

Forschung mit der Urknallmaschine

Elementarteilchenphysik am LHC mit ATLAS
Rupprecht-Gymnasium München

Sven Menke, MPP München

3. April 2017,

- ▶ Teilchenphysik
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren
- ▶ ATLAS und der LHC
- ▶ Die Entdeckung des Higgs-Teilchens

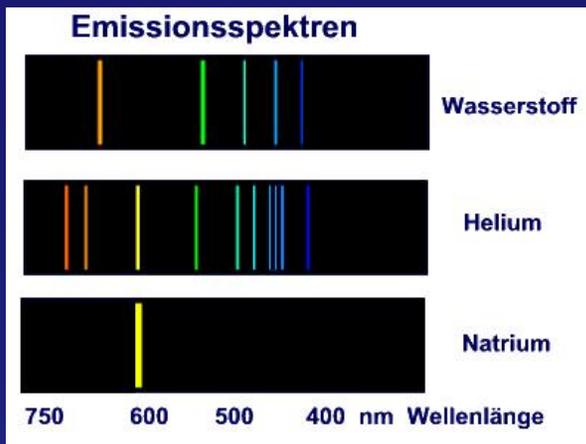
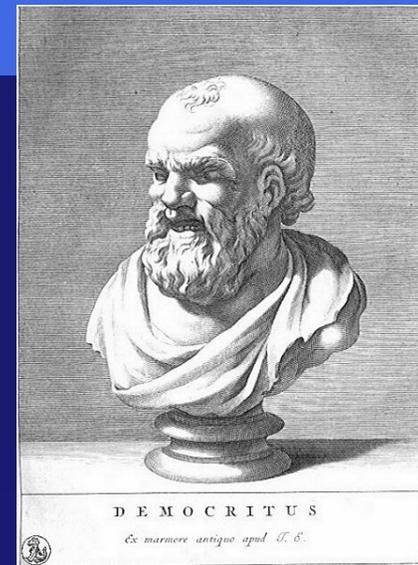
Simulation eines LHC Ereignisses ATLAS/CERN



Was ist Gegenstand der Elementarteilchenphysik?

▶ Antike Naturphilosophie Demokrits (ca. 460-400 v.Chr.):

- „Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome im leeren Raum.“

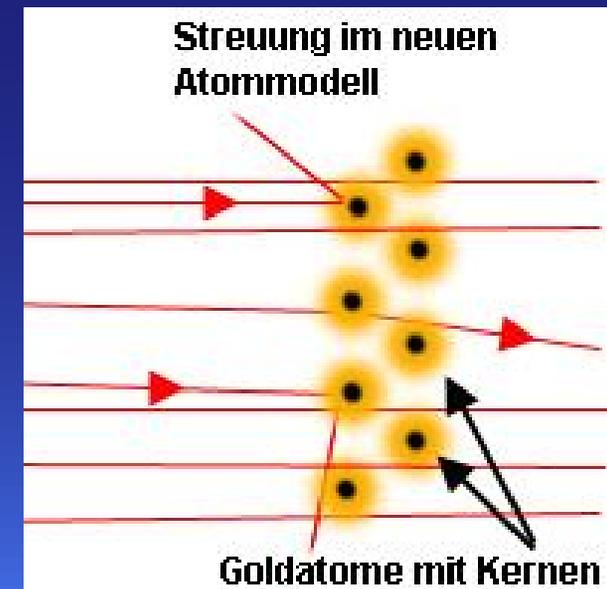


▶ Atomphysik (19. Jahrhundert):

- Spektroskopie erlaubte die Zuordnung chemischer Eigenschaften zu physikalischen Ordnungsmerkmalen
- Elemente werden unterschieden

▶ Kernphysik (Anfang 20. Jahrhundert):

- Streuexperimente (Rutherford) belegen, dass Atome im wesentlichen leer sind (Atomhülle mit wenigen Elektronen) und einen dichten Kern (Nukleus) besitzen:
- „Es ist, als ob man eine 15-Zoll-Granate auf Seidenpapier schießt, sie zurückgeschleudert wird und einen selbst trifft!“



Was ist Gegenstand der Elementarteilchenphysik?

► Entdeckung der Kernspaltung (30er Jahre des 20. Jahrhundert):

- Atomkerne sind auch nicht elementar, sondern bestehen aus Bausteinen – den Nukleonen
- Bekannte Elementarteilchen sind nun Proton, Neutron und Elektron, aus denen die gesamte uns bekannte „normale“ Materie aufgebaut ist und das Photon als Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung

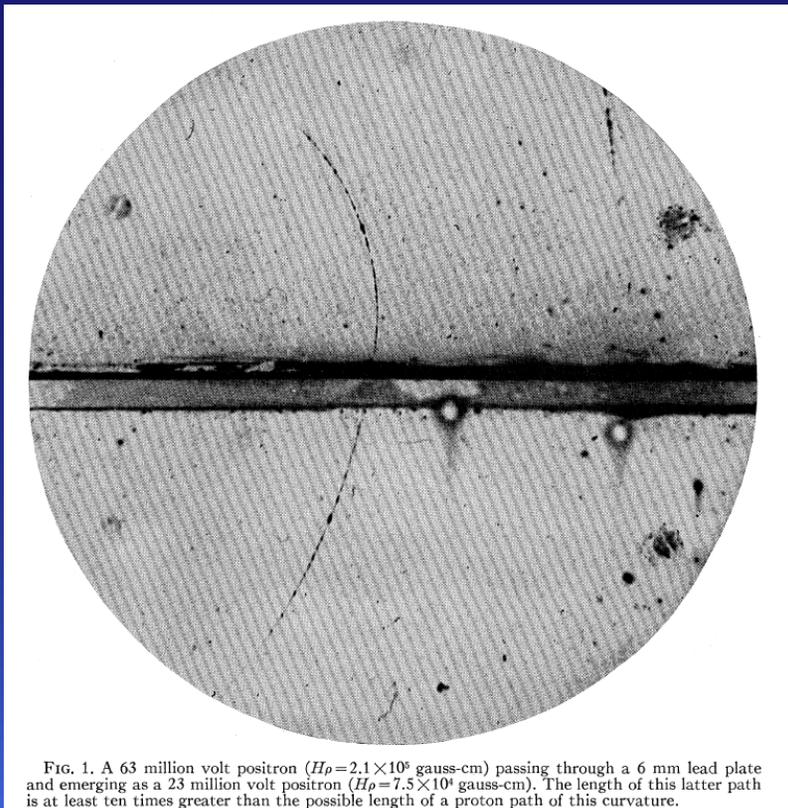
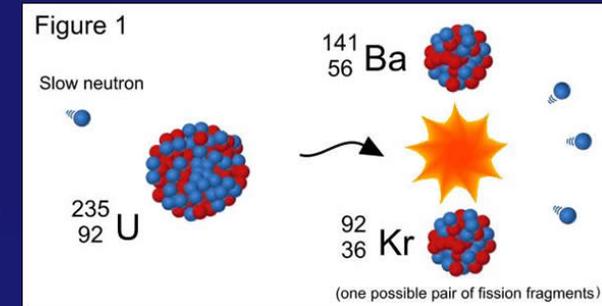


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho=2.1\times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho=7.5\times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

► Andersen entdeckt das Positron

► Carl D. Andersen, *The Positive Electron*, Phys. Rev. **43**, 491-494 (1933)

► Dirac hatte Antielektronen bereits vorhergesagt

► Paul A.M. Dirac, *The Quantum Theory of the Electron*, Proc. R. Soc. Lond. **A117**, 610-624 (1928)

- Plötzlich ist das Tor zu viel mehr Elementarteilchen (Antiteilchen) offen

Das „Periodensystem“ der Teilchenphysik

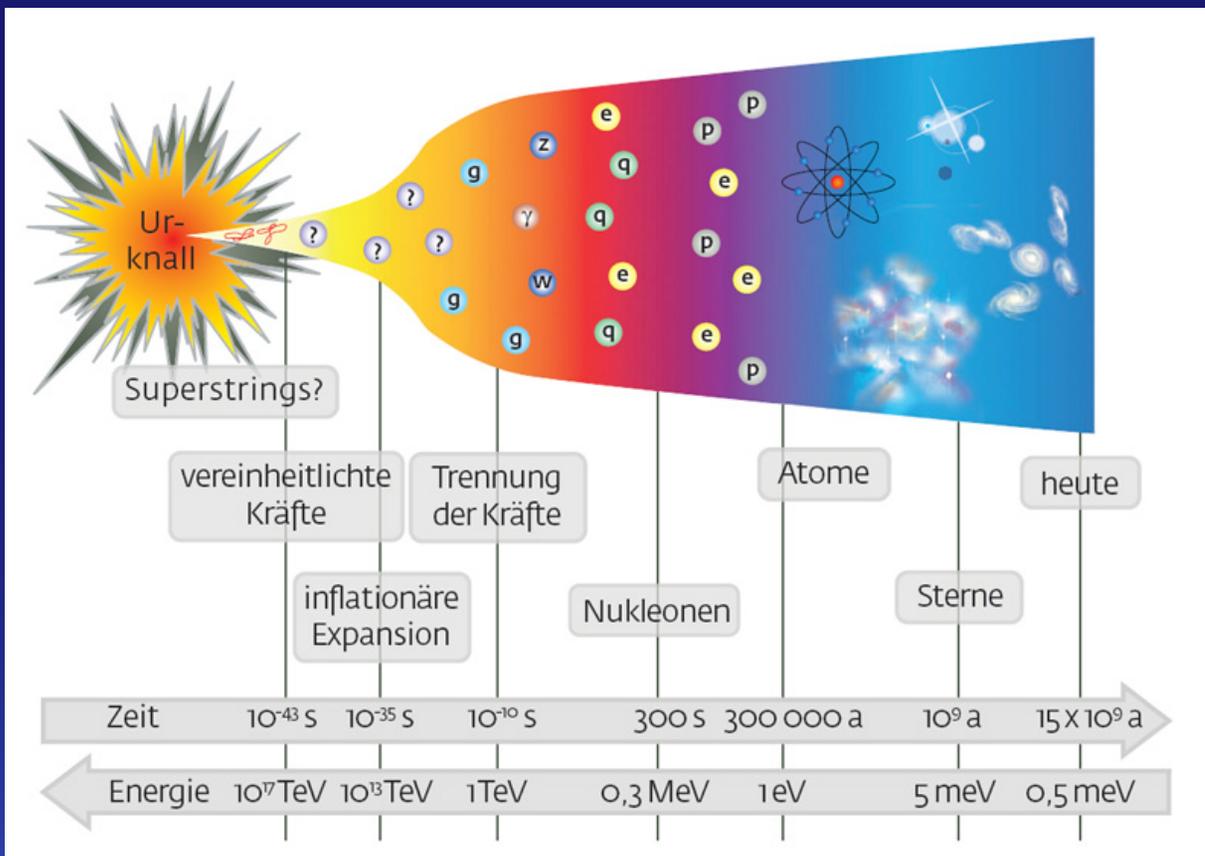
Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	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	
Leptonen	<2 eV	<0,19 MeV	<18.2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm W Boson	Eichbosonen

Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg von MissMJ (wikipedia.org)

► Rückwärts in der Zeit; Aufwärts in der Energie

- Heute, 13.7×10^9 Jahre: Menschen beobachten das sich ausdehnende Universum



- 1×10^9 Jahre: Galaxien entstehen
- 360×10^3 Jahre: Atome entstehen – Photonen entkoppeln von Materie
 - Mikrowellenhintergrund
- 10^{-34} Sekunden: *CP*-Verletzung sorgt für Materie Überschuss – Antimaterie vollständig zerstrahlt
- $< 10^{-43}$ Sekunden:?????

► Mit dem LHC “schauen” wir in das Universum als es $\sim 10^{-10}$ Sekunden alt war

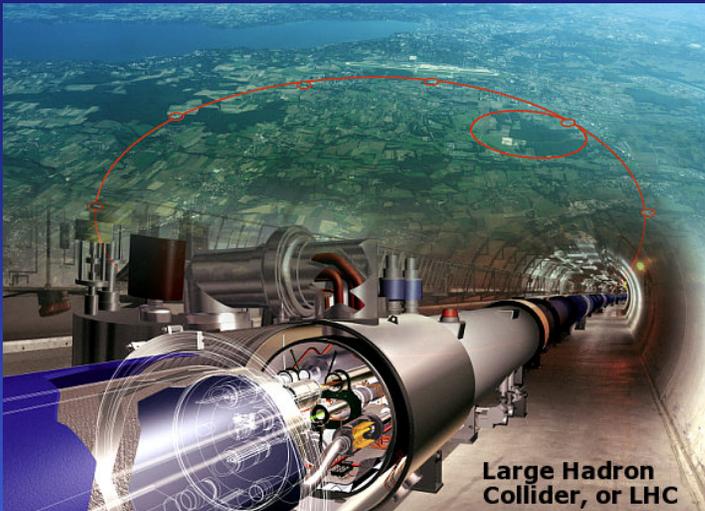
Warum Beschleuniger?



- ▶ Um immer näher an den Urknall heranzurücken, bauen wir Beschleuniger, die immer höhere Energien erreichen können

- Das Prinzip ist ähnlich wie bei einem Mikroskop
- Sichtbares Licht ($f = 375 - 750$ THz) entspricht einer Energie von $E = hf = 1.55 - 3.1$ eV und kann Strukturen bis etwa der halben Wellenlänge ($\lambda = c/f = 400 - 800$ nm) auflösen

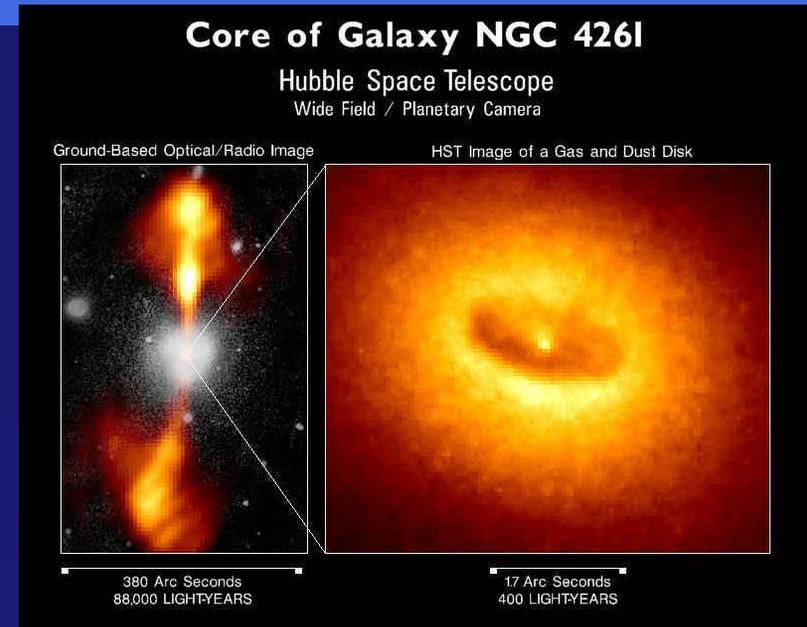
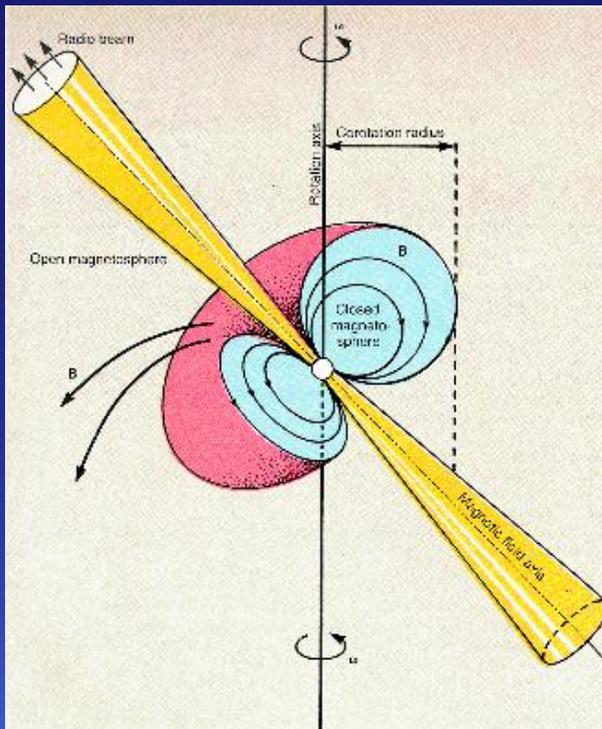
- Elektronenmikroskop (Materiewelle $E_{\text{kin}} = 1 - 100$ keV)
- Theoretische Auflösung bis $\lambda = h/p = 0.04 - 0.004$ nm
($p = \sqrt{(E_{\text{kin}} + mc^2)^2 - m^2c^4} / c$)



- LHC: Protonen werden auf $p = 7$ TeV/c beschleunigt
- Theoretische Auflösung bis $\lambda = h/p = 1.8 \times 10^{-10}$ nm

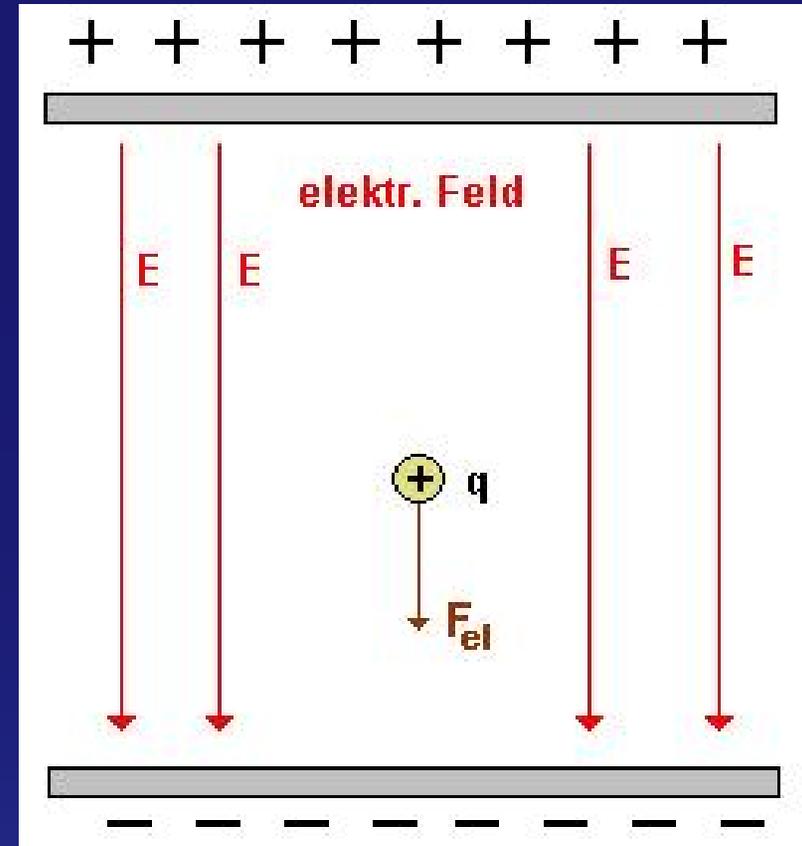
Kosmische Beschleuniger

- ▶ Es gibt noch stärkere Beschleuniger als den LHC ...
 - Allerdings nicht auf der Erde
 - Die stärksten bekannten Beschleuniger sind aktive galaktische Kerne und Pulsare
 - Geladene Teilchen werden auf über 100 TeV beschleunigt
 - Auf der Erde sieht man die Bremsstrahlung der Teilchen

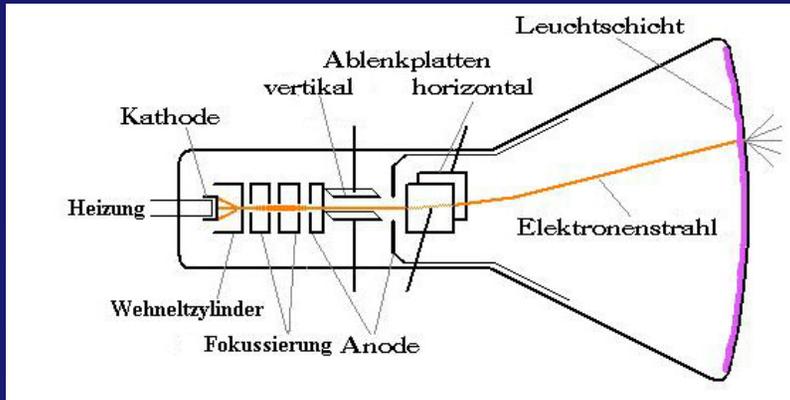


Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger

- ▶ Ein einfach geladenes Teilchen, das die Spannung 1 V durchläuft erhält 1 eV kinetische Energie:
 $E = 1 \text{ V} \times q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- ▶ Beim LHC erhält jedes Proton $7 \text{ TeV} = 7 \times 10^{12} \text{ eV} \simeq 1 \times 10^{-6} \text{ J}$ kinetische Energie
- ▶ Dafür bräuchte man pro Strahl 4666 Milliarden 1.5 V Batterien in Serie ...

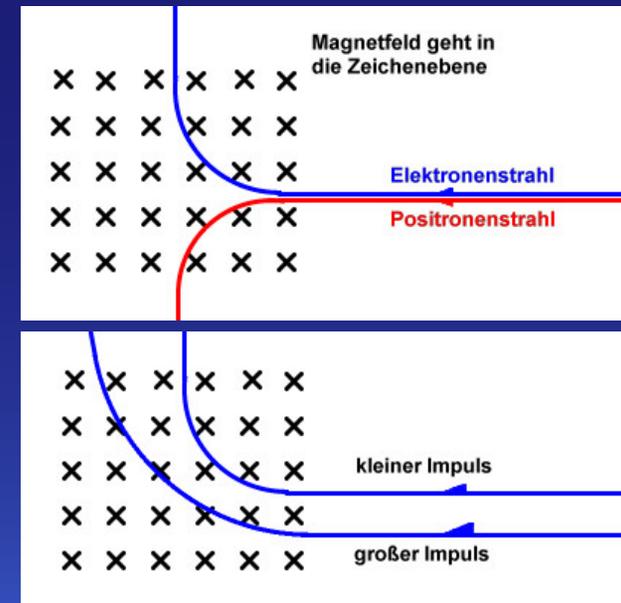


Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger



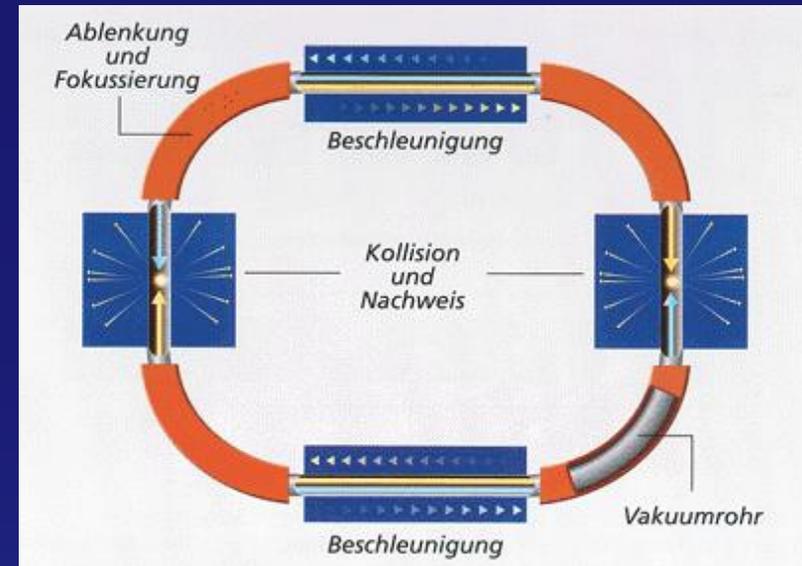
- ▶ Viele hatten früher (manche heute noch) einen Linearbeschleuniger im Wohnzimmer
- ▶ Der Röhrenfernseher enthält eine Hochspannungskathode (5 – 30 kV) mit der Elektronen auf 5 – 30 keV beschleunigt werden

- ▶ Ein Magnetfeld lenkt geladene Teilchen senkrecht zu Flugrichtung und Feldrichtung und proportional zur Ladung sowie umgekehrt proportional zum Impuls ab



Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger

- ▶ Kombiniert man Beschleunigerstrecken (Hochspannung) mit Magneten, kann man die Hochspannung mehrfach durchlaufen
- ▶ Im Prinzip beliebig oft
 - ▶ Für beliebig hohe Energien
- ▶ Praktisch ist die Energie begrenzt, da bei der magnetischen Ablenkung Bremsstrahlung entsteht
 - ▶ Energieverlust



- ▶ Alle Teilchendetektoren basieren auf der Messung der Wechselwirkung des Teilchens mit Materie
 - Die Wechselwirkung beeinflusst natürlich auch das Teilchen selbst
 - ▶ Wichtiges Kriterium für den Aufbau eines Detektors
- ▶ Ganz grob kann man die meisten Detektoren in drei Klassen aufteilen
 - 1. Ortsdetektoren
 - 2. Energieverlustdetektoren
 - 3. Flugzeitdetektoren
- ▶ Manchmal beherrscht ein Detektor mehr als eine dieser Messungen – aber selten alle gleich gut
 - Eng mit den drei obigen Detektorprinzipien ist die Teilchenidentifikation verknüpft, die z.B. durch Kombination von Orts- und Energiemessung sowie das Hinzufügen von Magnetfeldern erreicht werden kann
 - Ortsmessung im Magnetfeld ist z.B. zugleich eine Impulsmessung
 - Impuls- und Energiemessung zusammen erlauben die Bestimmung der Masse

Spurdefinierende Detektoren

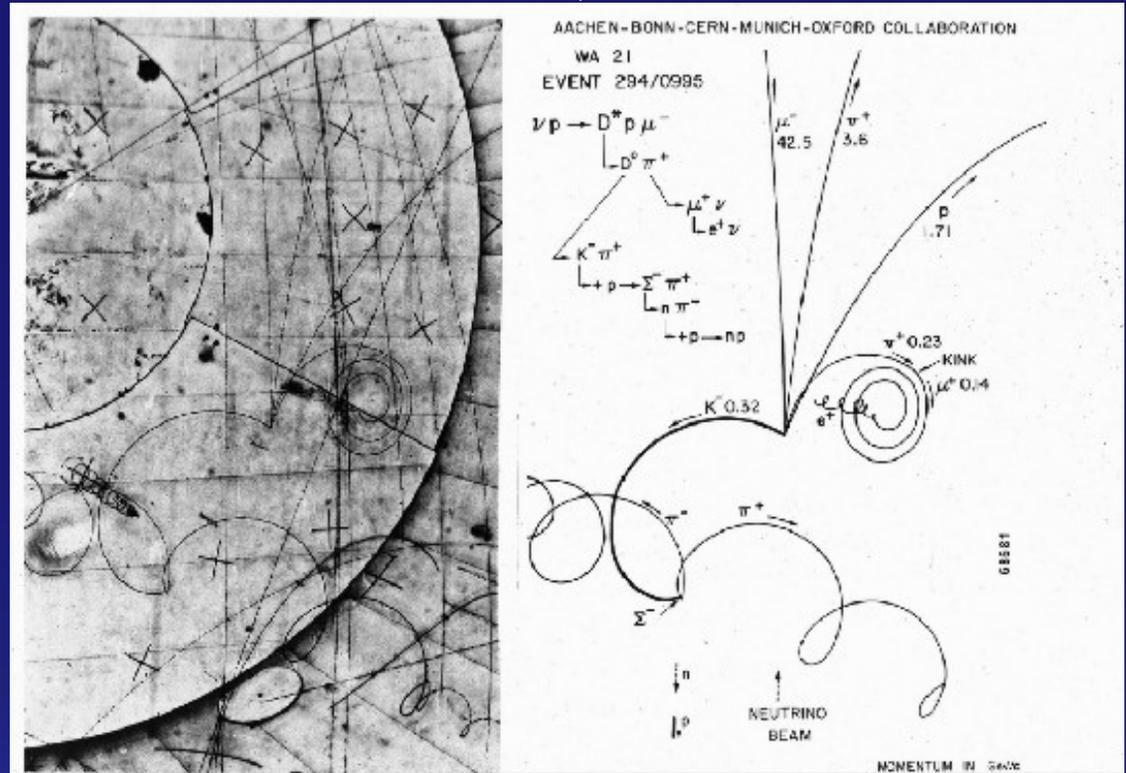
- ▶ Detektoren, die pro Teilchen mehrfach den Ort beim Durchgang des Teilchens durch das sensitive Volumen bestimmen, nennt man spurdefinierende Detektoren

- ▶ Beispiele

- Nebelkammer
- Blaskammer
- Funkenkammer
- Drahtkammer
- Halbleiterdetektoren

- ▶ In allen diesen Fällen nutzt man die ionisierende Wirkung geladener Teilchen beim Durchgang durch die Materie des Detektors

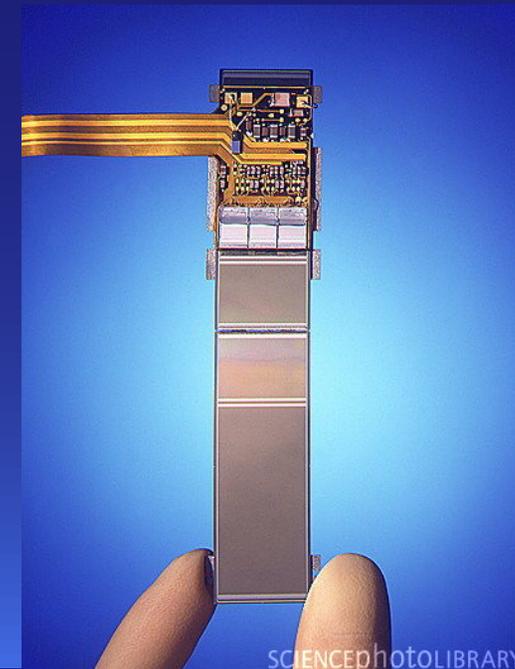
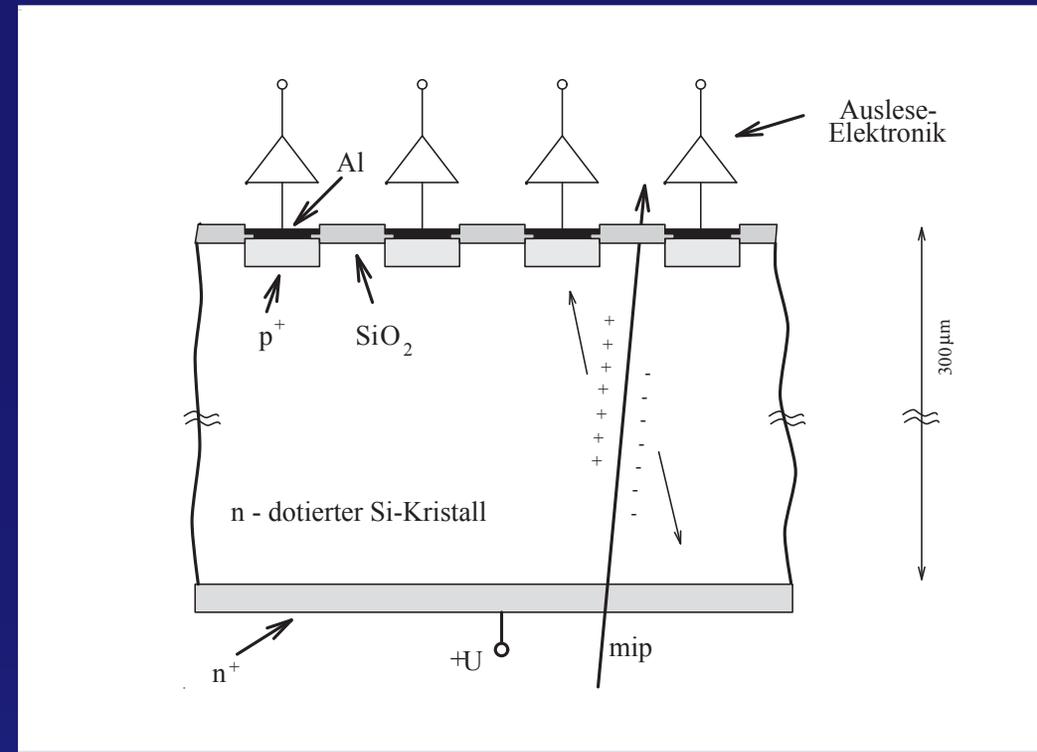
- In der Nebelkammer bilden Luftionen Kondensationskeime
 - ▶ Wassertröpfchen entlang der Spur
- Die überhitzte Flüssigkeit in einer Blaskammer beginnt an den Ionen zuerst zu kochen
 - ▶ Gasblasen entlang der Spur
- Spannungspulse durch primäre Elektron-Ionen-Paare, die durch ein elektrisches Feld beschleunigt wieder Elektron-Ionen-Paare erzeugen
 - ▶ Signale zwischen Elektrodenpaaren entlang der Spur



▶ Prinzip eines Silizium-Detektors

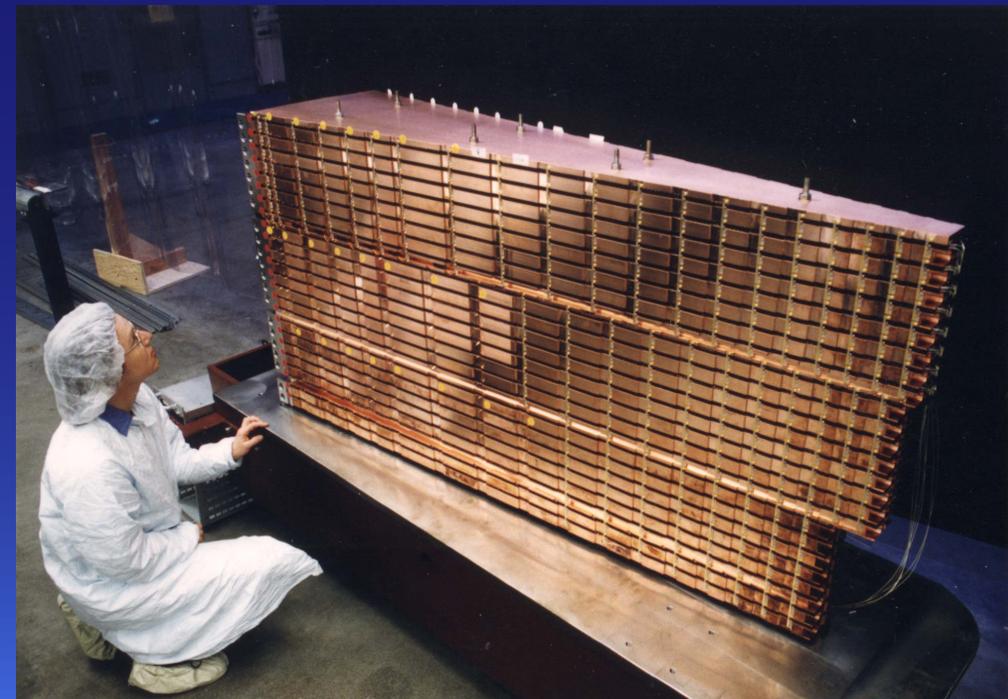
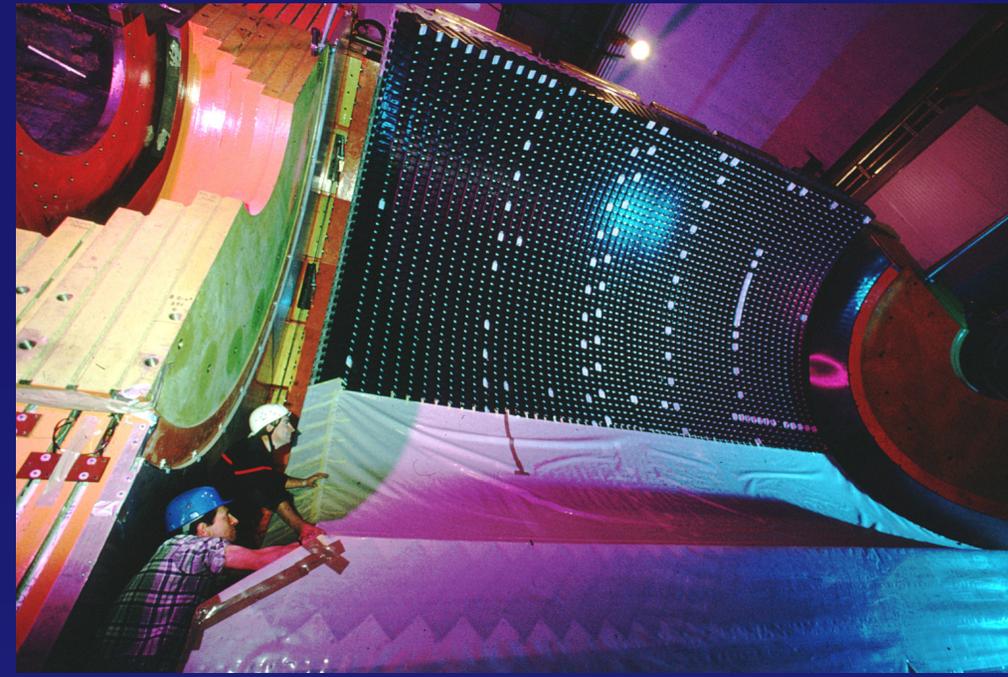
- Im Grunde eine dünne (ca. $300\ \mu\text{m}$) Diode, die in Sperrrichtung betrieben wird
- Geladene Teilchen erzeugen durch Ionisation Elektronen-Loch Paare im Silizium
- Löcher und Elektronen wandern in entgegengesetzte Richtungen
- Fein segmentierte (typisch sind $100\ \mu\text{m}$) Streifen oder Pixel ermöglichen sehr genaue ein- oder zweidimensionale Auslese

▶ Beispiel: Ein Modul des D0 Detektors (Fermilab)



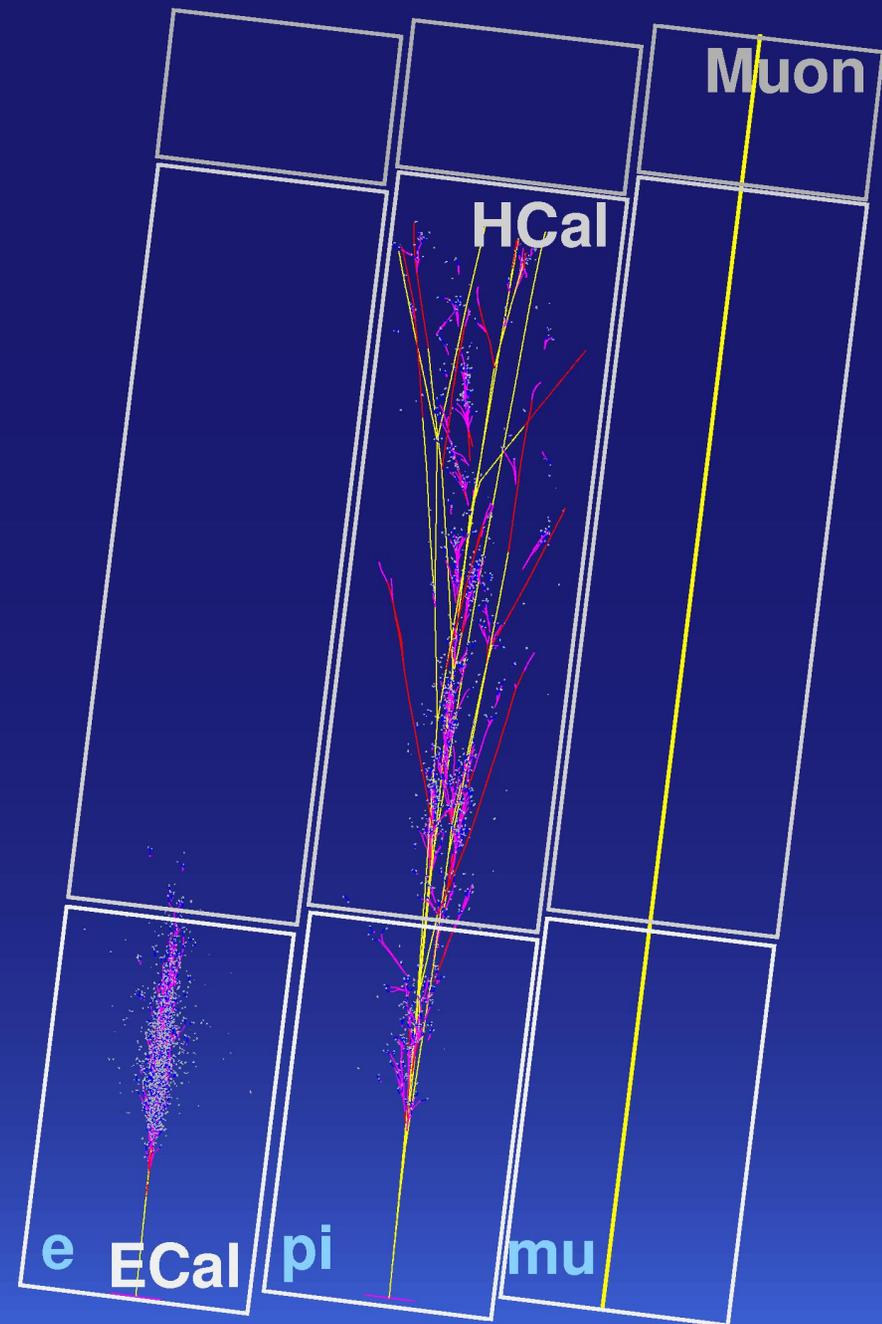
Kalorimeter

- ▶ Detektoren, die die Energie des in das sensitive Volumen einfallenden Teilchens messen, nennt man Kalorimeter
- ▶ Beispiele
 - Homogene Kalorimeter
 - Samplingkalorimeter
- ▶ Anwendungen
 - Elektromagnetische Kalorimeter (γ , e^\pm) (z.B. OPAL EM Barrel (oben))
 - Hadronische Kalorimeter (π^\pm , n, p, ...) (z.B. ATLAS Had Endcap (unten))
- ▶ Signalbildung meist durch Ionisation oder die Ionisation begleitende Effekte (Szintillation, Čerenkov-Licht, etc.) der Teilchen im elektromagnetischen oder hadronischen Schauer



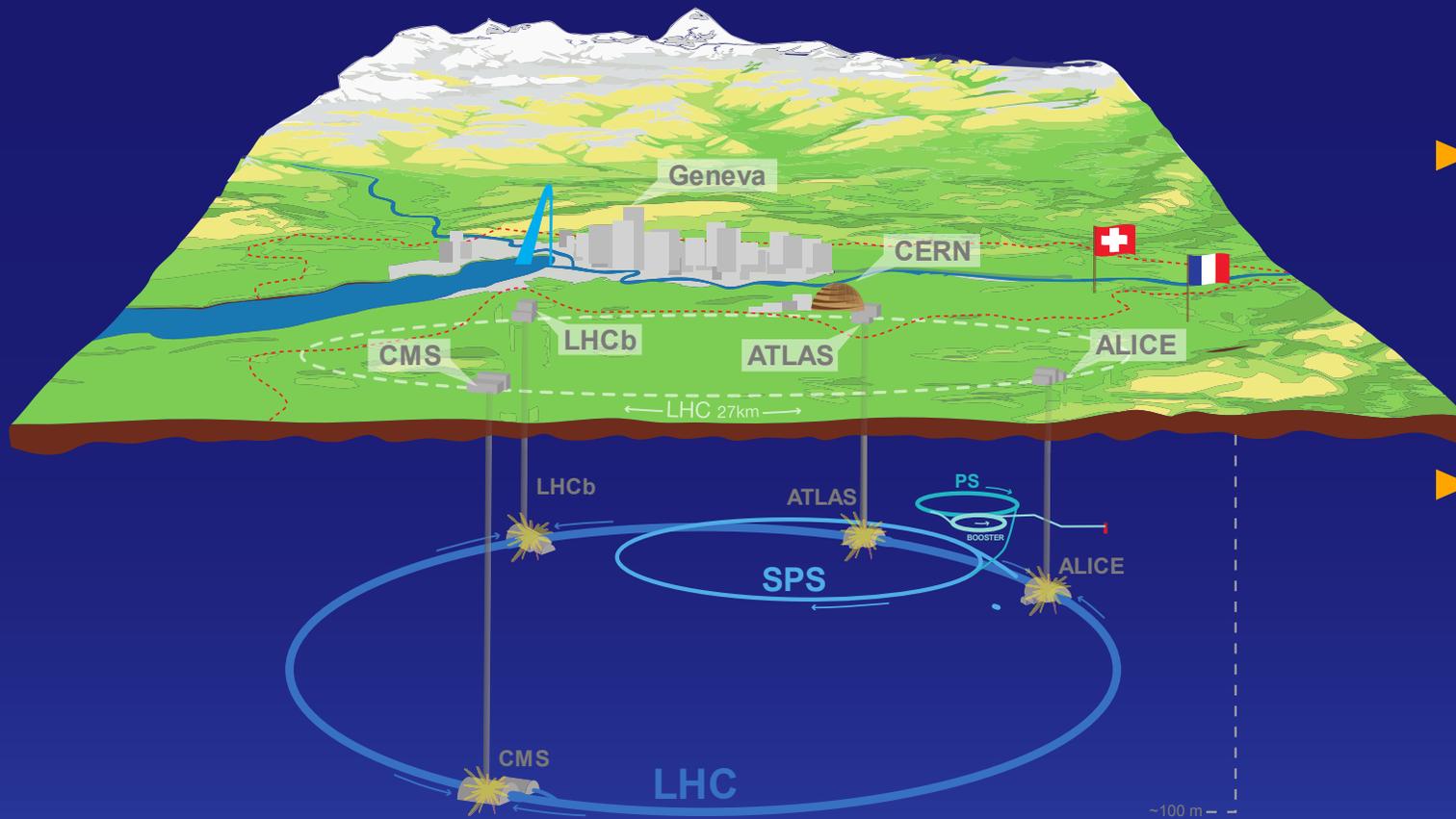
Teilchenidentifikation

- ▶ Elektronen und Photonen werden im vorderen Teil des Kalorimeters (elektromagnetisches Kalorimeter) nachgewiesen
 - Elektronen hinterlassen außerdem eine Spur im inneren Detektor
- ▶ Pionen, Neutronen und Protonen verursachen hadronische Schauer und werden im gesamten Kalorimeter nachgewiesen
 - Pionen und Protonen hinterlassen außerdem eine Spur im inneren Detektor
- ▶ Myonen verursachen keinen Schauer und hinterlassen nur Ionisationsenergie im Kalorimeter
 - Und eine Spur im inneren Detektor
 - Sowie als einzige Teilchen Spuren im äußeren Detektor (den Myon-Kammern)
- ▶ Neutrinos wechselwirken gar nicht und verlassen daher unbemerkt den Detektor
 - Können aber indirekt über den fehlenden Transversalimpuls nachgewiesen werden



Der Large Hadron Collider LHC

- ▶ LHC: Proton-Proton Kollisionen bei Schwerpunktsenergieen
 $\sqrt{s} = 7, 8 \& 13 \text{ TeV}$ seit März 2010

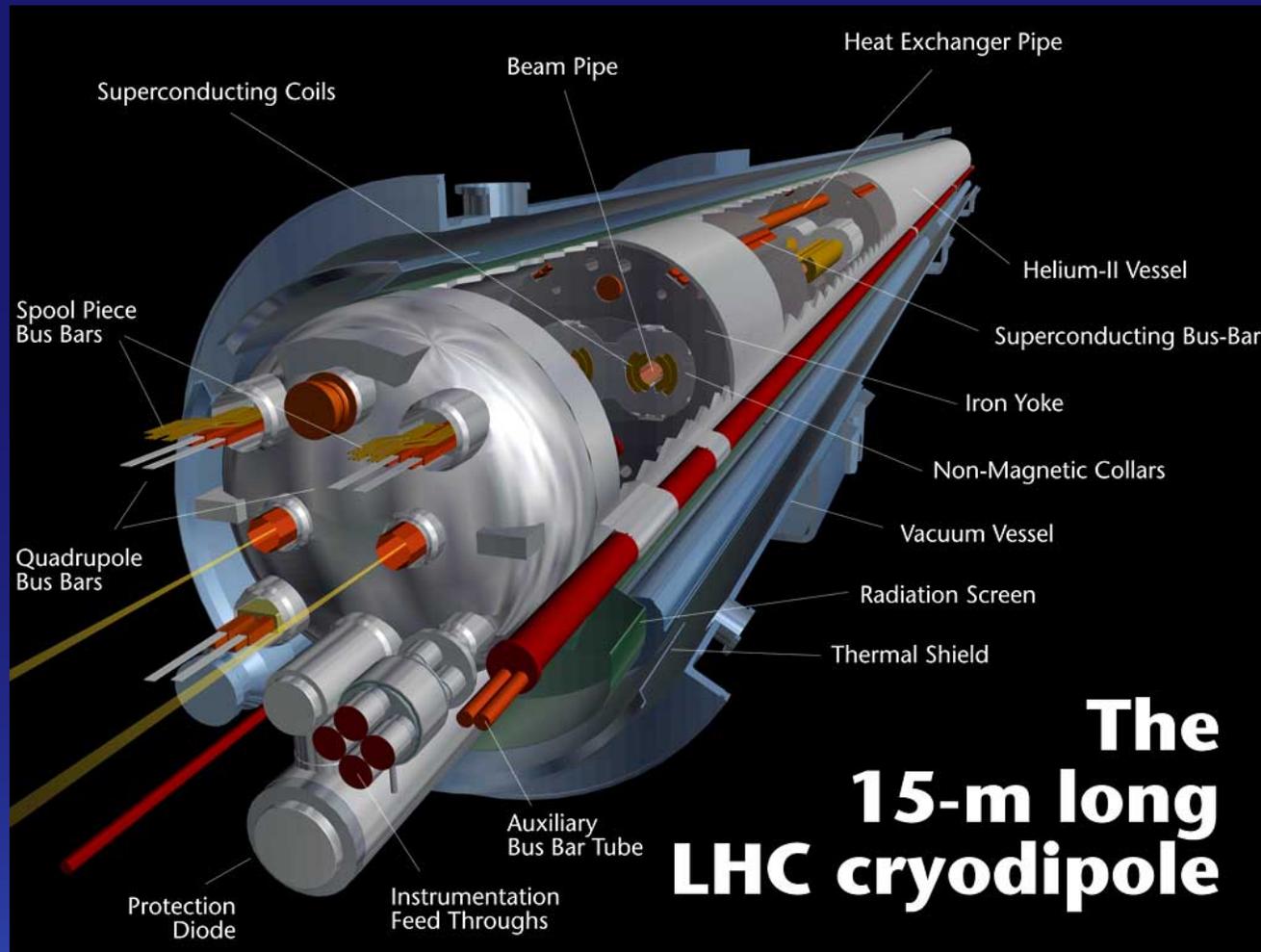


- ▶ Erster Betrieb
September 2008
- ▶ Unfall kurz nach
Inbetriebnahme
 - ▶ Reparatur bis
Ende 2009
- ▶ Ende 2009 -
Anfang 2013
stabiler Betrieb
 - ▶ Pause bis
2015, um auf
13 TeV
umzustellen

- ▶ Seit Mitte 2015 stabiler Betrieb

Der Large Hadron Collider LHC

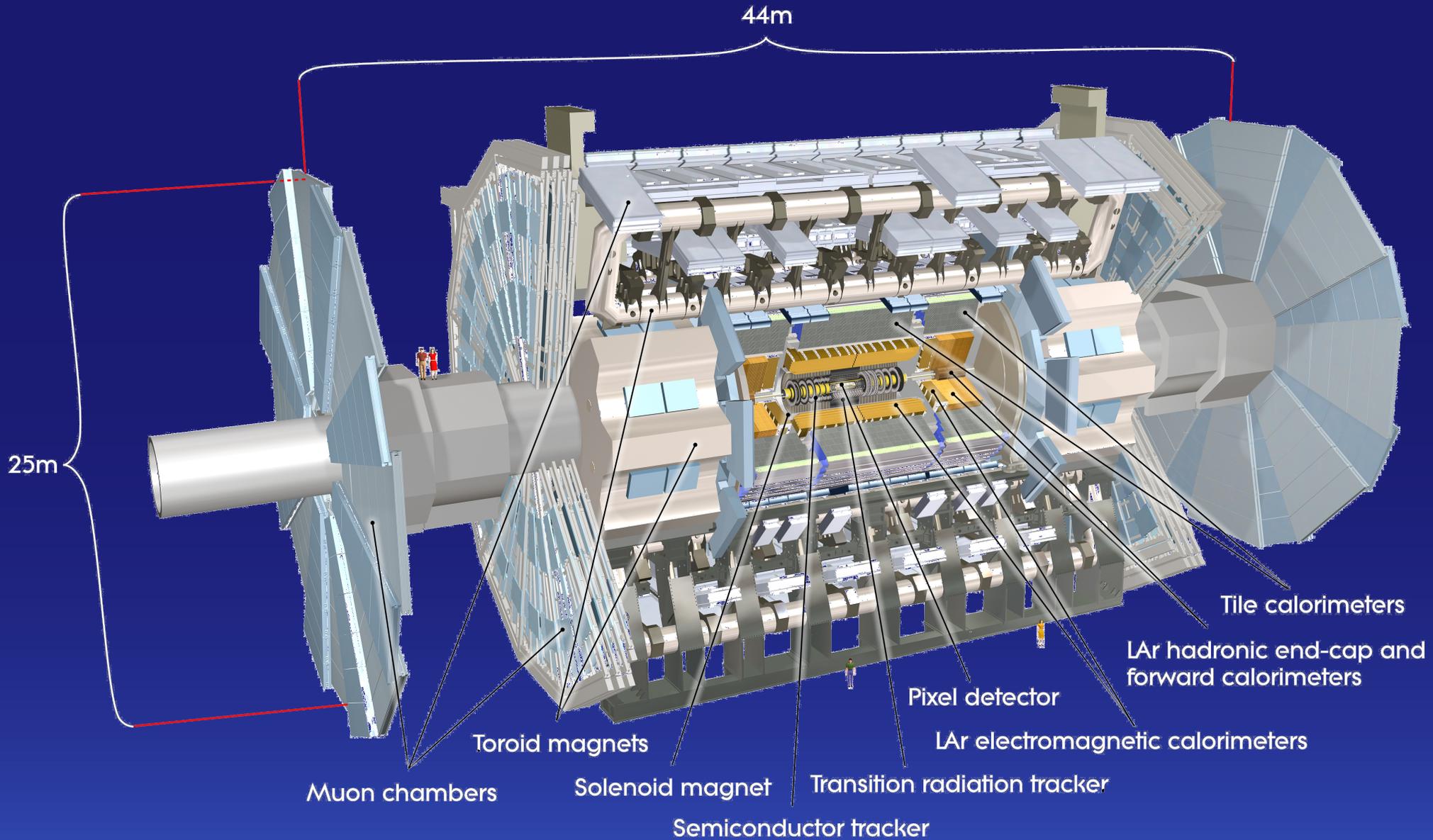
- ▶ 1232 supraleitende Dipole (jeder 15 m lang)



- ▶ 27 km langer Tunnel
- ▶ Protonen kreisen ca. 11000 Mal pro Sekunde
- ▶ Alle 25 ns kollidieren 2 der 2×2800 Protonenpäckchen mit je 10^{11} Protonen
- ▶ Alle Protonen zusammen haben die kinetische Energie eines ICE3 bei 200 km/h

- ▶ Einzelne Stöße haben nur die Energie zweier Mücken, die im Flug zusammenstoßen

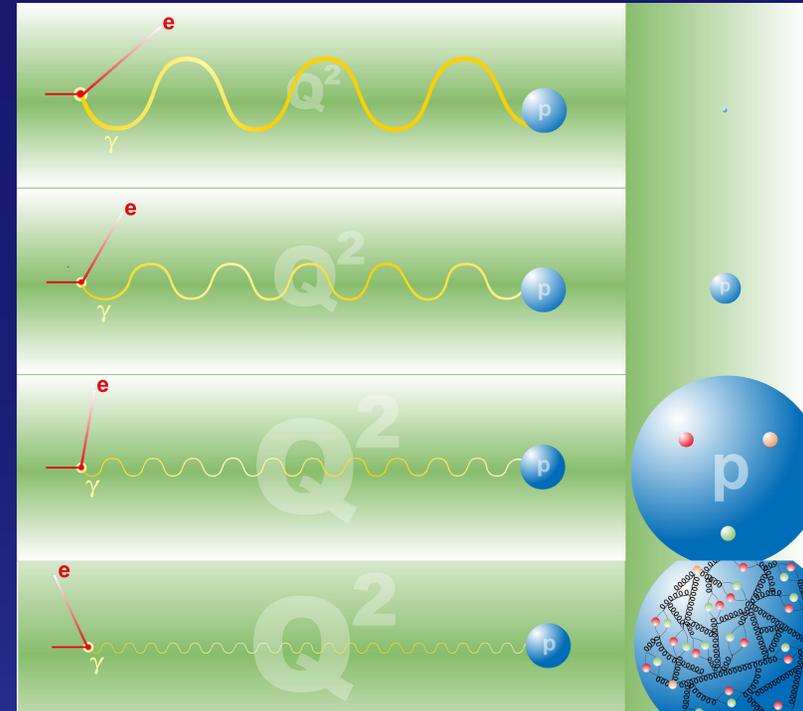
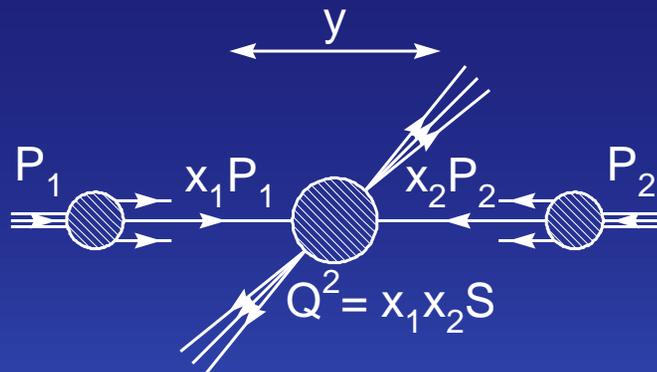
Der ATLAS Detektor



A Torodial LHC AparatuS: 25 m hoch; 44 m lang; 7000 t schwer

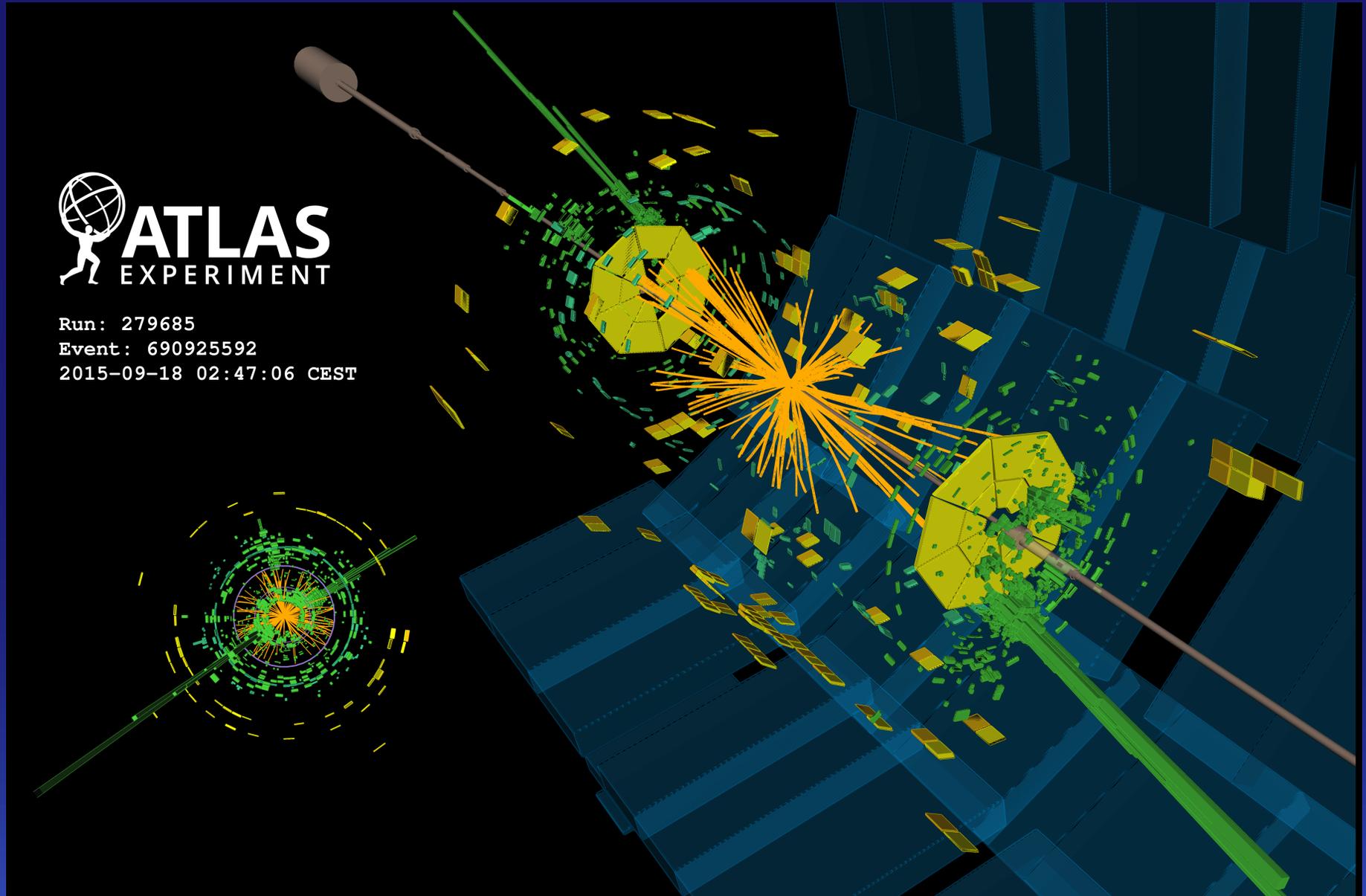
ATLAS Analyse

- ▶ Beim LHC kollidieren Protonen mit exakt entgegengesetztem Impuls
- ▶ Je höher die Energie der Protonen, um so mehr Substruktur bekommt man zu sehen
- ▶ Bei ganz niedrigen Energien sieht das Proton wie ein Teilchen aus
- ▶ Bei mittleren Energien sieht man die 3 Valenzquarks des Protons
- ▶ Bei hohen Energien sieht man immer mehr Quark-Antiquark-Paare und Gluonen



- ▶ D.h. beim LHC kollidieren nicht Protonen, sondern einzelne Quarks und Gluonen!

Ein typisches Ereignis bei ATLAS



- ▶ Etwa 50 Millionen solcher “Ereignisse” zeichnet ATLAS jeden Tag auf

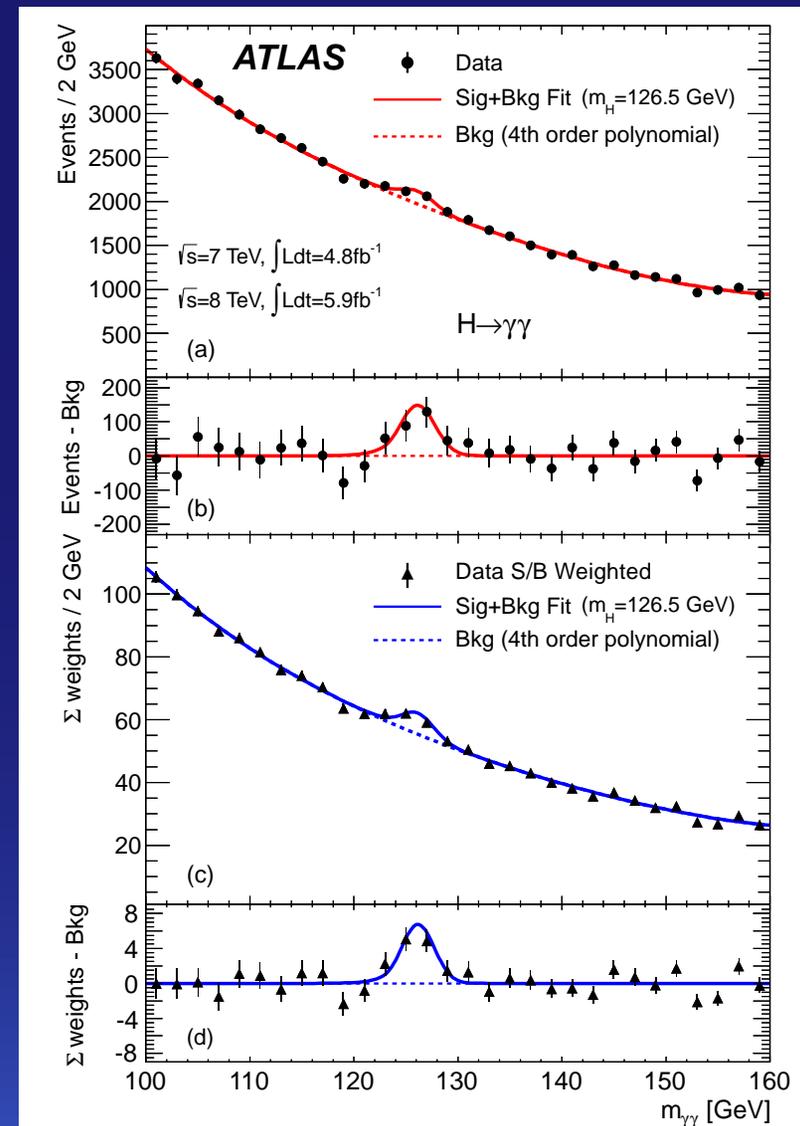
Entdeckung des Higgs Bosons

► Die Entdeckung neuer Teilchen ist mit einem Würfelexperiment vergleichbar:

- Jede vom ATLAS-Detektor registrierte Kollision zweier Protonen entspricht einem Wurf mit dem Würfelbecher
- Die Kombination der entstandenen Teilchen im Detektor kann mit der Augenzahl der Würfel verglichen werden
- Ein neues Teilchen entspricht dann einer besonderen Augenzahl, die häufiger vorkommt als statistisch vorgesehen (unter der Annahme, dass es so ein Teilchen nicht gibt)
- Ist die Abweichung mehr als 5-Mal so groß wie die zu erwartende natürliche Fluktuation, spricht man von einer Entdeckung

► Im Sommer 2012 war es so weit:

- Nach etwa 3.5 Milliarden aufgezeichneten Ereignissen zeigte sich eine signifikante Abweichung
- Die Kombination zweier Photonen im Detektor ergibt 6-mal häufiger als erwartet eine Masse von etwa 126 GeV
- Die Beobachtung ist mit einem Higgs-Boson, das in 2 Photonen zerfällt, verträglich



► Nobelpreis in Physik 2013 für die “Erfinder” Higgs und Englert

Wie wird man Elementarteilchenphysiker?

- ▶ Am Beispiel von Sven Menke
- ▶ 1987: Abitur
- ▶ 1989 – 1993: Physikstudium an der Uni Bonn
- ▶ 1994: Diplom in Physik
 - Entwicklung eines Datennahmesystem für einen Spurdetektor
- ▶ 1998: Dissertation in Physik
 - Messung der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung mit OPAL bei LEP
- ▶ 1998 – 2002: Forschungsaufenthalt in Stanford, USA
 - Mitarbeit am BaBar Experiment zur Untersuchung der CP-Verletzung
- ▶ seit 2002: Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Physik, München
 - Mitarbeit am ATLAS Experiment
- ▶ seit 2009: Leiter der ATLAS-Kalorimeter-Gruppe am Max-Planck-Institut für Physik, München