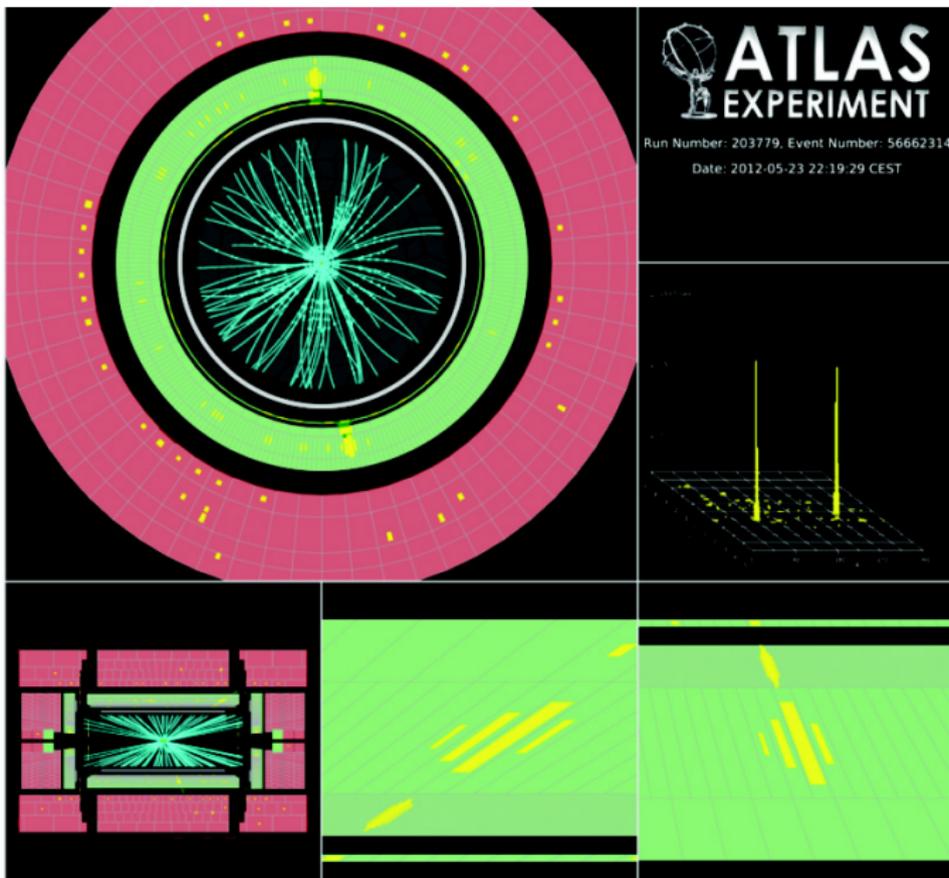


Beispiel: Der Higgs-Zerfall in zwei Photonen

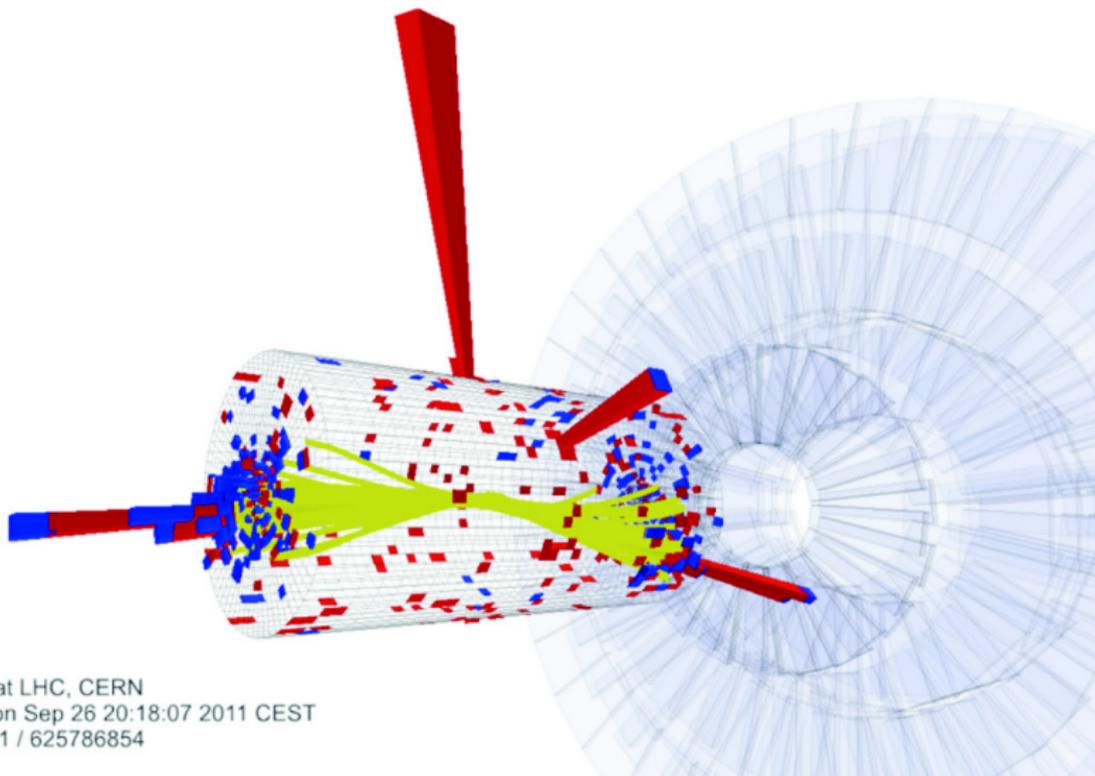
Beispiel 1:



Beispielereignis aus dem ATLAS-Experiment

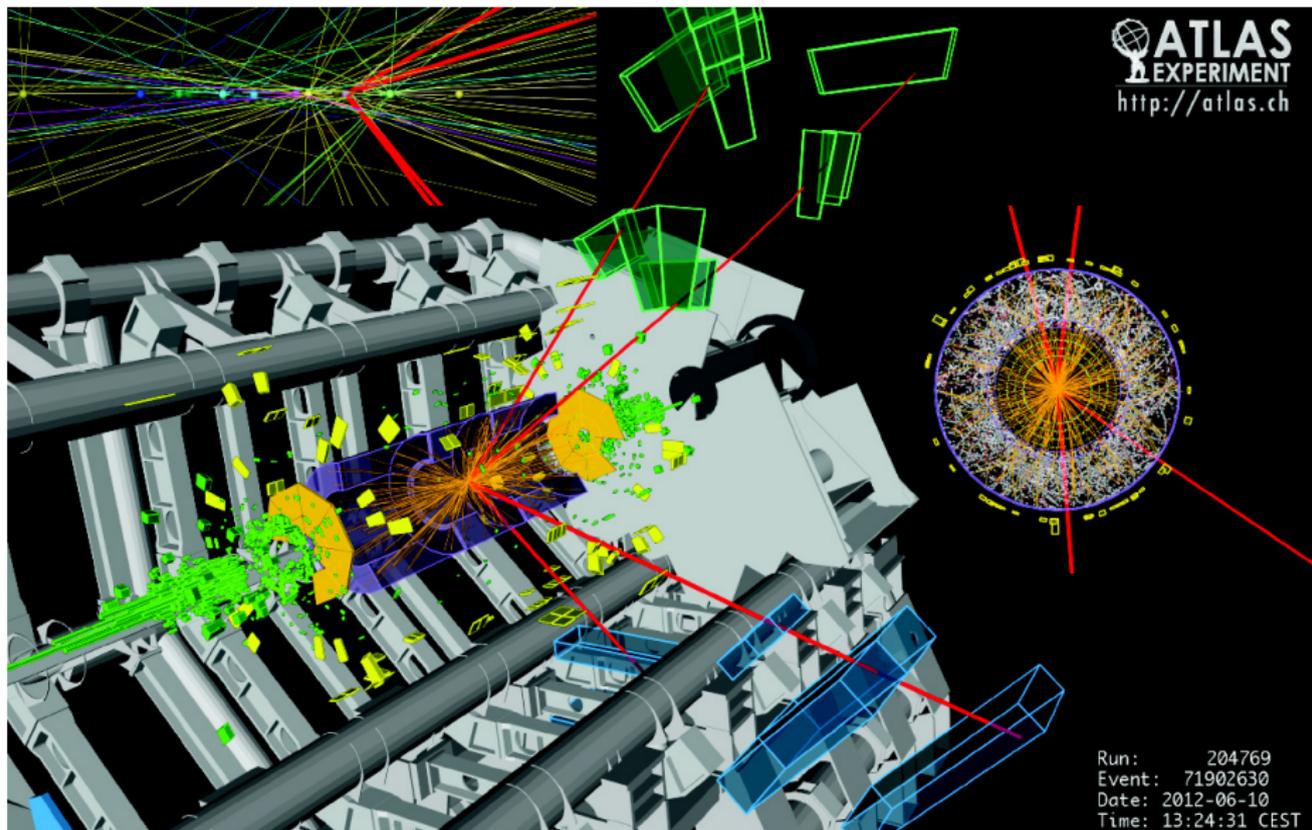


Beispielereignis aus dem CMS-Experiment

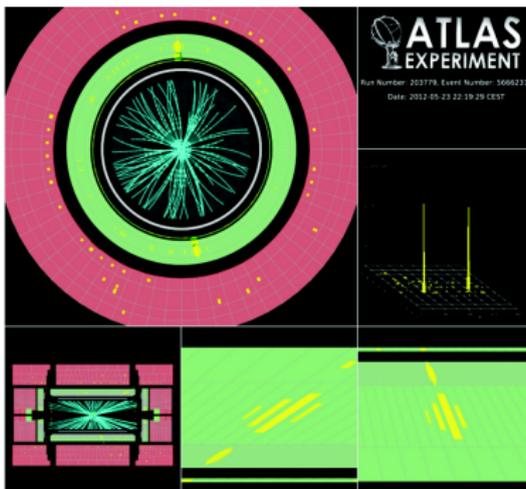


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST
Run/Event: 177201 / 625786854
Lumi section: 450

Es gibt auch noch andere Higgs-Zerfälle:

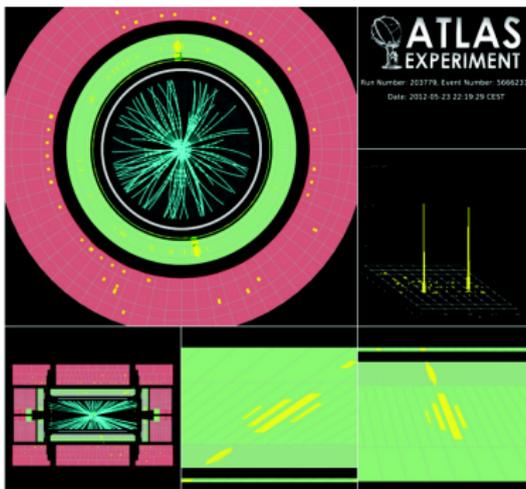


Woher wissen wir, dass da ein neues Teilchen ist?



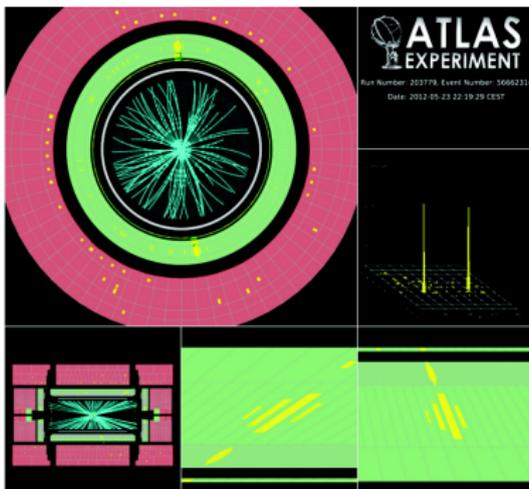
- Ist dieses eine Ereignis nun schon die Entdeckung eines neuen Teilchens?

Woher wissen wir, dass da ein neues Teilchen ist?



- Ist dieses eine Ereignis nun schon die Entdeckung eines neuen Teilchens?
- Nein, es gibt andere Prozesse, die auch Ereignisse mit 2 Photonen produzieren

Woher wissen wir, dass da ein neues Teilchen ist?



- Ist dieses eine Ereignis nun schon die Entdeckung eines neuen Teilchens?
- Nein, es gibt andere Prozesse, die auch Ereignisse mit 2 Photonen produzieren
- Und andere Teilchen, die im Detektor so aussehen können, wie Photonen

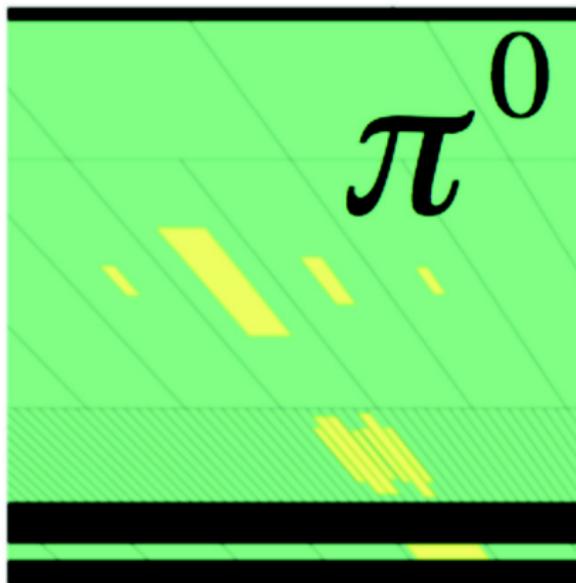
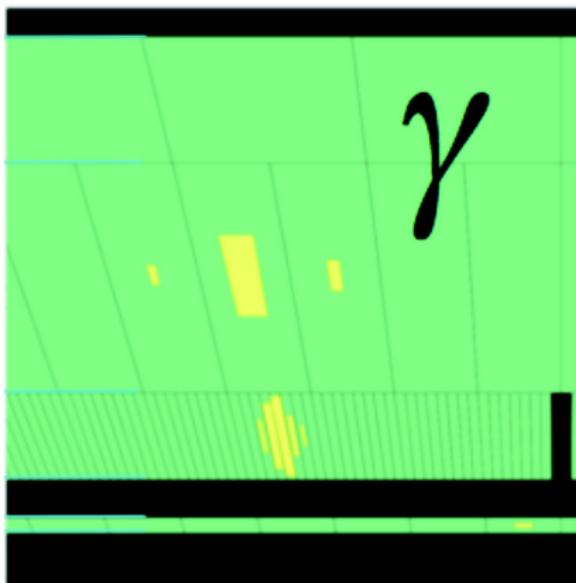
Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen



- Andere Ereignisse, in denen kein Higgs-Teilchen produziert wird, sind etwa 1 Milliarde mal häufiger!

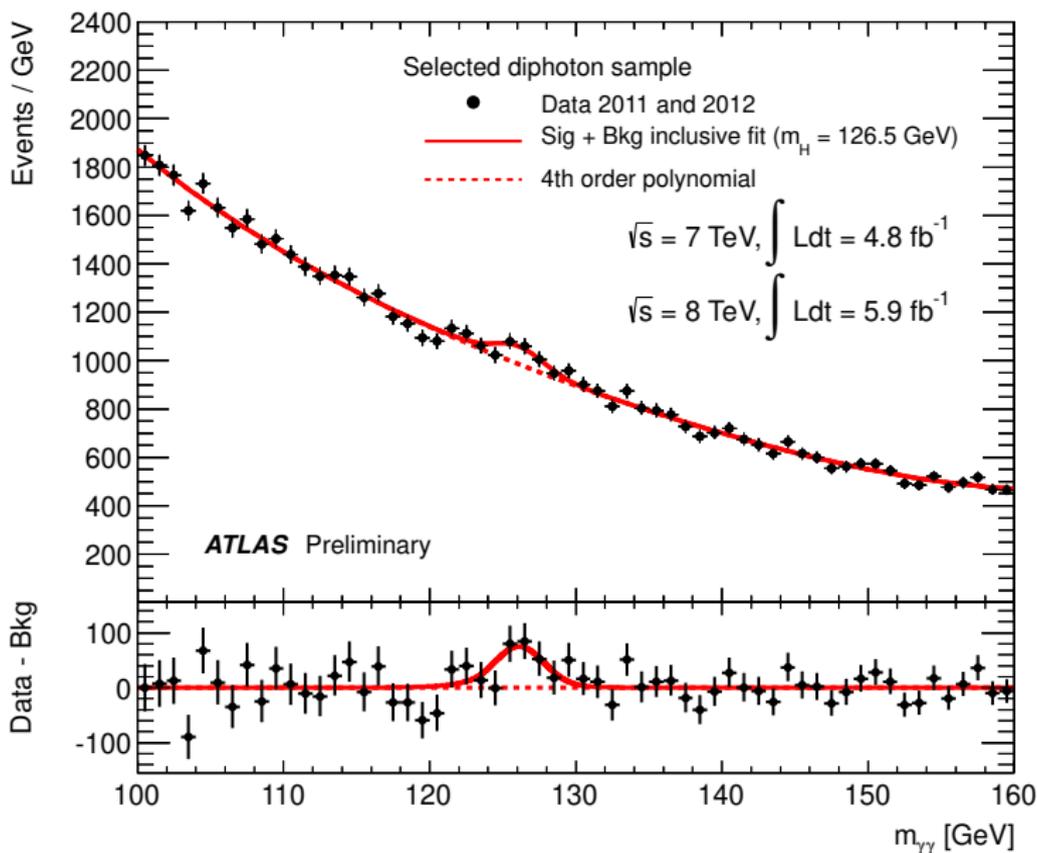
Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen

- Nicht alles, was aussieht wie ein Photon, ist auch eines!

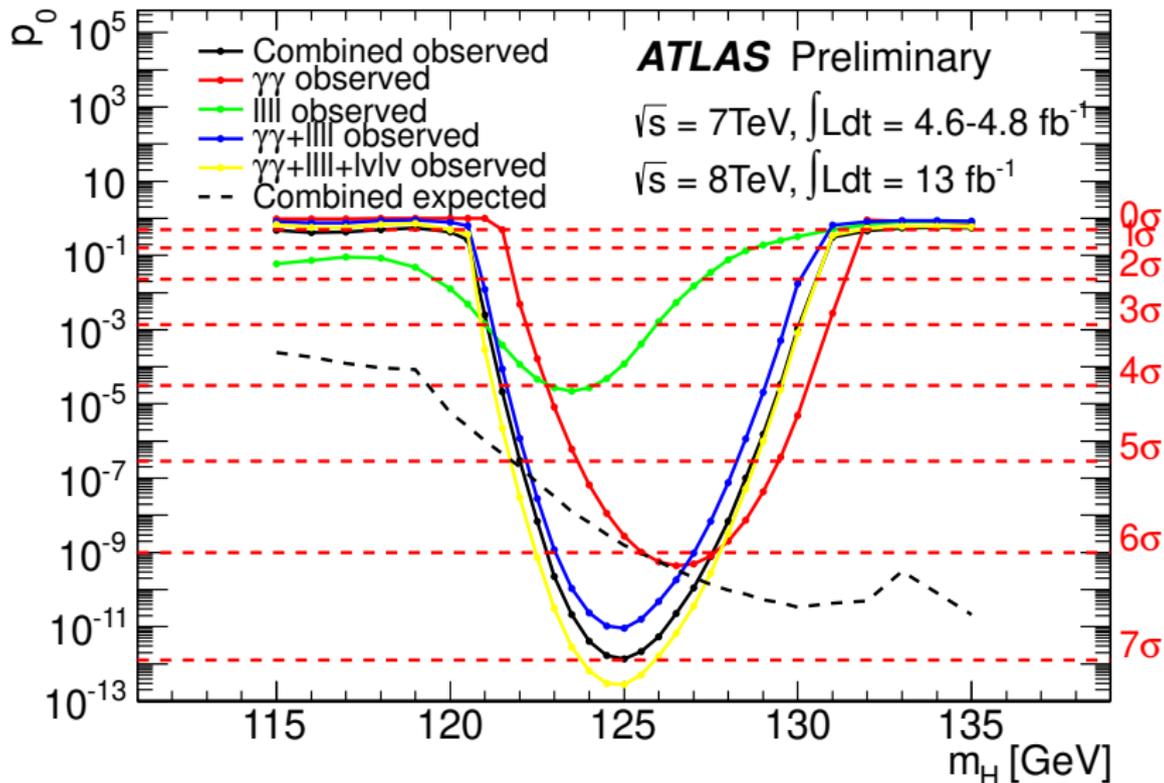


- Das Bild des Ereignisses, aufgenommen vom Detektor, muss sehr aufwändig analysiert werden!

Das Ergebnis



Wie sicher ist das etwas neues?



Wechselwirkungsstärke und Massen

Die genaue Überprüfung des Higgs-Mechanismus

Nur ein Beispiel aus vielen Möglichkeiten: Beim Higgs-Mechanismus...



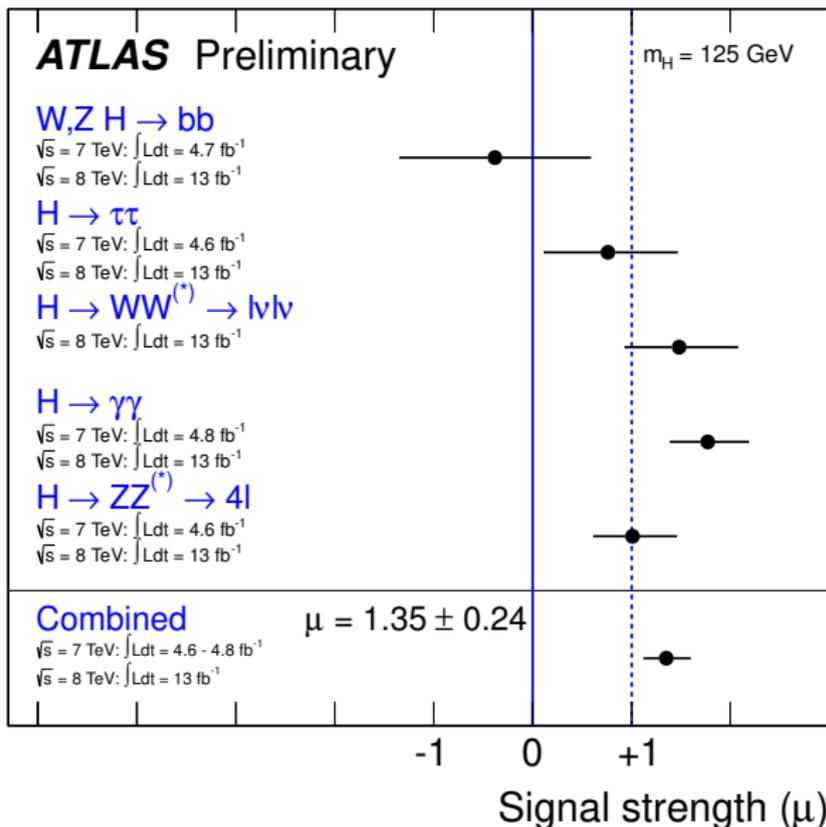
... bestimmt die „Berühmtheit“ g des Teilchens seine Masse:

$$h - \begin{matrix} \gamma \\ \left\{ g_{h\gamma\gamma} \right\} \\ \gamma \end{matrix}$$

$$h - \begin{matrix} Z^{0*}, W^{\mp*} \\ \left\{ g_{hZZ^*}, g_{hWW^*} \right\} \\ Z^0, W^{\pm} \end{matrix}$$

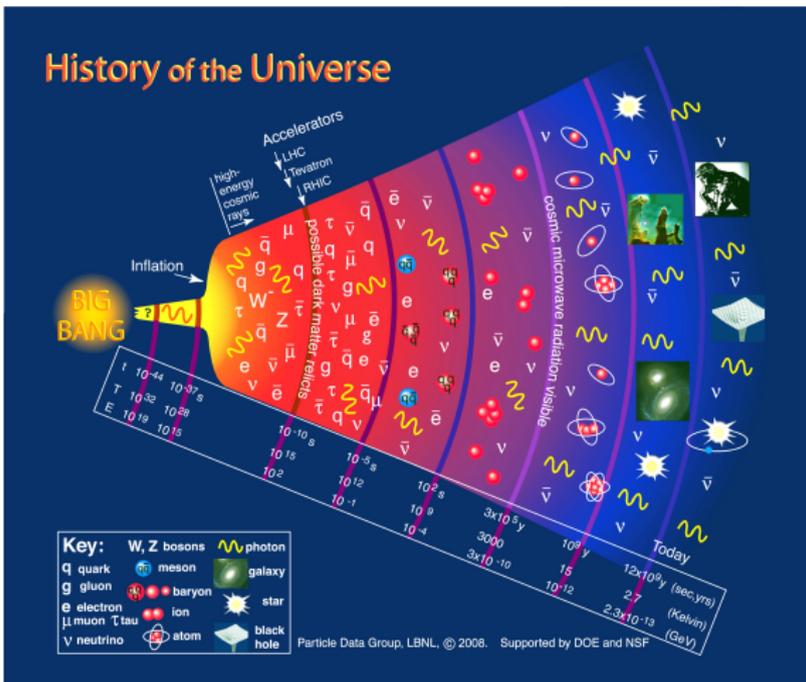
$$h - \begin{matrix} \tau^{\mp}, \bar{b} \\ \left\{ g_{h\tau\tau}, g_{hb\bar{b}} \right\} \\ \tau^{\pm}, b \end{matrix}$$

Wie überprüfen wir das?

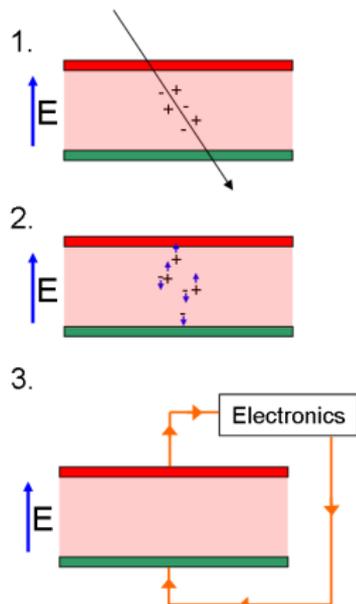
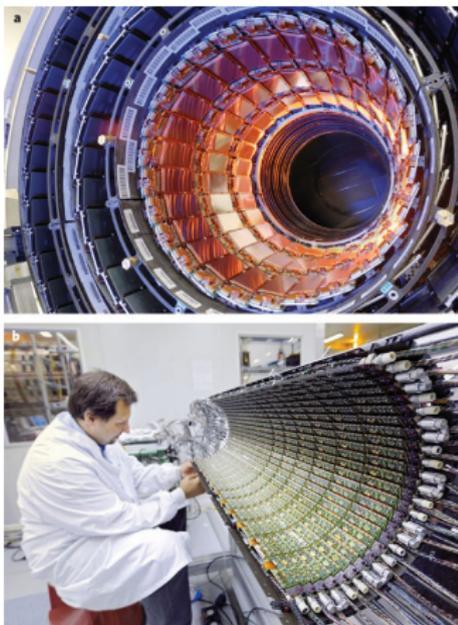


Wir sind Kinder unserer Neugier

- Unsere freie, nicht zielgerichtete Neugier, und unsere Fähigkeit zur Erfindung abstrakter Ideen zeichnet uns aus
- Und dies ermöglicht es uns, weit über uns hinaus zu wachsen

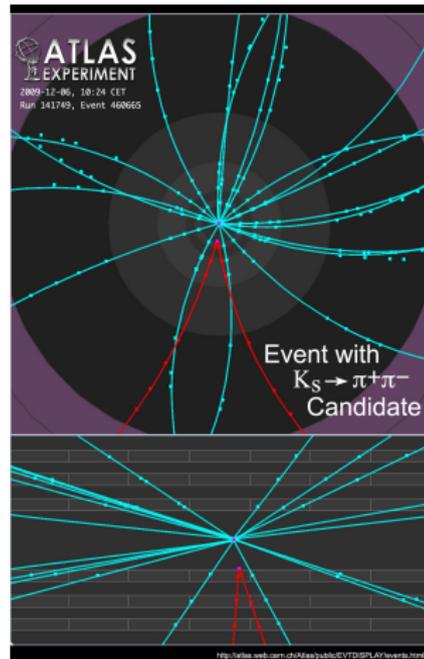
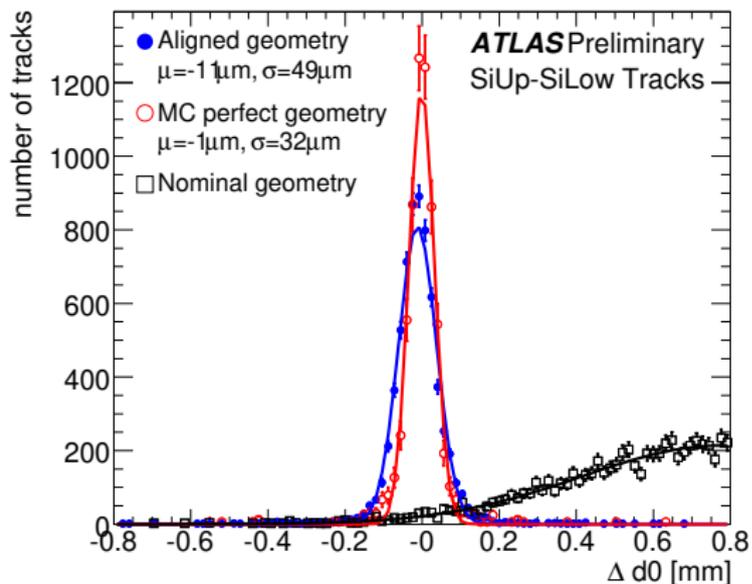


Vertexing and Tracking: Vertexing

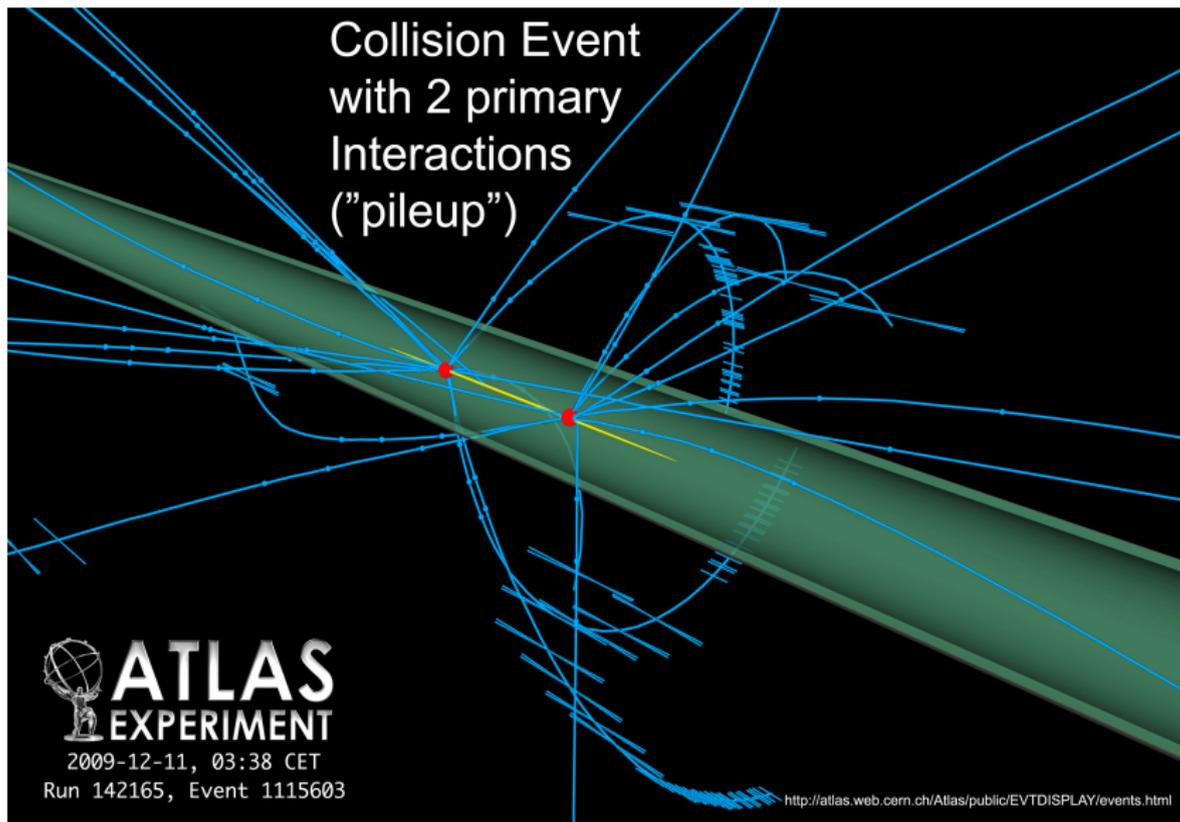


Extreme requirements: Radiation hard, extremely fast (timestamping within 25ns), readout of all channels at $> 100\text{kHz}$, high occupancies $> 10^{-4}$

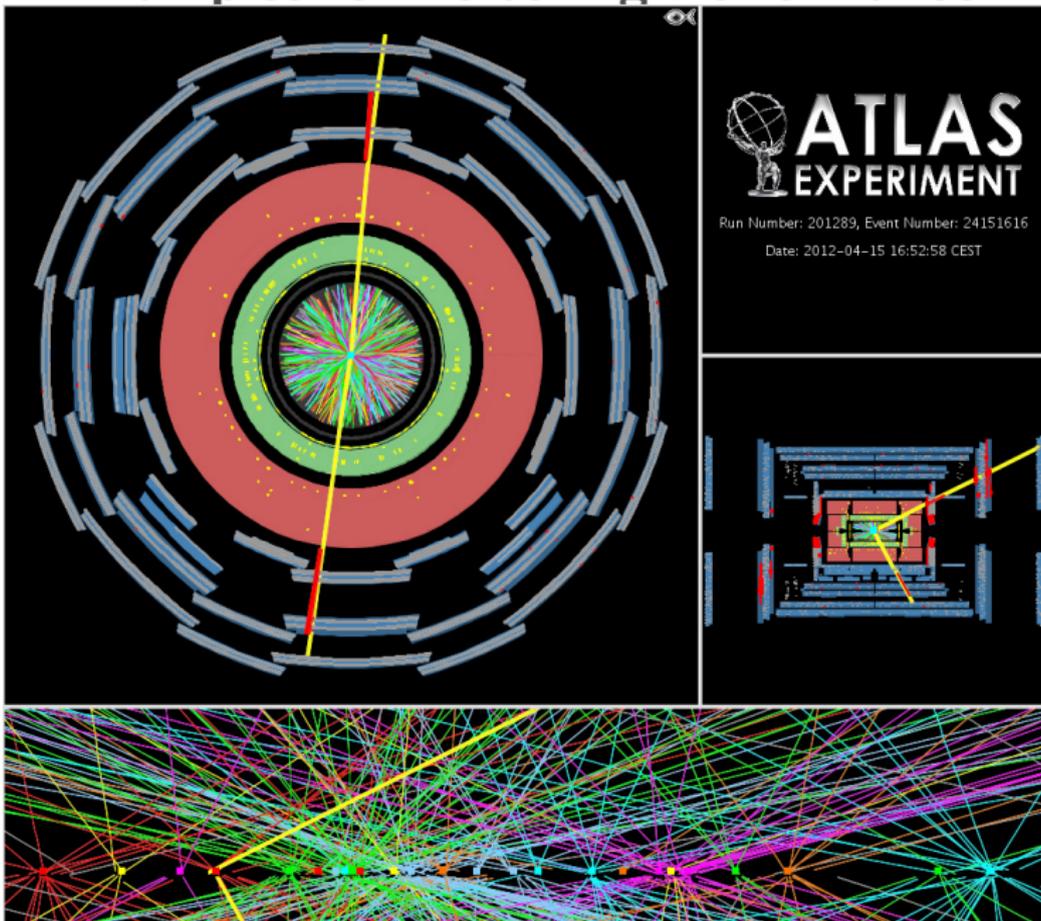
Examples for Vertexing Performance



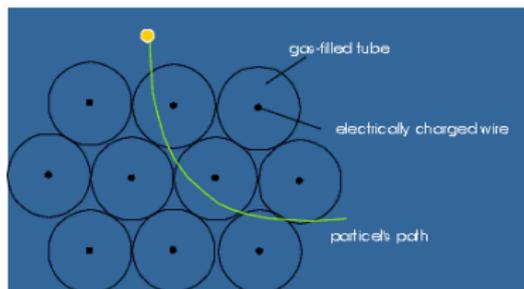
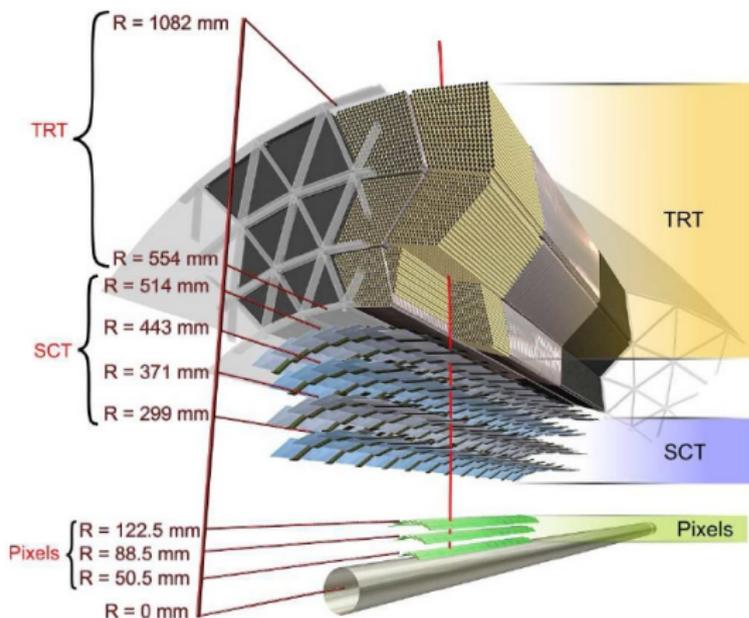
Examples for Vertexing Performance



Examples for Vertexing Performance

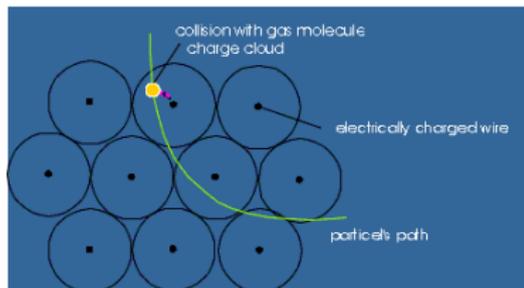
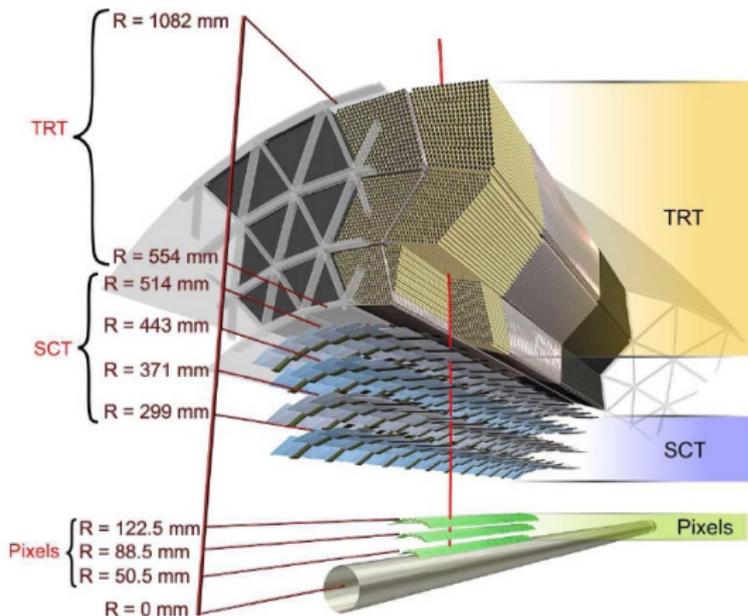


Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



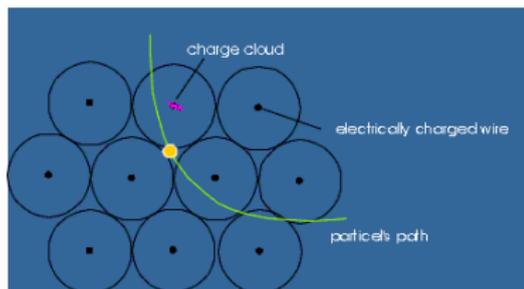
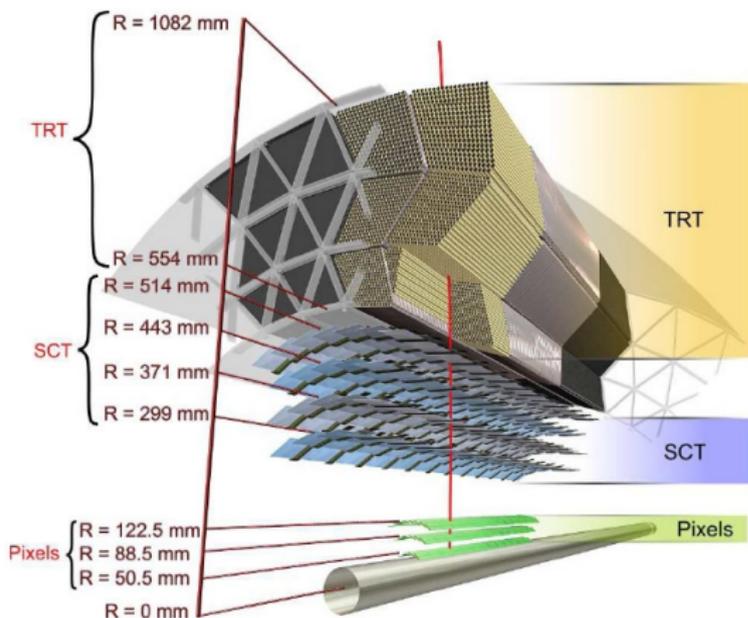
Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



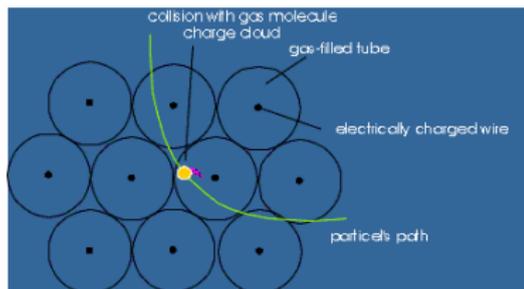
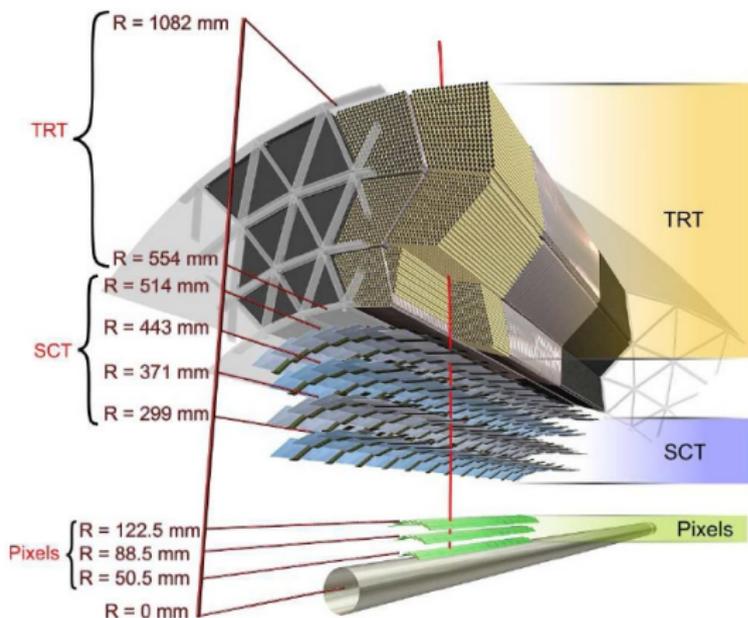
Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



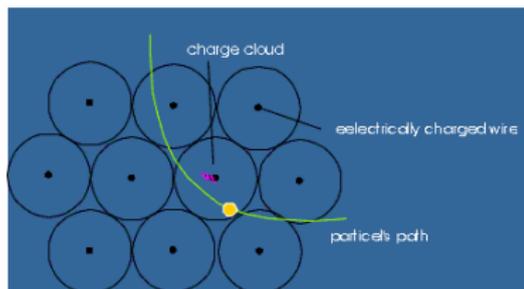
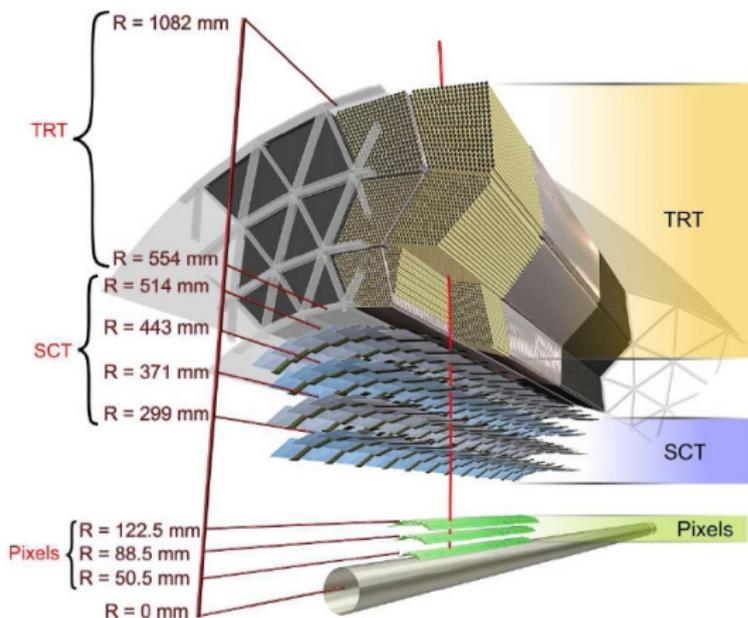
Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



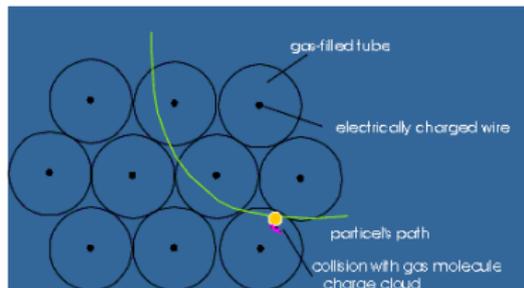
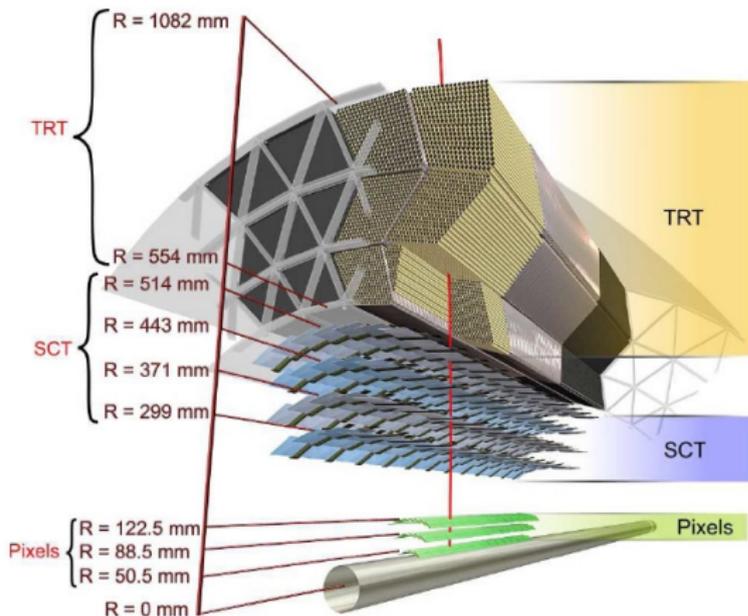
Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



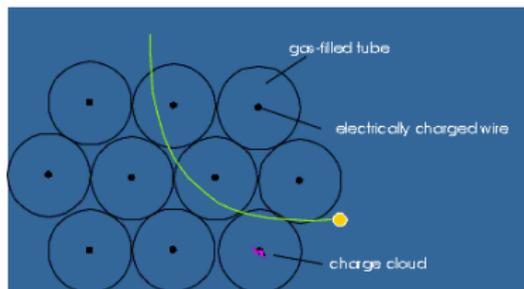
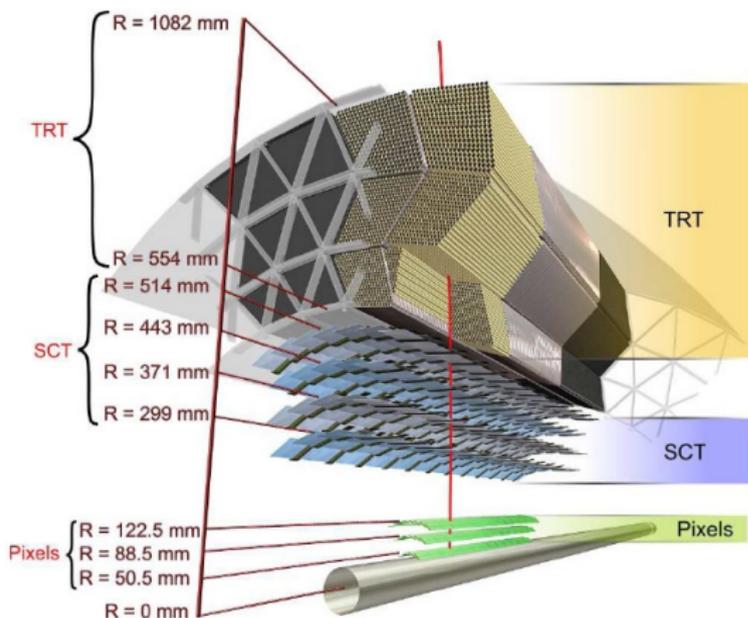
Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

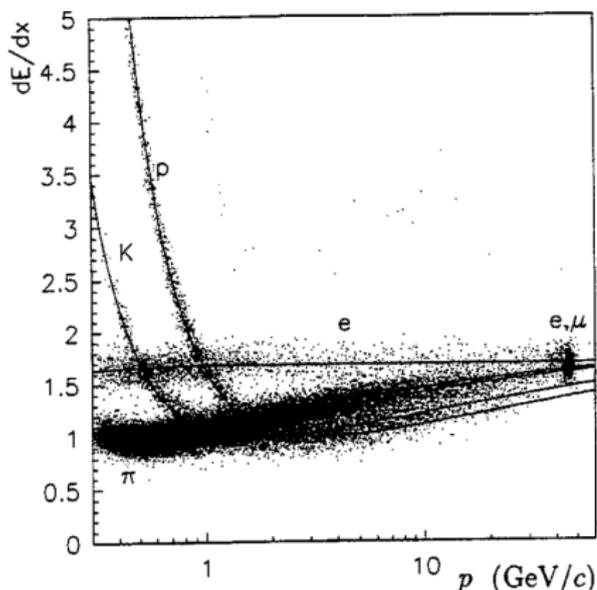
Vertexing and Tracking: The ATLAS tracking



Tracking detectors should in principle be build out of nothing – they should not disturb the path of the particles and lead to no significant energy loss . . .

Particle Identification: Example

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



- Measure dE/dx from signal height
- Measure p from $r = \frac{p}{eB}$
- Get β from $p = \beta\gamma m$
- Only one solution for m !

Ein paar Experimente