

Forschung mit der Urknallmaschine

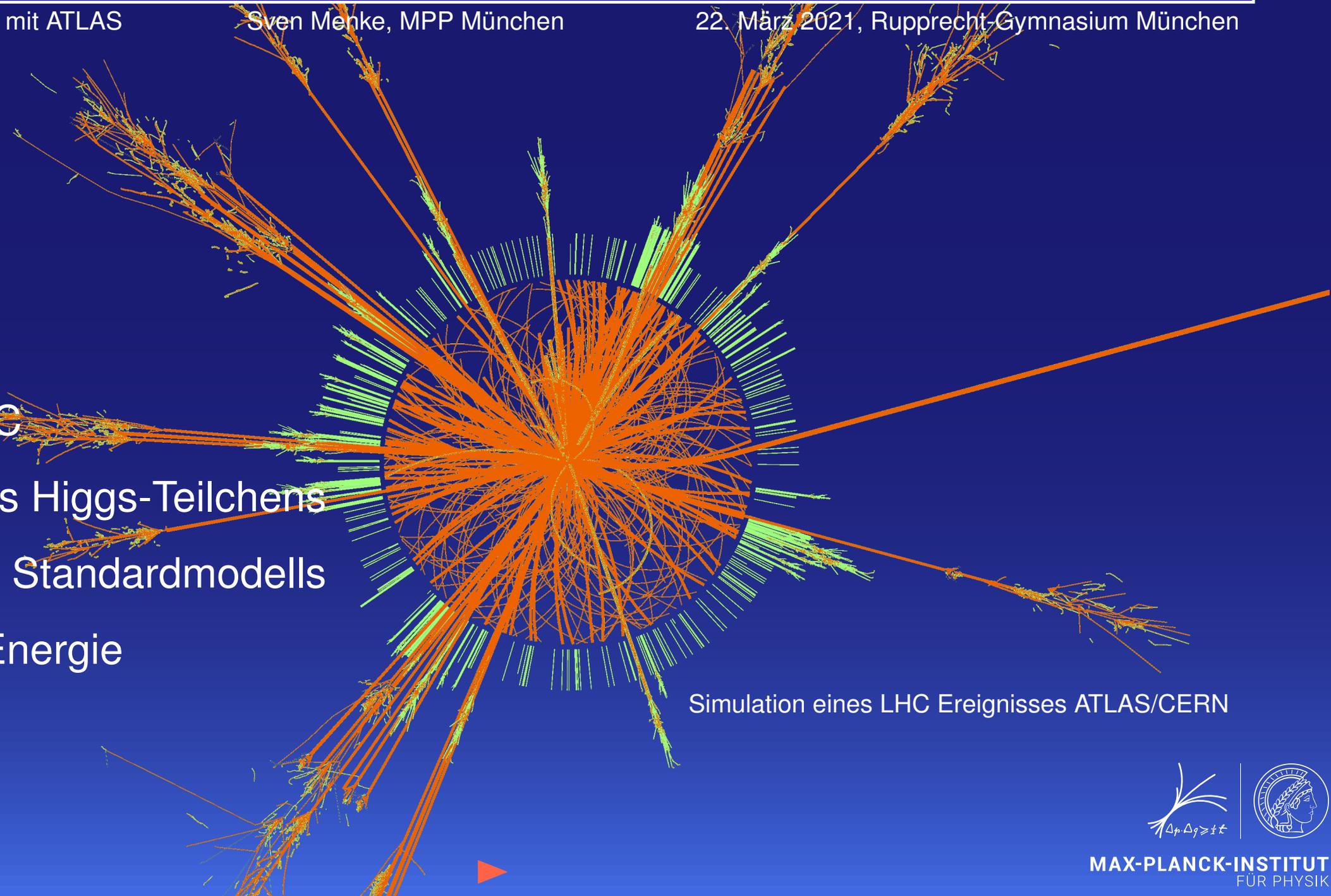
Elementarteilchenphysik am LHC mit ATLAS

Sven Menke, MPP München

22. März 2021, Rupprecht-Gymnasium München

- ▶ Teilchenphysik
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren

- ▶ ATLAS und der LHC
- ▶ Die Entdeckung des Higgs-Teilchens
- ▶ Physik jenseits des Standardmodells
- ▶ Dunkle Materie & Energie

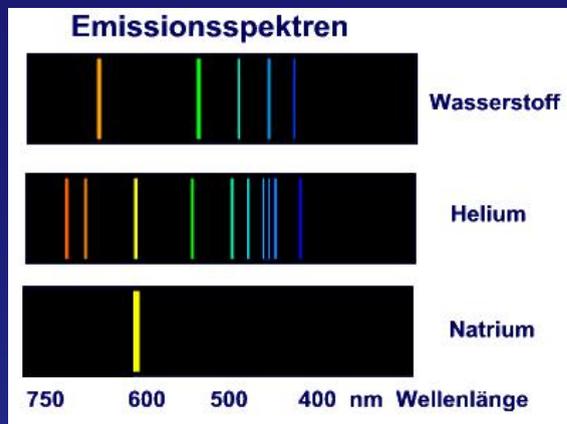
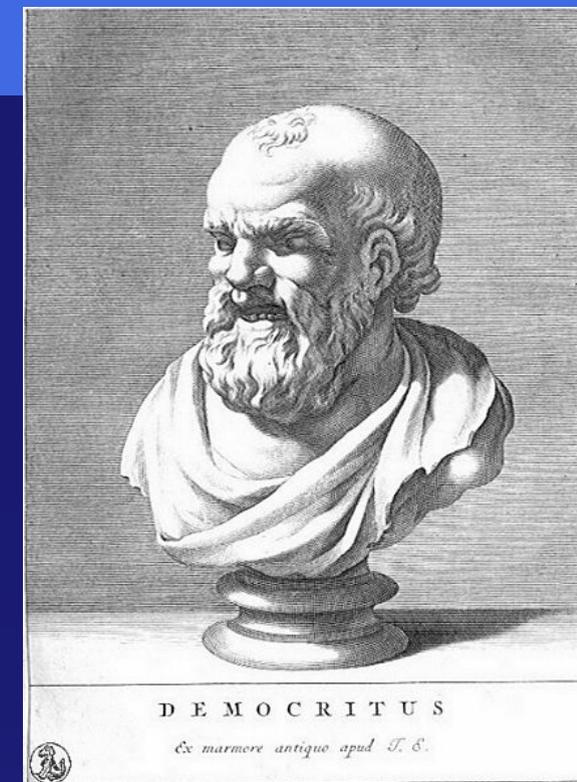


Simulation eines LHC Ereignisses ATLAS/CERN

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.“

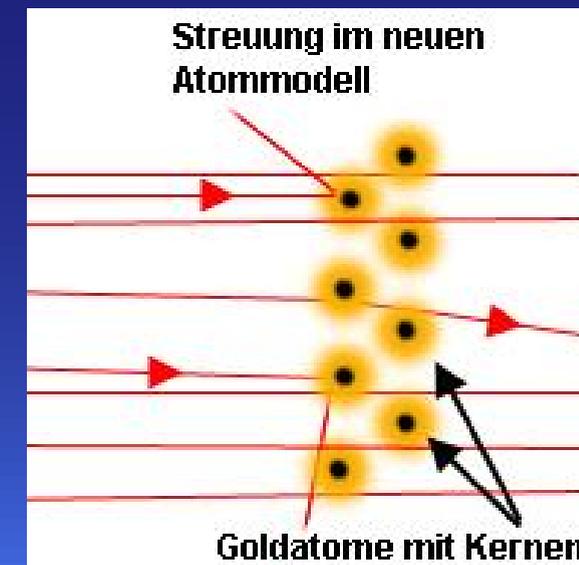


▶ Atomphysik (19. Jahrhundert):

- 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

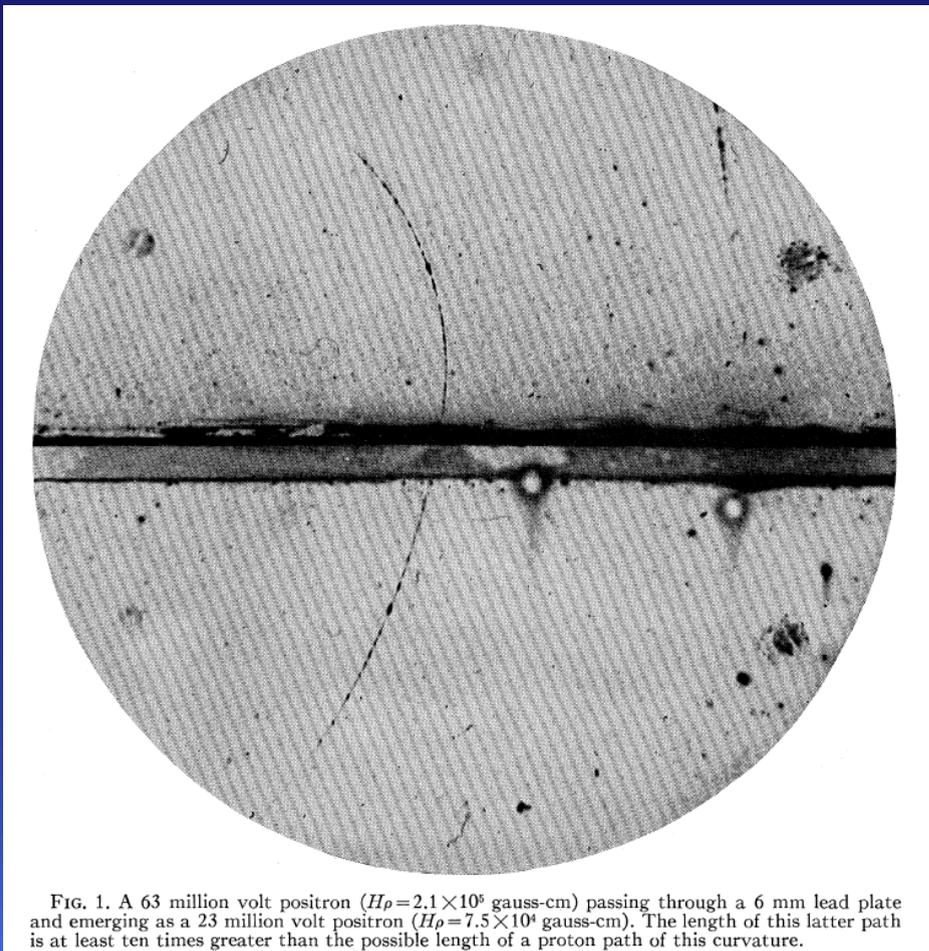
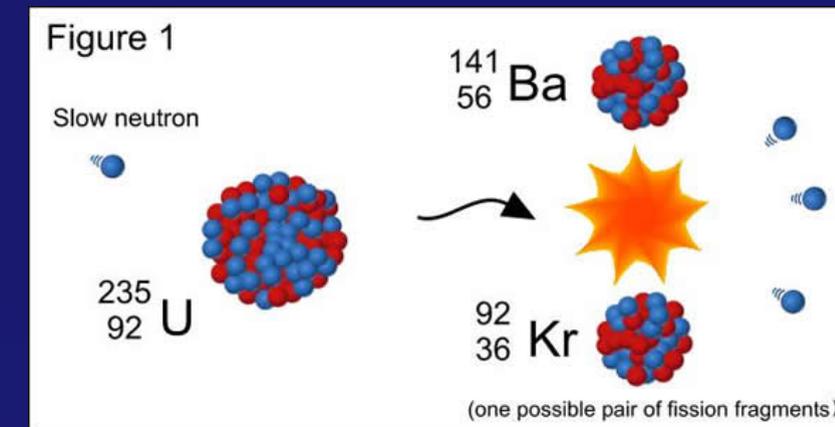


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho=2.1\times 10^5$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho=7.5\times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

- ▶ 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

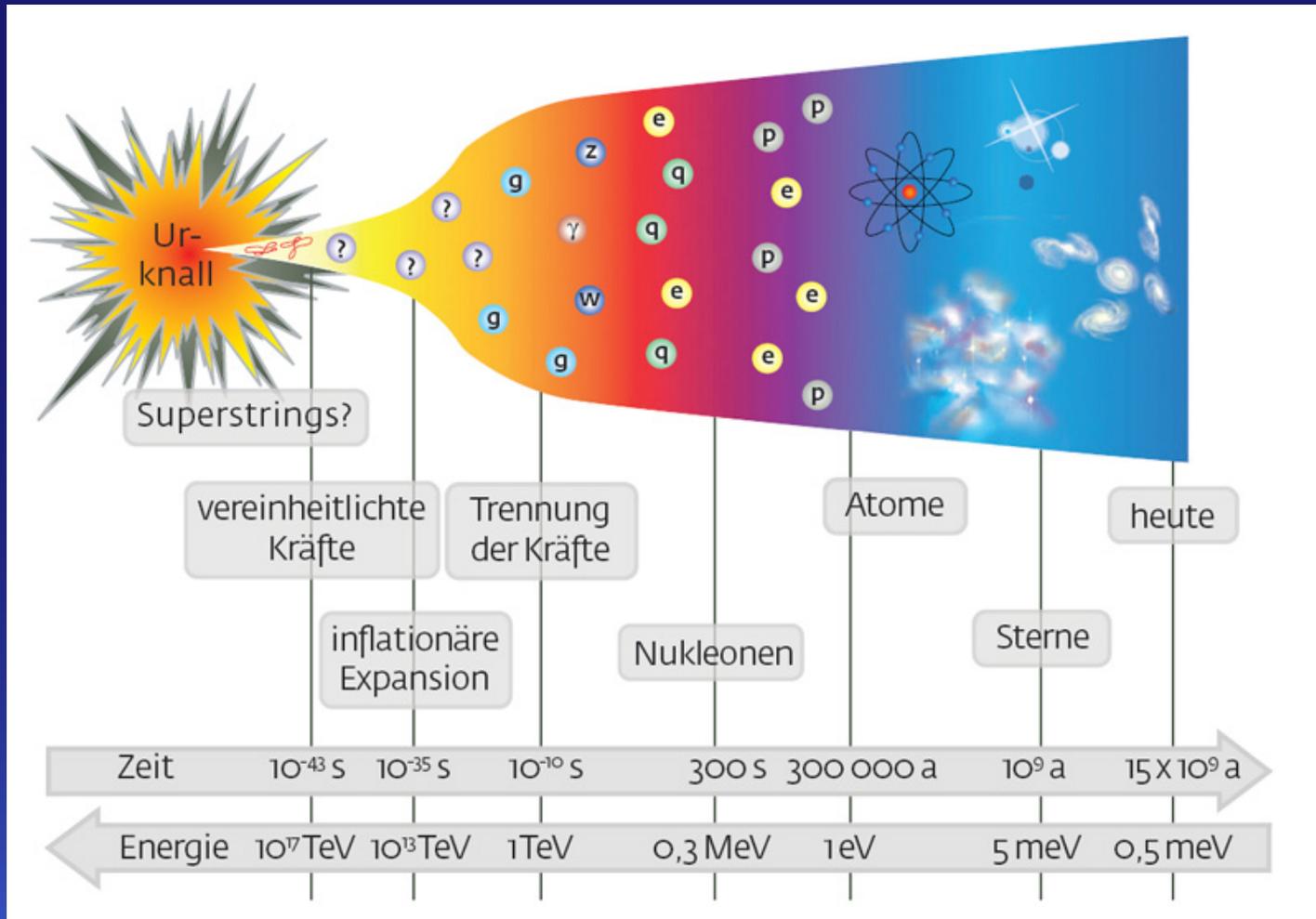
Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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 $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson	Eichbosonen
Leptonen					

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:?????

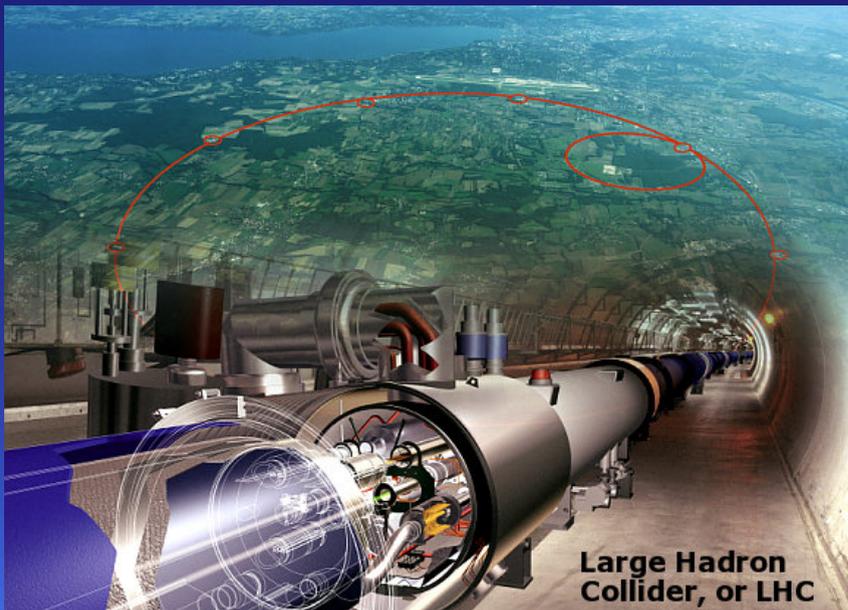
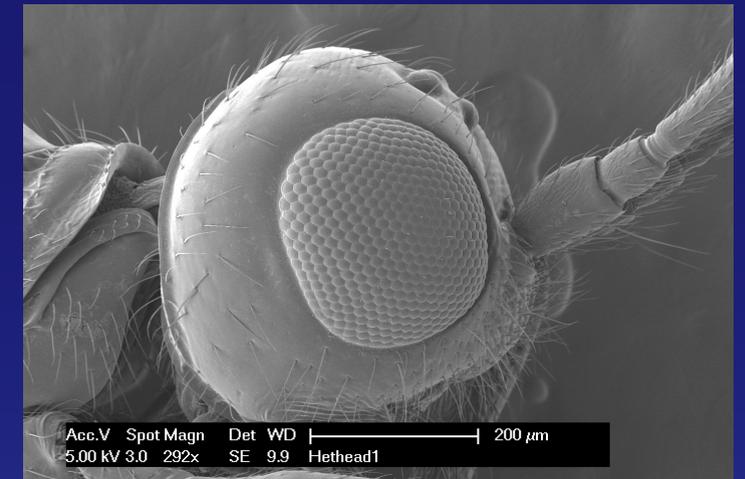
► Mit dem LHC “schauen” wir in das Universum als es $\sim 10^{-10}$ Sekunden alt war

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
($p = \sqrt{(E_{\text{kin}} + mc^2)^2 - m^2c^4}/c$)

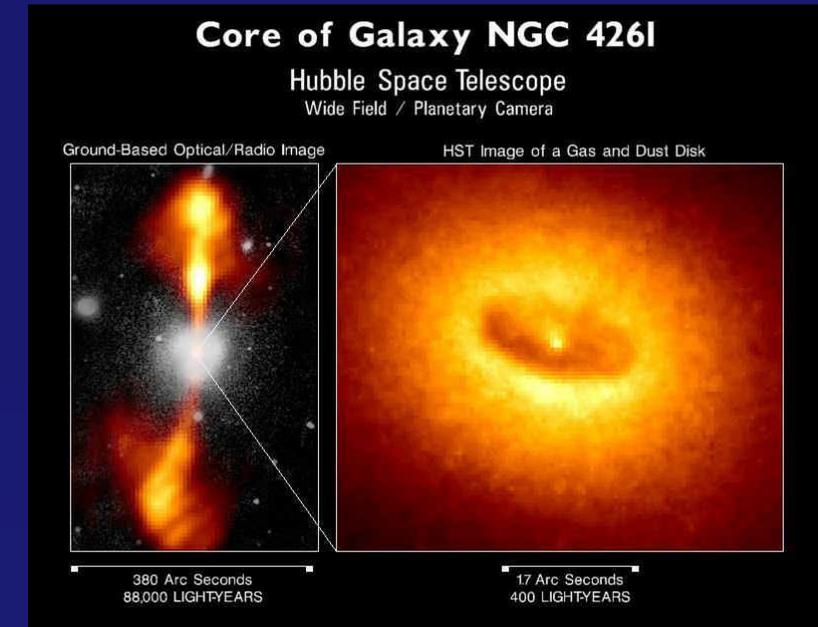
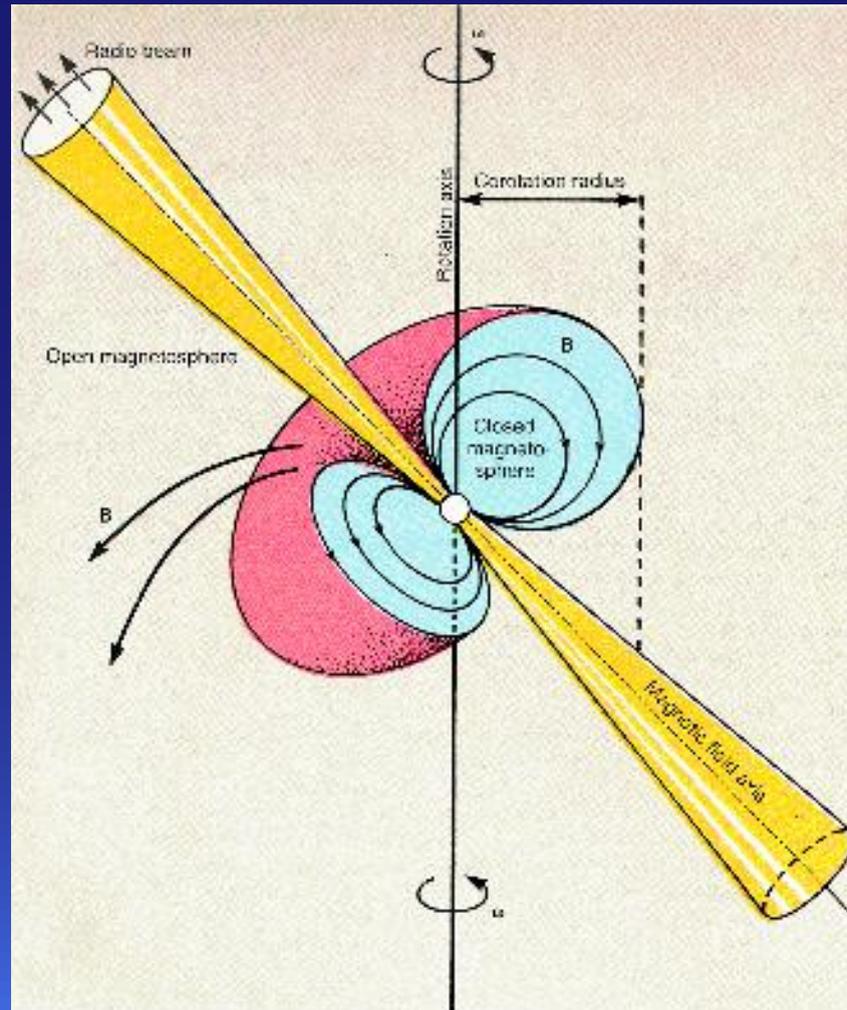


- LHC: Protonen werden auf $p = 7$ TeV/c beschleunigt
- Theoretische Auflösung bis $\lambda = h/p = 1.8 \times 10^{-10}$ nm

Kosmische Beschleuniger

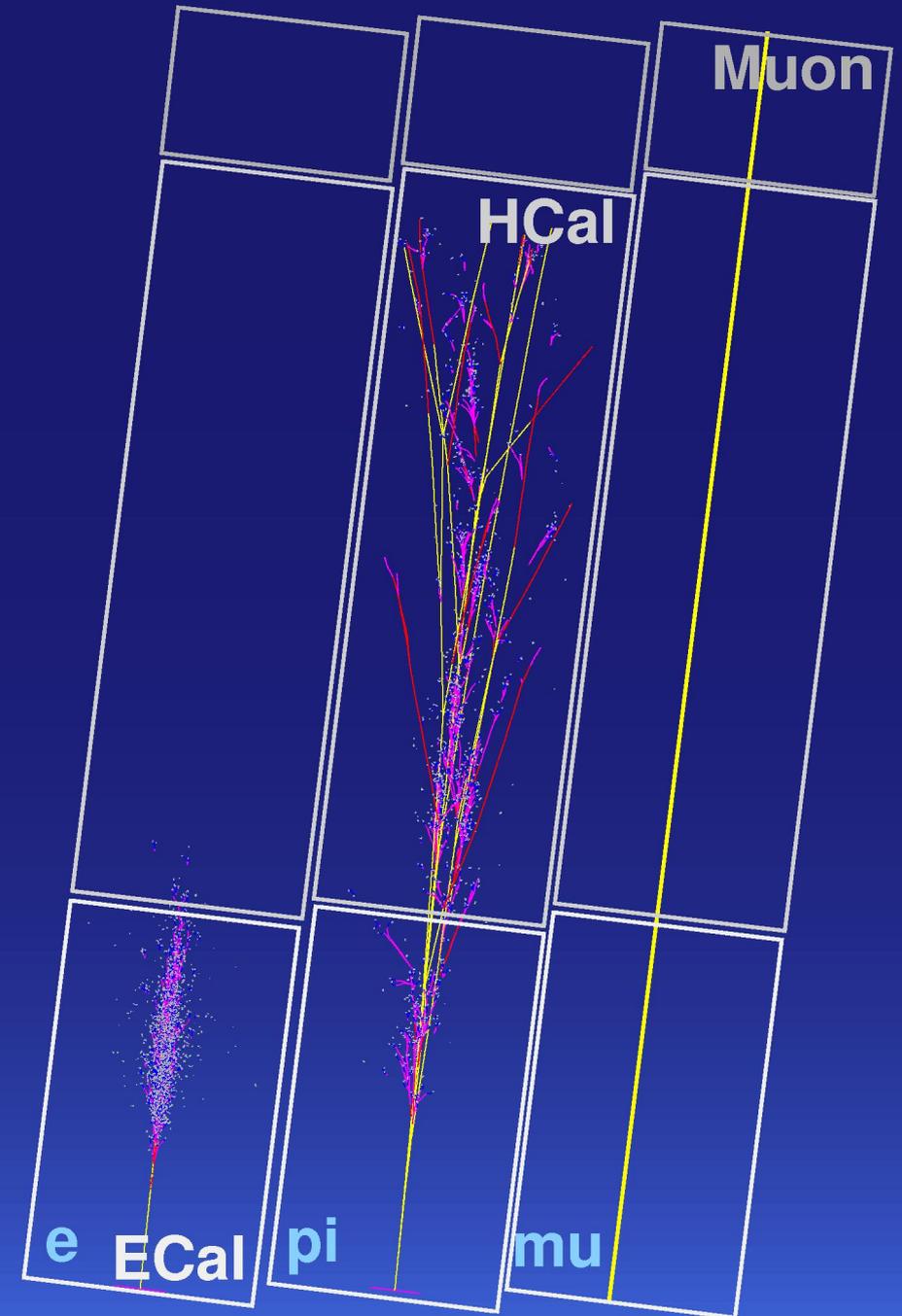
► Es gibt noch stärkere Beschleuniger als den LHC ...

- 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



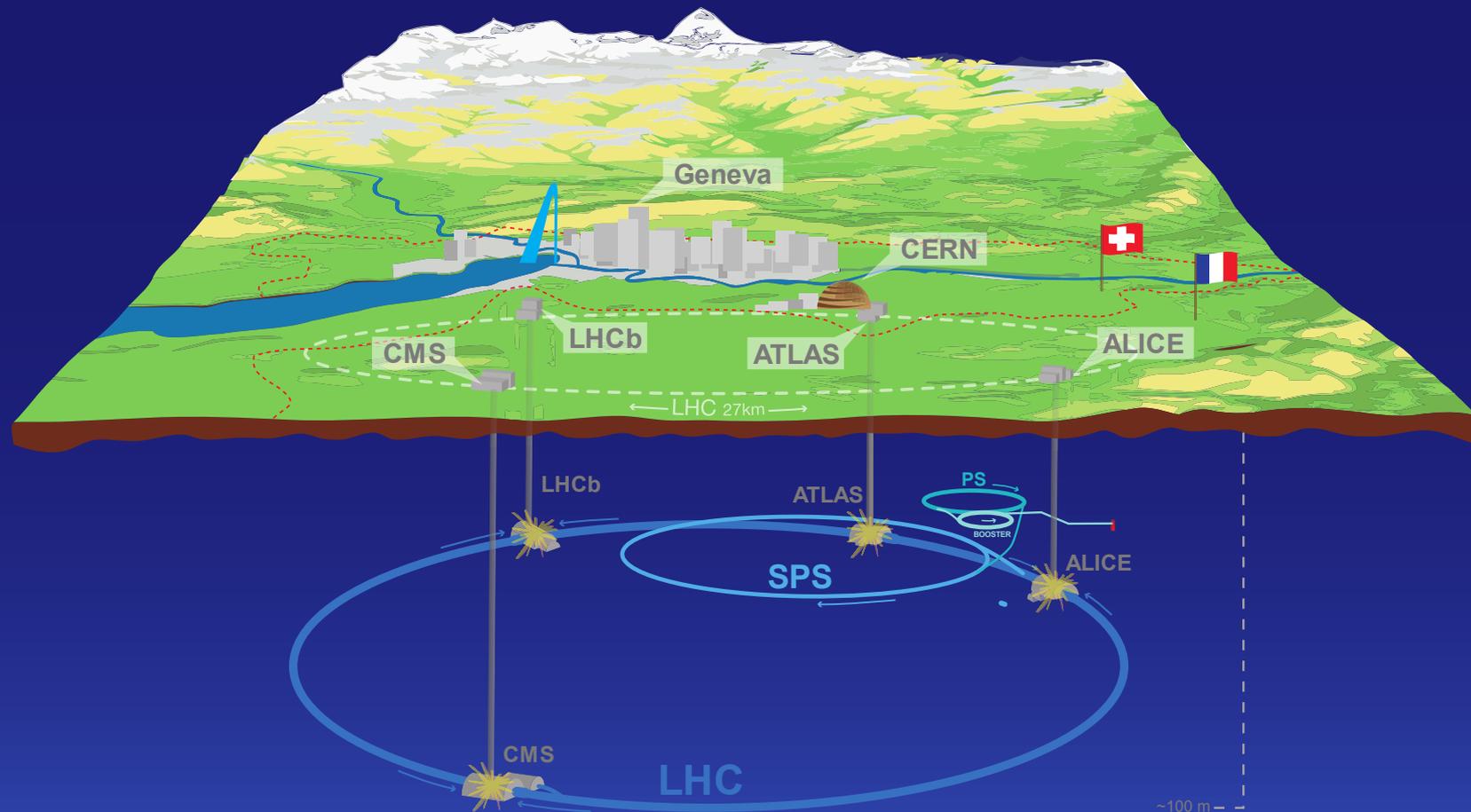
- ▶ Alle Teilchendetektoren basieren auf der Messung der Wechselwirkung des Teilchens mit Materie
 - Die Wechselwirkung beeinflusst natürlich auch das Teilchen selbst
 - ▶ Wichtiges Kriterium für den Aufbau eines Detektors
- ▶ Ganz grob kann man die meisten Detektoren in drei Klassen aufteilen
 - 1. 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

- ▶ 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

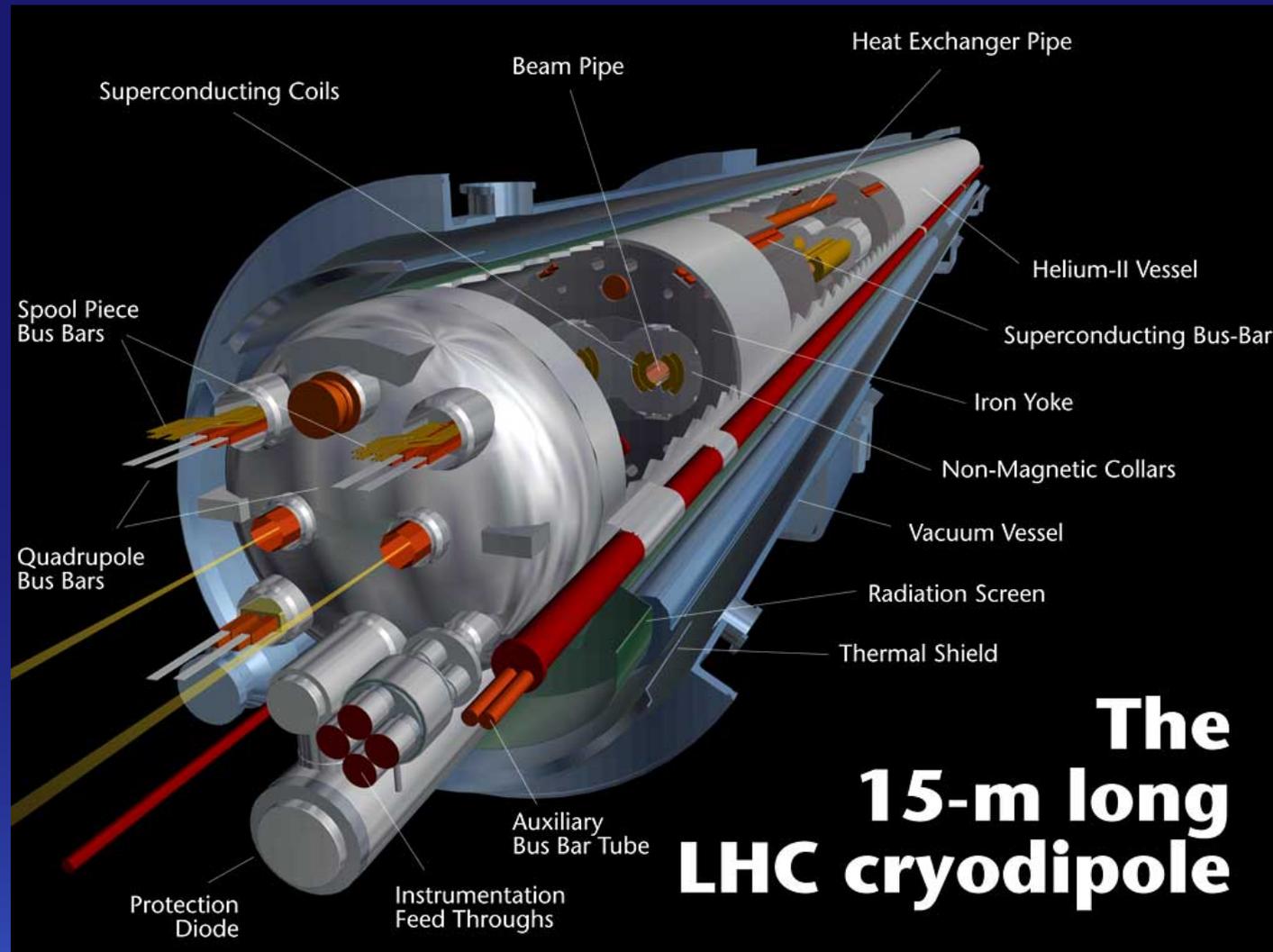


- ▶ Erster Betrieb September 2008
- ▶ Unfall kurz nach Inbetriebnahme
 - ▶ Reparatur bis Ende 2009
- ▶ Ende 2009 - Anfang 2013 stabiler Betrieb
 - ▶ Pause bis 2015, um auf 13 TeV umzustellen
- ▶ Mitte 2015 - Ende 2018 stabiler Betrieb

- ▶ Momentan Pause bis Ende 2021, um auf 14 TeV umzustellen

Der Large Hadron Collider LHC

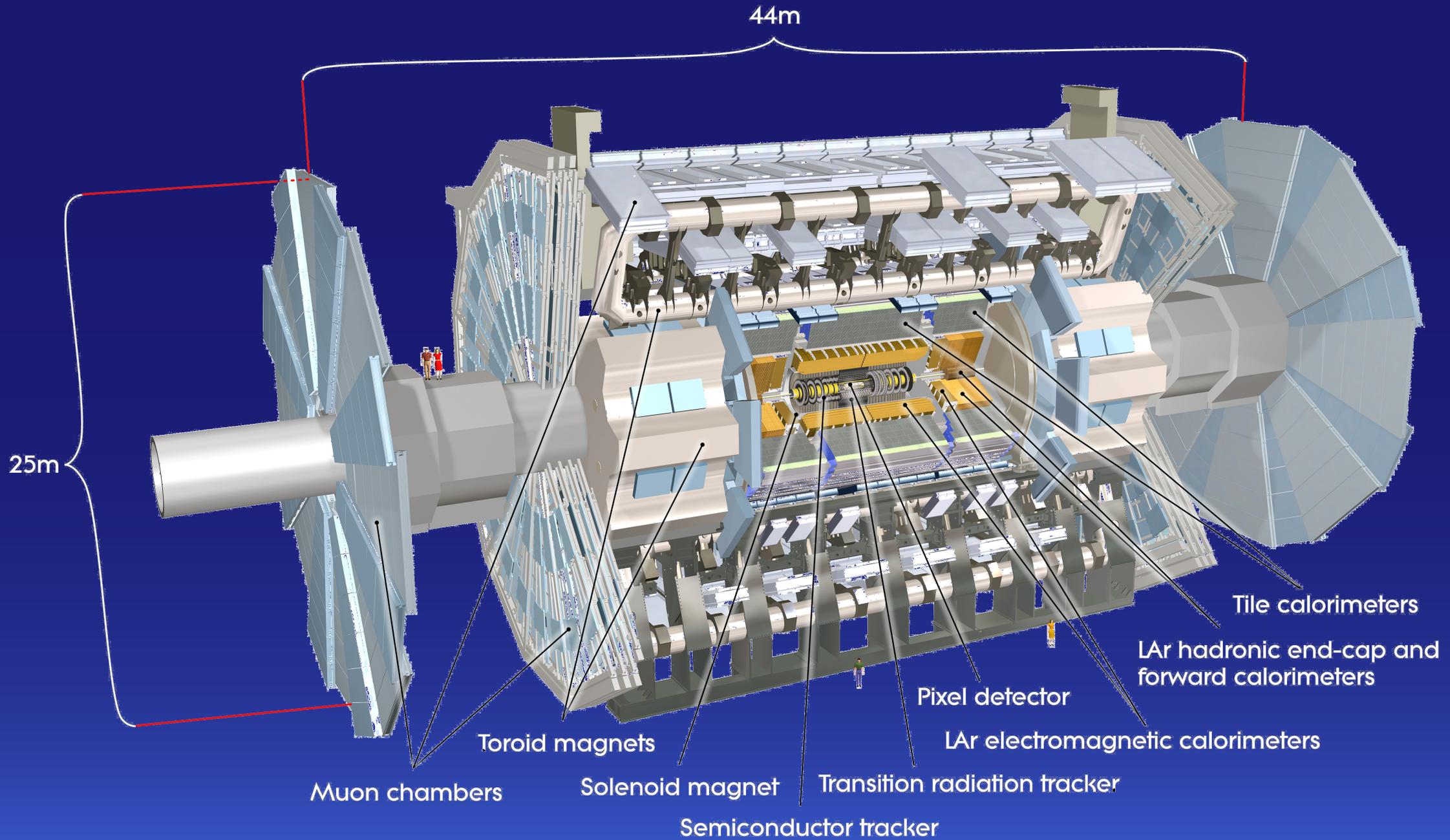
- ▶ 1232 supraleitende Dipole (jeder 15 m lang)



- ▶ 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

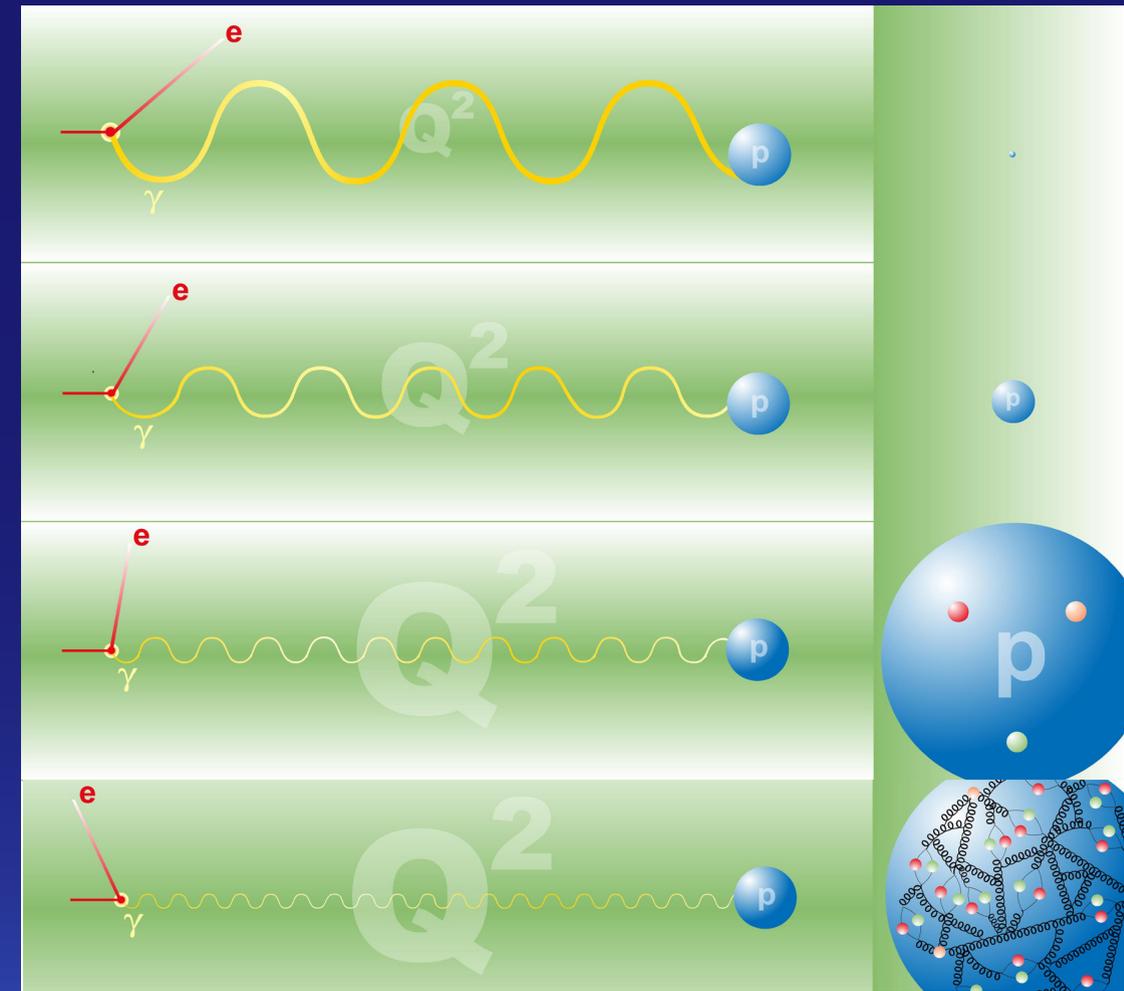
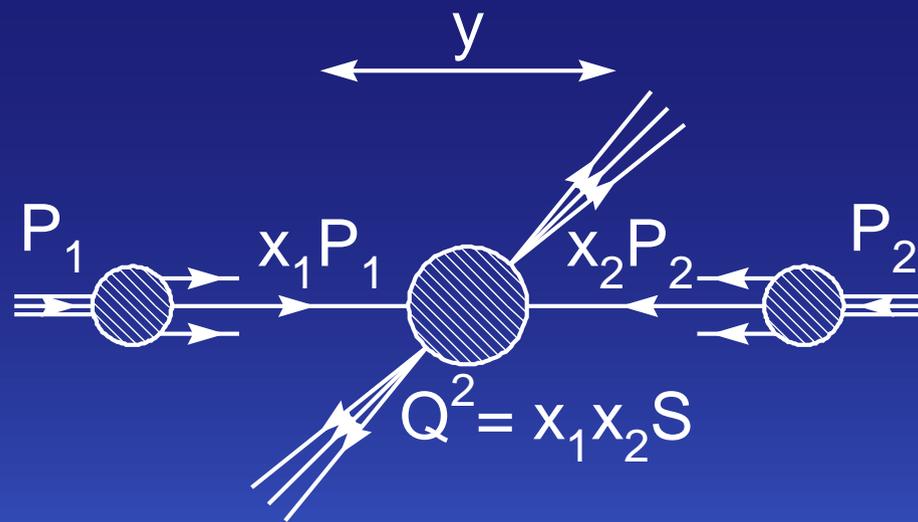
Der ATLAS Detektor



A Toroidal LHC Apparatus: 25 m hoch; 44 m lang; 7000 t schwer

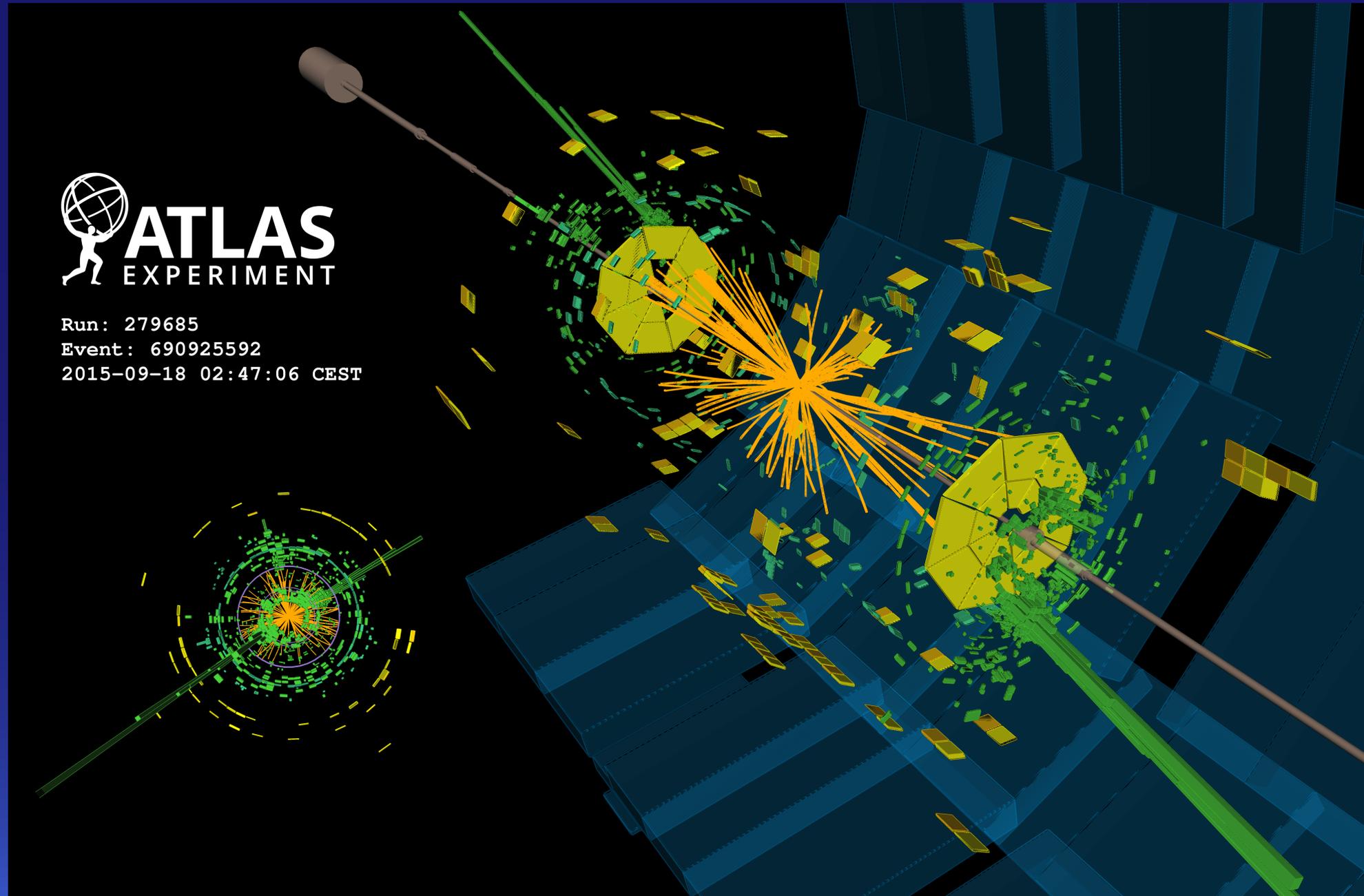
ATLAS Analyse

- ▶ 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

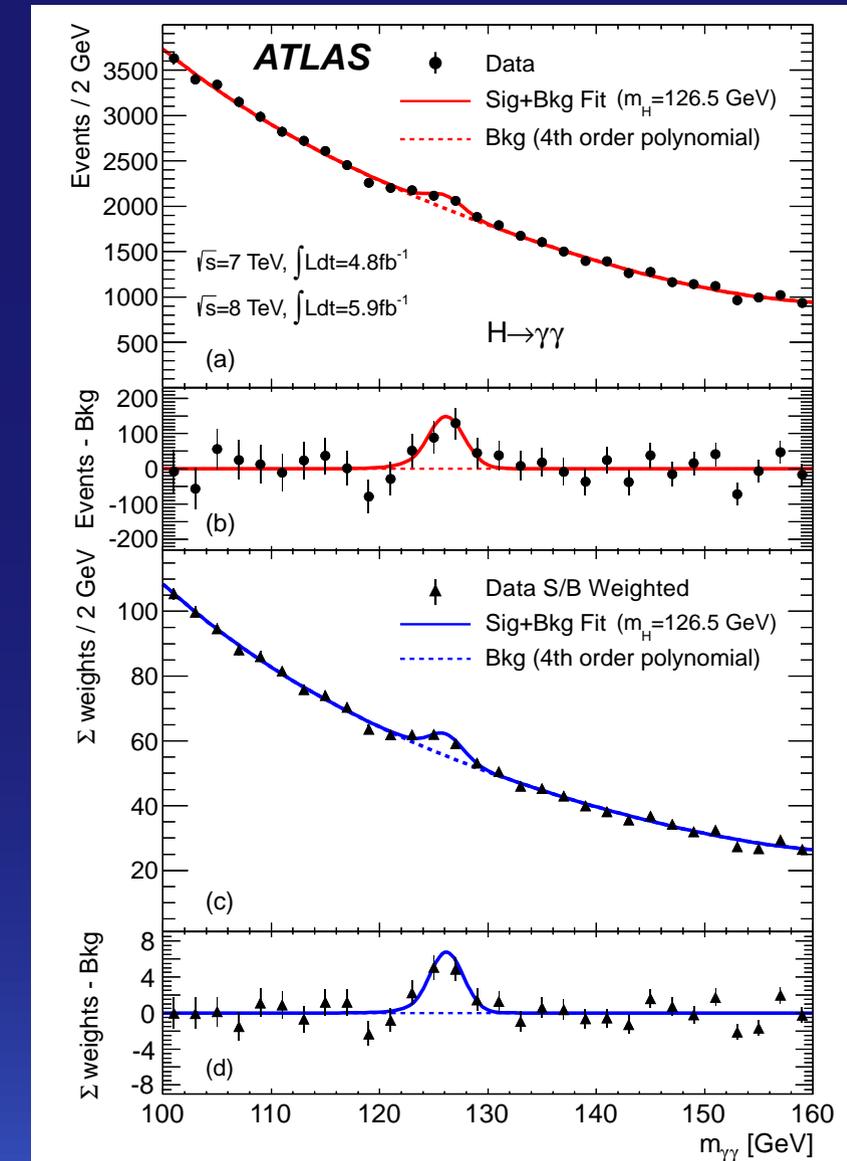
► Die Entdeckung neuer Teilchen ist mit einem Würfelexperiment vergleichbar:

- 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 125 GeV
- Die Beobachtung ist mit einem Higgs-Boson, das in 2 Photonen zerfällt, verträglich

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



▶ Motivationen für Theorien jenseits des Standard-Modells

▶ Hochenergiephysik

- Vereinheitlichung der Wechselwirkungen benötigt neue Teilchen
 - ▶ Supersymmetrie?
- Ladungssymmetrie zwischen Proton und Elektron, Massenhierarchie der Teilchen etc. können im Standard-Modell nicht erklärt werden
 - ▶ Supersymmetrie?

▶ Hochenergiephysik und Kosmologie

- CP -Verletzung im Quarksektor reicht nicht aus, um Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären
 - ▶ es muss früher sehr viel schwerere Teilchen gegeben haben, die Baryon-zahl-, Lepton-zahl- und CP -verletzend zerfallen

▶ Kosmologie

- Baryonische Materie macht nur $\sim 16\%$ der Materie im Universum aus
 - ▶ „Dunkle Materie“?
- Baryonische und Dunkle Materie machen nur $\sim 31\%$ der Energie im Universum aus
 - ▶ „Dunkle Energie“?

Massenhierarchie der Fermionen

▶ Neutrinomassen:

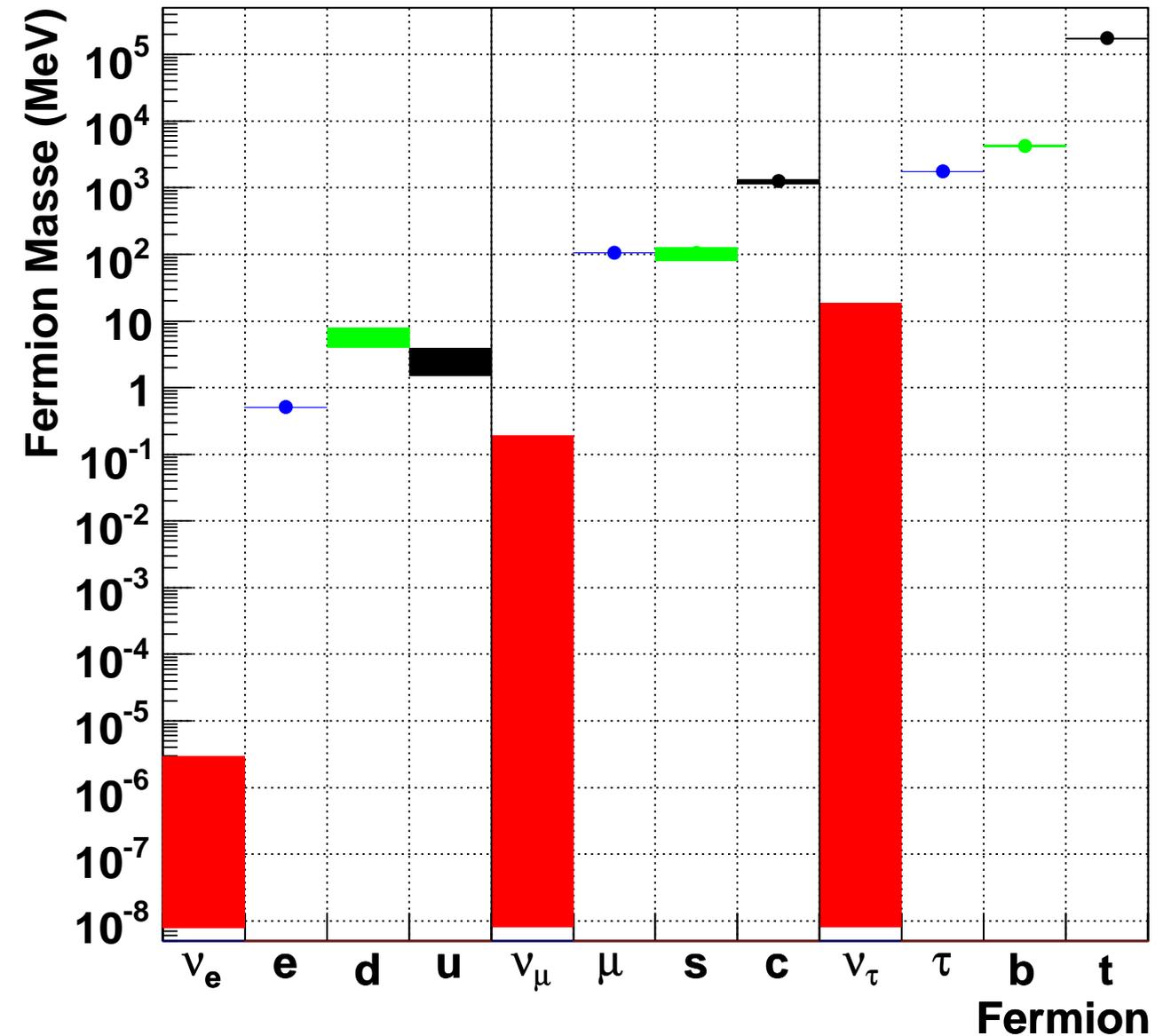
- Obergrenzen aus direkten Messungen (z.B. Endpunkt des Energiespektrums beim β -Zerfall von Tritium für m_{ν_e})
- Neutrinooszillationen: $m_{\nu} \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ eV}$
- Kosmologische Grenze: $\sum m_{\nu} < 1 \text{ eV}$

▶ Quarkmassen:

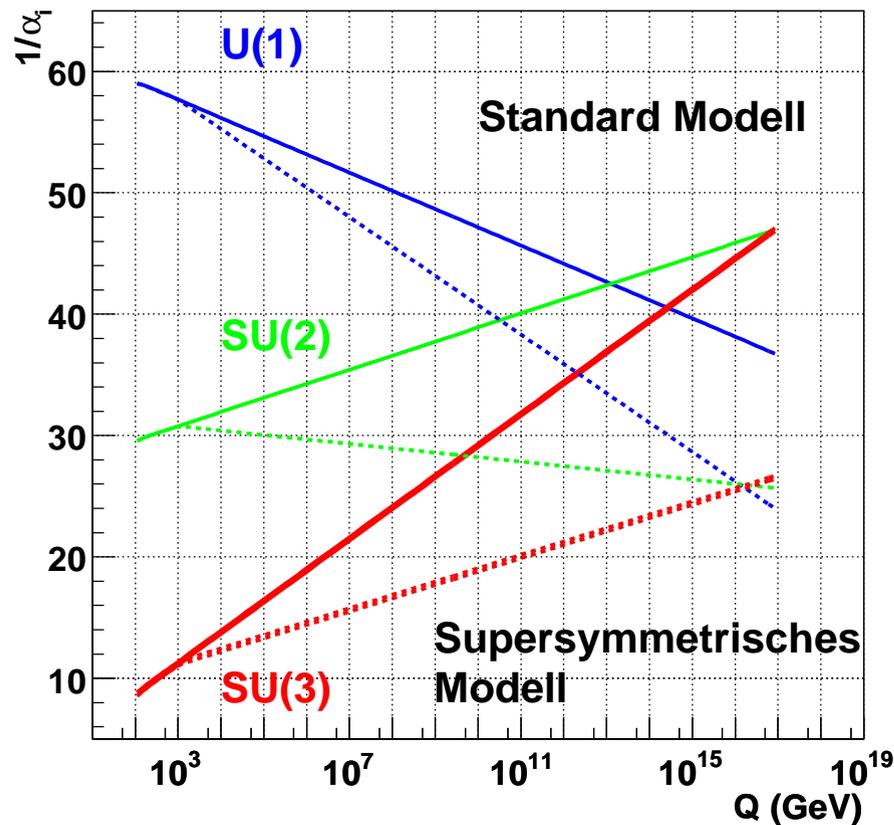
- u-Quark leichter als d-Quark!
 - ▶ Protonstabilität
- t-Quarkmasse am besten gemessen (keine t-Mesonen)
- die anderen Quarkmassen sind nur indirekt zugänglich (Confinement)

▶ Leptonmassen:

- sehr genau gemessen
- auffallend ist ähnliche Struktur wie im Quarksektor (3 Familien, starke Massenhierarchie)



Vereinheitlichung der Wechselwirkungen



- ▶ Einführung neuer Teilchen (hier Supersymmetrie @ ~ 1000 GeV) vereinigt die Kopplungen bei $\approx 10^{16}$ GeV

▶ Standard-Modell: $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

- $U(1)$: Renormierungsgruppe der elektromagnetischen Wechselwirkung
- $SU(2)$: Renormierungsgruppe der schwachen Wechselwirkung
- $SU(3)$: Renormierungsgruppe der starken Wechselwirkung

▶ Kopplungen α_i , $i = 1, 2, 3$ „laufen“ mit der Energieskala an der sie beobachtet werden

▶ $\alpha_i^{-1}(Q) = \alpha_i^{-1}(Q_0) + \frac{\beta_i}{2\pi} \log \frac{Q}{Q_0}$

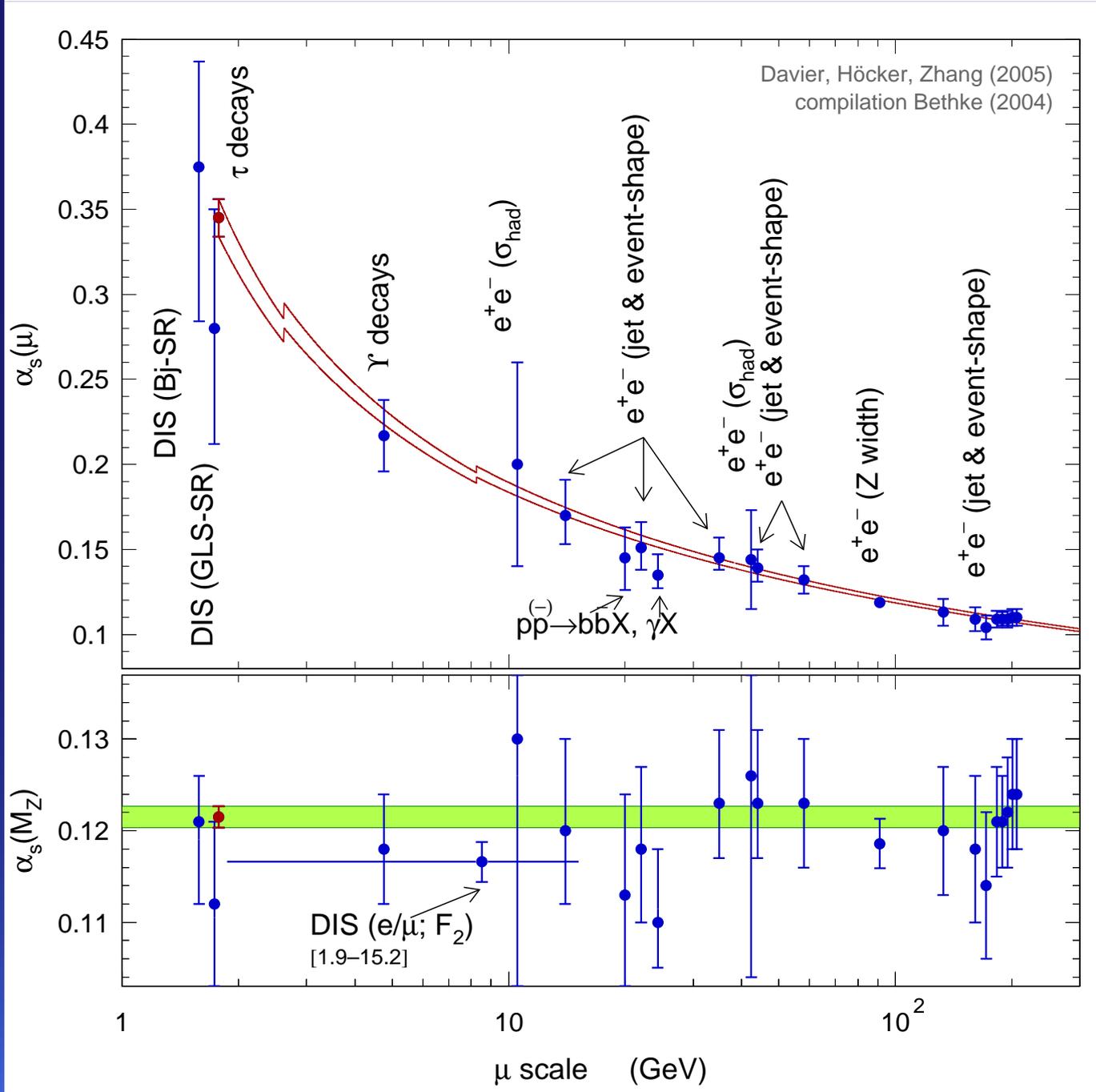
- $\alpha_1 = \frac{5}{3} \frac{\alpha_{\text{QED}}}{\sin^2 \theta_W} \approx \frac{1}{59} @ Q = m_Z$
- $\alpha_2 = \alpha_{\text{weak}} = \frac{\alpha_{\text{QED}}}{\cos^2 \theta_W} \approx \frac{1}{29.5} @ Q = m_Z$
- $\alpha_3 = \alpha_{\text{strong}} \approx \frac{1}{8.4} @ Q = m_Z$

▶ Kopplungen treffen sich fast im Standard-Modell

- $\beta_1 = -\frac{2}{3} \left(\sum \left(\sqrt{\frac{5}{3}} \frac{Y_W}{2} \right)^2 = 6 \frac{3}{20} \right)$
- $\beta_2 = \frac{22}{3} - \frac{2}{3} (N_f^2 = 6) - \frac{1}{6} (N_h = 1)$
- $\beta_3 = 11 - \frac{2}{3} (N_f^3 = 6)$

Beispiel fuer das „Laufen“ einer Kopplung: α_s

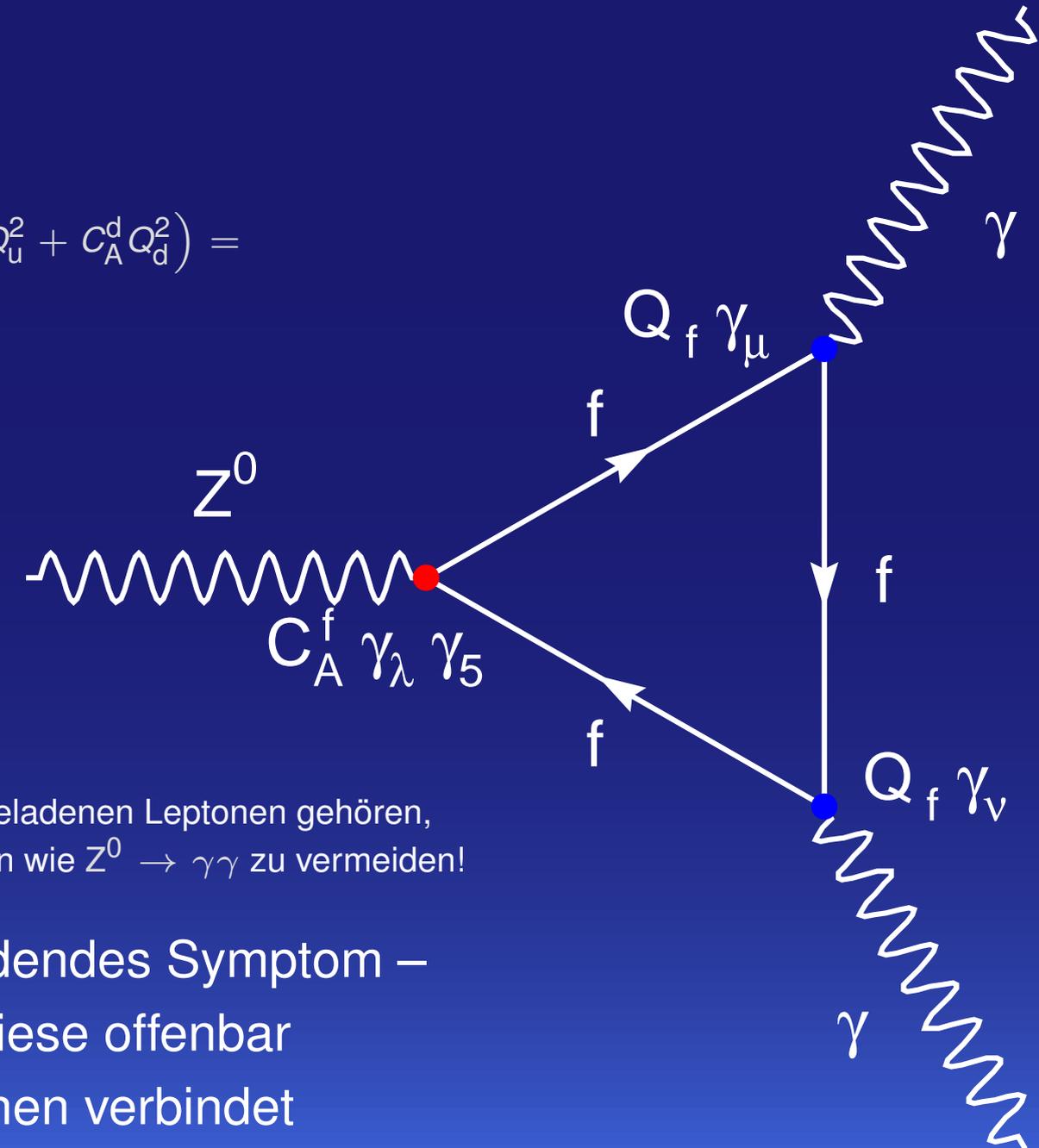
- ▶ Vergleich verschiedener Messungen von $\alpha_s(\mu)$ bei verschiedenen Energien μ
- ▶ Die Kopplungskonstante „läuft“ von 0.345 bei der τ -Lepton Masse bis auf 0.121 bei der Z^0 -Masse
- ▶ Alle Messungen bestätigen den theoretischen Verlauf des „Laufens“, den die β -Funktion beschreibt



Warum gibt es genau 3 Generationen?

► Dreiecksanomalien:

- Warum zerfällt das Z^0 **nicht** in 2 Photonen?
- Summe der Ladungsquadrate aller Fermionen muss verschwinden
- Funktioniert in jeder Generation: $C_A^{\nu_e} Q_{\nu_e}^2 + C_A^e Q_e^2 + N_{\text{color}} (C_A^u Q_u^2 + C_A^d Q_d^2) =$
 $\frac{1}{2}(0)^2 - \frac{1}{2}(-1)^2 + 3 \left(\frac{1}{2} \left(+\frac{2}{3}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right) = 0$



- Da bei LEP genau 3 leichte Neutrinos gefunden wurden, die zu 3 geladenen Leptonen gehören, muss es genau 3 Quarkgenerationen geben, um Dreiecksanomalien wie $Z^0 \rightarrow \gamma\gamma$ zu vermeiden!

- ## ► Aber: Dreiecksanomalien sind nur ein zu vermeidendes Symptom –
- Im Standard-Modell gibt es keine Erklärung für diese offenbar fundamentale Symmetrie, die Quarks und Leptonen verbindet

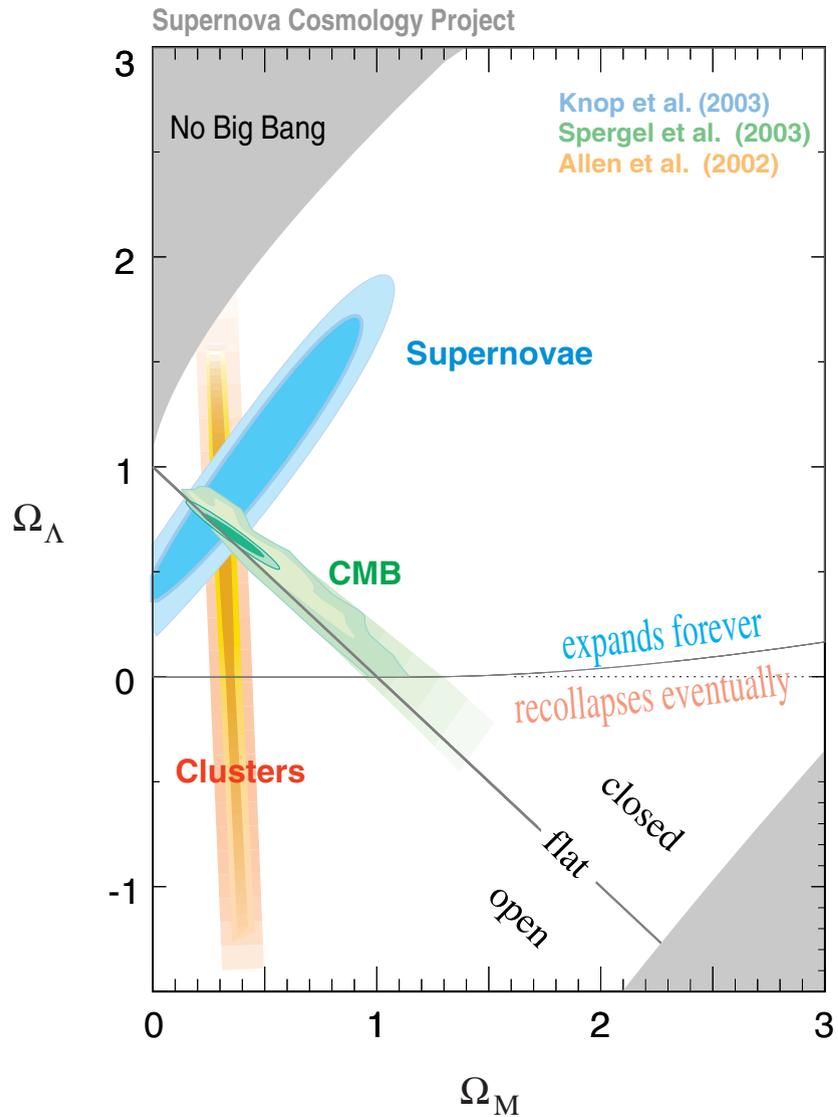
▶ Die Kosmische Summenregel: $\Omega_\Lambda + \Omega_M + \Omega_K = 1$

- $\Omega_i = \frac{\text{Dichte}_i}{\text{kritische Dichte } \rho_c}$:
- $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$: Vakuum Energiedichte
- $\Omega_M = \frac{8\pi G\rho_M}{3H_0^2}$: Materiedichte
- $\Omega_K = -\frac{K}{a_0^2 H_0^2}$: Raumkrümmung

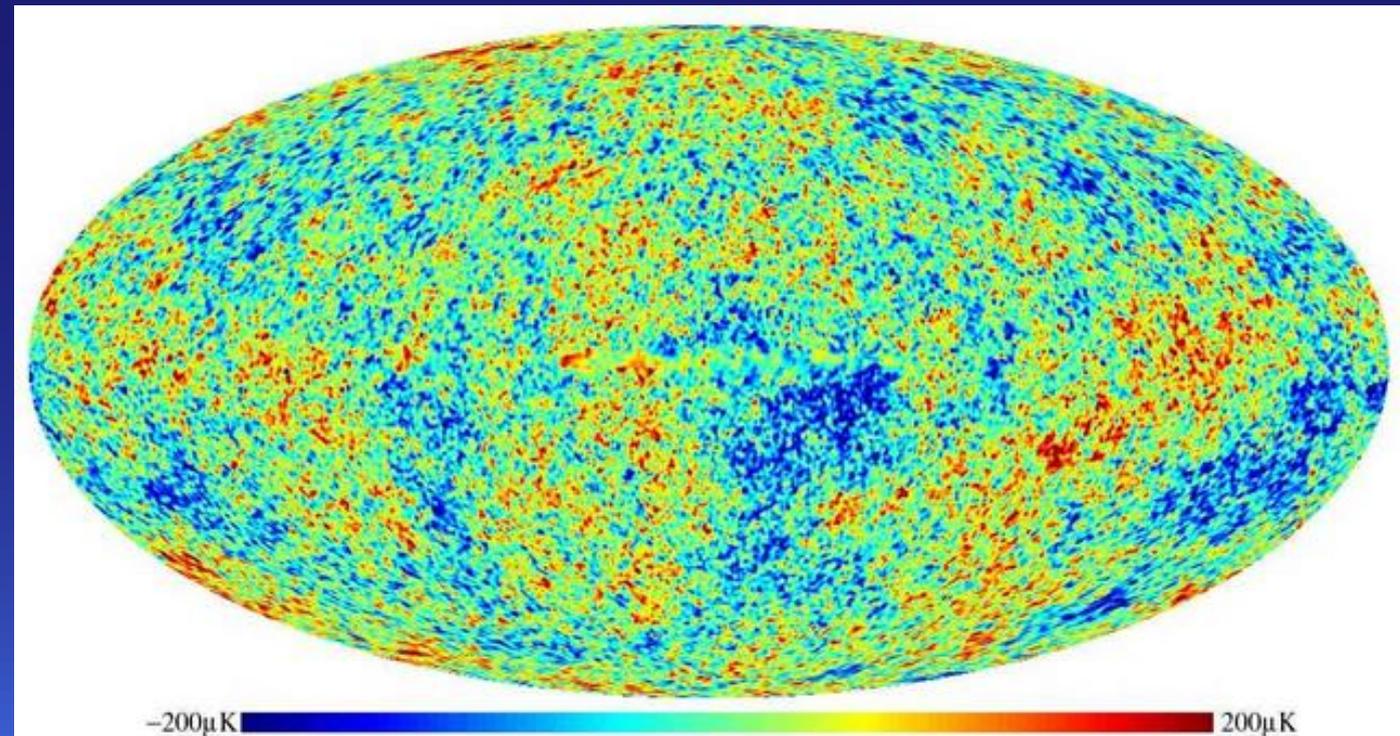
▶ Mit den Parametern:

- Hubble Konstante (Expansionsrate): $H_0 = \frac{\dot{a}}{a}$
- Kritische Dichte: $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 6 \frac{\text{GeV}}{\text{m}^3}$
- Krümmung: $K = -1$ (offen), 0 (flach), $+1$ (geschlossen)
- Ausdehnung: a_0

Kosmologische Beobachtungen



- ▶ Rotverschiebung und Luminosität von Supernovae
 - ▶ Das Universum dehnt sich aus: $H_0 \approx 68 \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}$
- ▶ Temperaturschwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung
 - ▶ Das Universum ist flach: $\Omega_K \approx 0$; baryonische Materie macht nur einen geringen Teil der Energiedichte aus: $\Omega_B \approx 4.9\%$, $N_B \approx 6 \times 10^{-10} N_\gamma$
- ▶ Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien
 - ▶ Dunkle Materie macht den Hauptteil der Masse der Galaxien aus: $\Omega_B \approx 16\% \Omega_M$
- ▶ Gravitationslinsen
- ▶ Strukturen im Universum



▶ $\Omega_\Lambda \approx 0.69$; $\Omega_M \approx 0.31$

- ▶ Dunkle Materie existiert! ▶ aber woraus besteht sie?
 - schwach wechselwirkend
 - sehr schwere oder extrem leichte Teilchen
 - sonst wären sie bereits identifiziert worden
- ▶ Dunkle Energie existiert auch! ▶ aber noch schwieriger zu identifizieren als Dunkle Materie
 - macht sogar den Hauptteil der Energiedichte im Universum aus
 - kosmologische Konstante?
- ▶ Suche nach Dunkler Materie z.B. mit CRESST (WIMPS) oder mit MADMAX (Axionen)
- ▶ Das leichteste stabile Teilchen in supersymmetrischen Modellen ist ein Kandidat für Dunkle Materie
 - ▶ Suche nach SUSY am LHC
- ▶ Baryogenese in CP -verletzender Vernichtung von Materie und Antimaterie
 - ▶ Suche nach Protonzerfall

► Mögliche Lösungen:

- Supersymmetrie: Beseitigt viele Divergenzen, denn zu jedem divergenten loop von Bosonen (Fermionen) gibt es einen ebenso divergenten aber mit umgekehrten Vorzeichen versehenen loop des fermionischen (bosonischen) Super-Partners
- GUT: Vereinheitlichung der Wechselwirkungen führt bei sehr hohen Energien wieder zu einer kleiner werdenden Kopplungskonstanten (asymptotische Freiheit)
- Extradimensionen: durch Erweiterung der Gravitation auf zusätzliche („aufgerollte“) Raumdimensionen wird die tatsächliche Planck-Skala stark erniedrigt
- Technicolor, und andere Theorien ...

► Keine dieser möglichen Lösungen ist bis heute gefunden oder widerlegt

► Der Bereich bis einige TeV ist sehr interessant, da sich hier viele der vorgeschlagenen Teilchen befinden müssen!

► Gute Aussichten für neue Entdeckungen am LHC!



Wie wird man Elementarteilchenphysiker?

- ▶ Am Beispiel von Sven Menke
- ▶ 1987: Abitur
- ▶ 1989 – 1993: Physikstudium an der Uni Bonn
- ▶ 1994: Diplom in Physik
 - Entwicklung eines Datennahmesystems 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