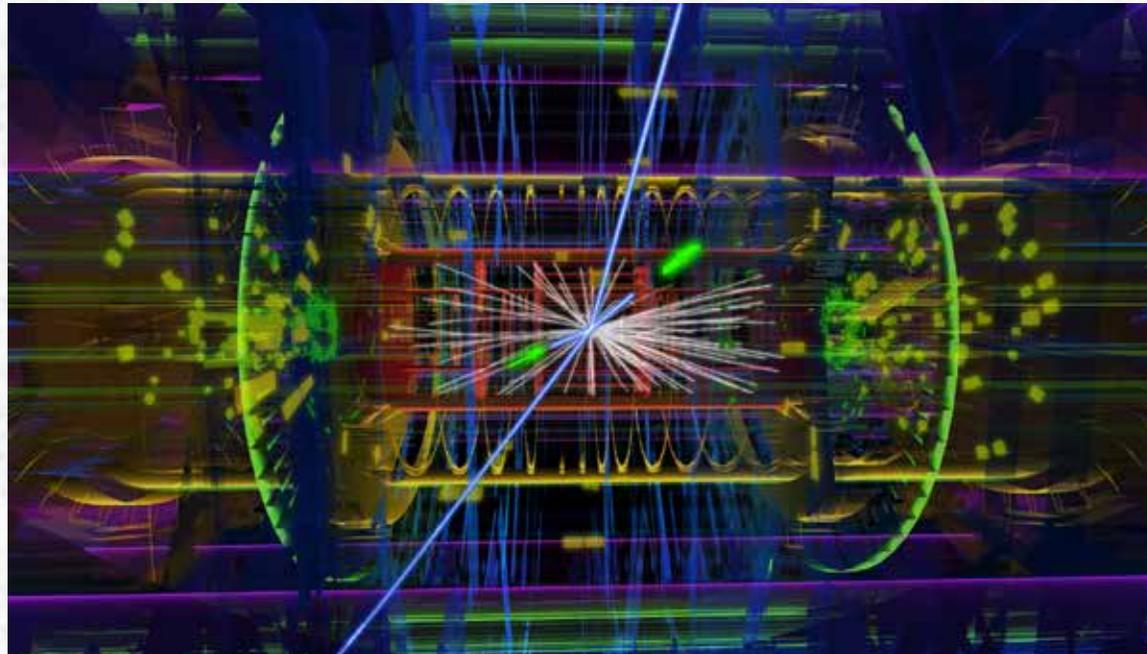
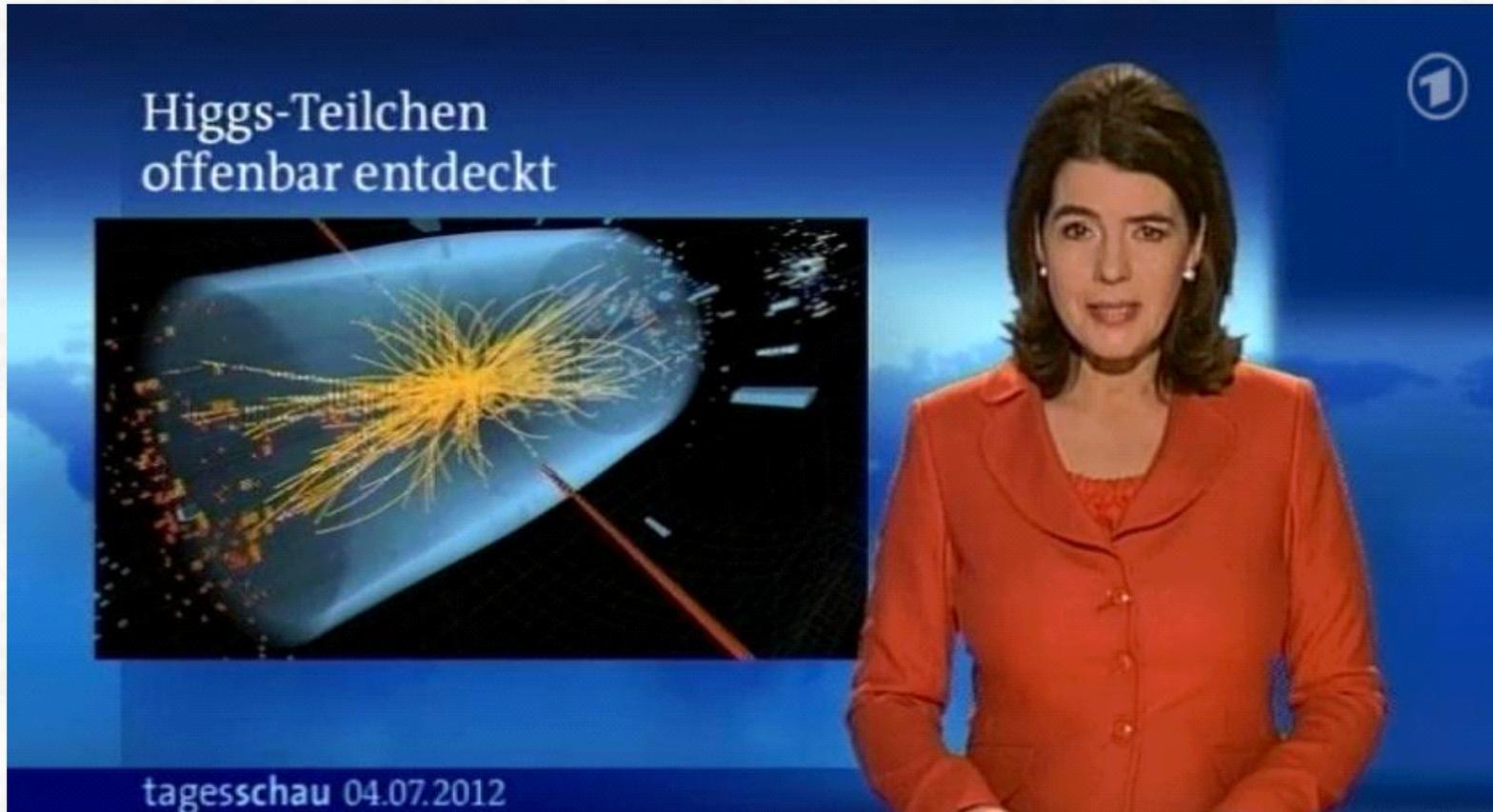


# ***Die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN und Kooperation in der Teilchenphysik***



Prof. Karl Jakobs  
Physikalisches Institut  
Universität Freiburg

4. Juli 2012





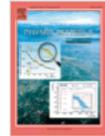
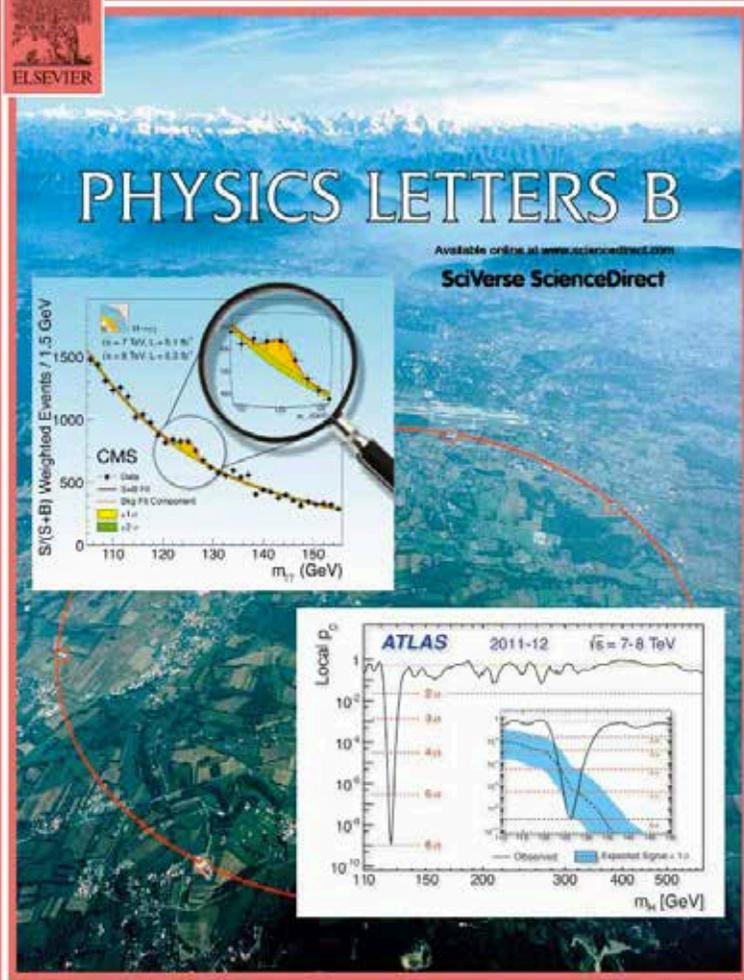
From the editorial:

*“The top Breakthrough of the Year – the discovery of the Higgs boson – was an unusually easy choice, representing both a triumph of the human intellect and the culmination of decades of work by many thousands of physicists and engineers.”*

Nobel-Preis für Physik (2013)



François Englert und Peter Higgs



## Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ☆

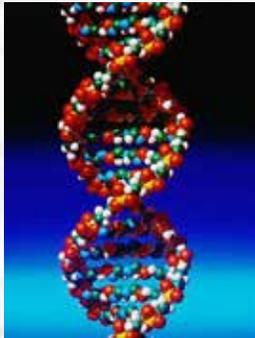
Universally Available

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ATLAS Collaboration\*

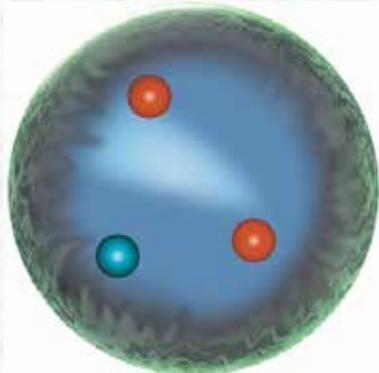
G. Aad<sup>48</sup>, T. Abajyan<sup>21</sup>, B. Abbott<sup>111</sup>, J. Abdallah<sup>12</sup>, S. Abdel Khalek<sup>115</sup>, A.A. Abdelalim<sup>49</sup>, O. Abdinov<sup>11</sup>, R. Aben<sup>105</sup>, B. Abi<sup>112</sup>, M. Abolins<sup>88</sup>, O.S. AbouZeid<sup>158</sup>, H. Abramowicz<sup>153</sup>, H. Abreu<sup>136</sup>, B.S. Acharya<sup>164a, 164b</sup>, L. Adamczyk<sup>38</sup>, D.L. Adams<sup>25</sup>, T.N. Addy<sup>56</sup>, J. Adelman<sup>176</sup>, S. Adomeit<sup>98</sup>, P. Adragna<sup>75</sup>, T. Adye<sup>129</sup>, S. Aefsky<sup>23</sup>, J.A. Aguilar-Saavedra<sup>124b, a</sup>, M. Agustoni<sup>17</sup>, M. Aharrouche<sup>81</sup>, S.P. Ahlen<sup>22</sup>, F. Ahles<sup>48</sup>, A. Ahmad<sup>148</sup>, M. Ahsan<sup>41</sup>, G. Aielli<sup>133a, 133b</sup>, T. Akdogan<sup>19a</sup>, T.P.A. Åkesson<sup>79</sup>, G. Akimoto<sup>155</sup>, A.V. Akimov<sup>94</sup>, M.S. Alam<sup>2</sup>, M.A. Alam<sup>76</sup>, J. Albert<sup>169</sup>, S. Albrand<sup>55</sup>, M. Aleksa<sup>30</sup>, I.N. Aleksandrov<sup>64</sup>, F. Alessandria<sup>89a</sup>, C. Alexa<sup>26a</sup>, G. Alexander<sup>153</sup>, G. Alexandre<sup>49</sup>, T. Alexopoulos<sup>10</sup>, M. Alhroob<sup>164a, 164c</sup>, M. Aliev<sup>16</sup>, G. Alimonti<sup>89a</sup>, J. Alison<sup>120</sup>, B.M.M. Allbrooke<sup>18</sup>, P.P. Allport<sup>73</sup>, S.E. Allwood-Spiers<sup>53</sup>, J. Almond<sup>82</sup>, A. Aloisio<sup>102a, 102b</sup>, R. Alon<sup>172</sup>, A. Alonso<sup>79</sup>, F. Alonso<sup>70</sup>, A. Altheimer<sup>35</sup>, B. Alvarez Gonzalez<sup>88</sup>, M.G. Alvigi<sup>102a, 102b</sup>, K. Amako<sup>65</sup>, C. Amelung<sup>23</sup>, V.V. Ammosov<sup>128, \*</sup>, S.P. Amor Dos Santos<sup>124a</sup>, A. Amorim<sup>124a, b</sup>, N. Amram<sup>153</sup>, C. Anastopoulos<sup>30</sup>, L.S. Ancu<sup>17</sup>, N. Andari<sup>115</sup>, T. Andeen<sup>35</sup>, C.F. Anders<sup>58b</sup>, G. Anders<sup>58a</sup>, K.J. Anderson<sup>31</sup>, A. Andreazza<sup>89a, 89b</sup>, V. Andrei<sup>58a</sup>, M.-L. Andrieux<sup>55</sup>, X.S. Anduaga<sup>70</sup>, S. Angelidakis<sup>9</sup>, P. Anger<sup>44</sup>, A. Angerami<sup>35</sup>, F. Anghinolfi<sup>30</sup>, A. Anisenkov<sup>107</sup>, N. Anjos<sup>124a</sup>, A. Annovi<sup>47</sup>, A. Antonaki<sup>9</sup>, M. Antonelli<sup>47</sup>, A. Antonov<sup>96</sup>, J. Antos<sup>144b</sup>, F. Anulli<sup>132a</sup>, M. Aoki<sup>101</sup>, S. Aoun<sup>83</sup>, L. Aperio Bella<sup>5</sup>, R. Apolle<sup>118, c</sup>, G. Arabidze<sup>88</sup>, I. Aracena<sup>143</sup>, Y. Arai<sup>65</sup>, A.T.H. Arce<sup>45</sup>, S. Arfaoui<sup>148</sup>, J.-F. Arguin<sup>93</sup>, E. Arik<sup>19a, \*</sup>, M. Arik<sup>19a</sup>, A.J. Armbruster<sup>87</sup>, O. Arnaez<sup>81</sup>, V. Arnal<sup>80</sup>, C. Arnault<sup>115</sup>, A. Artamonov<sup>95</sup>, G. Artoni<sup>132a, 132b</sup>, D. Arutinov<sup>21</sup>, S. Asai<sup>155</sup>, S. Ask<sup>28</sup>, B. Åsman<sup>146a, 146b</sup>, L. Asquith<sup>6</sup>, K. Assamagan<sup>25</sup>, A. Astbury<sup>169</sup>, M. Atkinson<sup>165</sup>, B. Aubert<sup>5</sup>, E. Auge<sup>115</sup>, K. Augsten<sup>127</sup>, M. Auresseau<sup>145a</sup>, G. Avolio<sup>163</sup>, R. Avramidou<sup>10</sup>, D. Axen<sup>168</sup>, G. Azuelos<sup>93, d</sup>, Y. Azuma<sup>155</sup>, M.A. Baak<sup>30</sup>, G. Baccaglioni<sup>89a</sup>, C. Bacci<sup>134a, 134b</sup>, A.M. Bach<sup>15</sup>, H. Bachacou<sup>136</sup>, K. Bachas<sup>30</sup>, M. Backes<sup>49</sup>, M. Backhaus<sup>21</sup>, J. Backus Mayes<sup>143</sup>, E. Badescu<sup>26a</sup>, P. Bagnaia<sup>132a, 132b</sup>, S. Bahinipati<sup>3</sup>, Y. Bai<sup>33a</sup>, D.C. Bailey<sup>158</sup>, T. Bain<sup>158</sup>, J.T. Baines<sup>129</sup>, O.K. Baker<sup>176</sup>, M.D. Baker<sup>25</sup>, S. Baker<sup>77</sup>, P. Balek<sup>126</sup>, E. Banas<sup>39</sup>, P. Banerjee<sup>93</sup>, Sw. Banerjee<sup>173</sup>, D. Banfi<sup>30</sup>, A. Bangert<sup>150</sup>, V. Bansal<sup>169</sup>, H.S. Bansil<sup>18</sup>, L. Barak<sup>172</sup>, S.P. Baranov<sup>94</sup>, A. Barbaro Galtieri<sup>15</sup>, T. Barber<sup>48</sup>, E.L. Barberio<sup>86</sup>, D. Barberis<sup>50a, 50b</sup>, M. Barbero<sup>21</sup>, D.Y. Bardin<sup>64</sup>, T. Barillari<sup>99</sup>, M. Barisonzi<sup>175</sup>, T. Barklow<sup>143</sup>, N. Barlow<sup>28</sup>, B.M. Barnett<sup>129</sup>, R.M. Barnett<sup>15</sup>, A. Baroncelli<sup>134a</sup>, G. Barone<sup>49</sup>, A.J. Barr<sup>118</sup>, F. Barreiro<sup>80</sup>, J. Barreiro Guimarães da Costa<sup>57</sup>, P. Barrillon<sup>115</sup>, R. Bartoldus<sup>143</sup>, A.E. Barton<sup>71</sup>, V. Bartsch<sup>149</sup>, A. Basye<sup>165</sup>, R.L. Bates<sup>53</sup>, L.

# Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Einheitliche und umfassende  
Beschreibung der

Materie und ihrer Wechselwirkungen

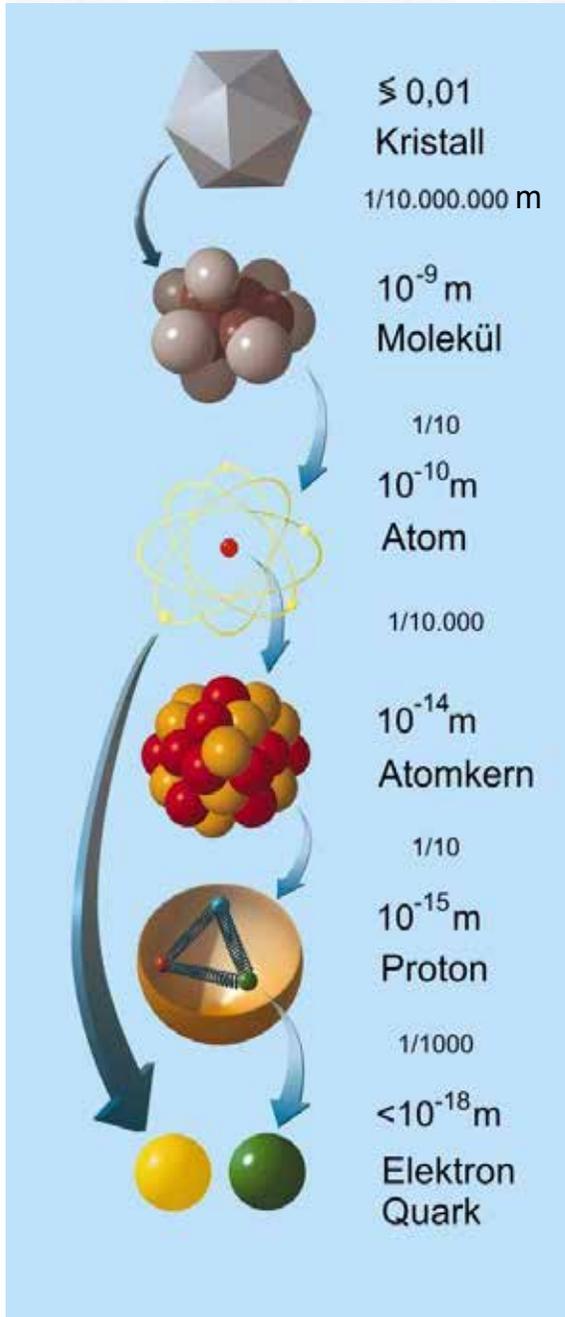


von kleinsten Abständen  
( $10^{-18}$  m)



bis zu kosmischen  
Dimensionen ( $10^{25}$  m)

# Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop  
(Licht)

Elektronenmikroskop  
(Elektronen)

Teilchenbeschleuniger  
(Synchrotron-Strahlung)

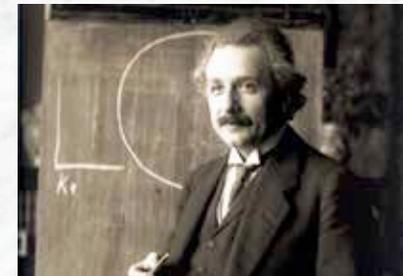
Teilchenbeschleuniger  
(Teilchen hoher Energie)

höhere Energie / Impuls

höhere Auflösung

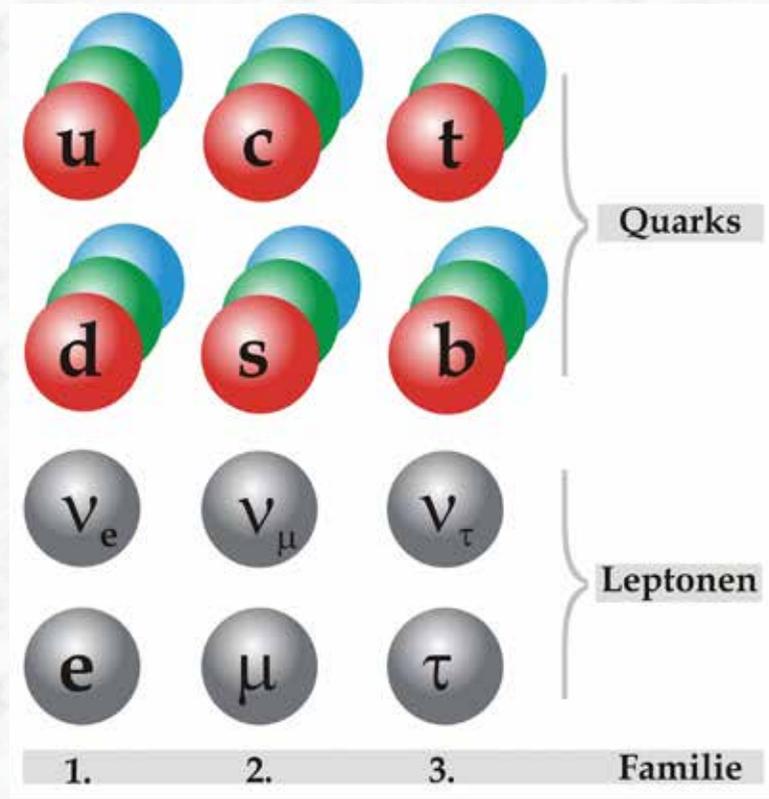


$$\Delta x \propto \frac{1}{p}$$



$$E = mc^2$$

# Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



Massen:

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

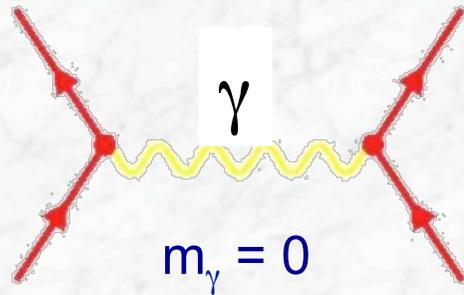
$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,938 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_\mu \approx 200 m_e, \quad m_\tau \approx 3.500 m_e$$

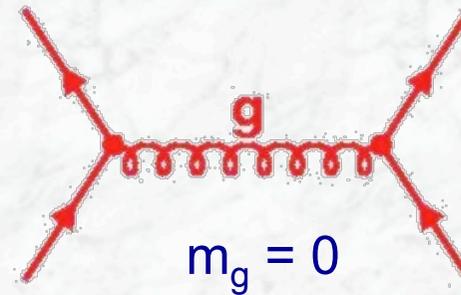
$$m_t \approx 340.000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$$

- Elementare Bausteine: Quarks und Leptonen „punktförmig“ (Ausdehnung  $< 10^{-18} \text{ m}$ )
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an

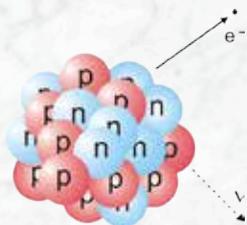
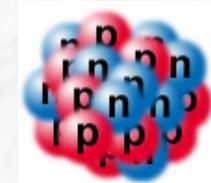
# Die fundamentalen Kräfte



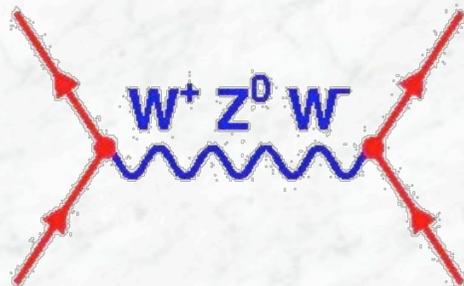
elektromagnetische Kraft



starke Kraft



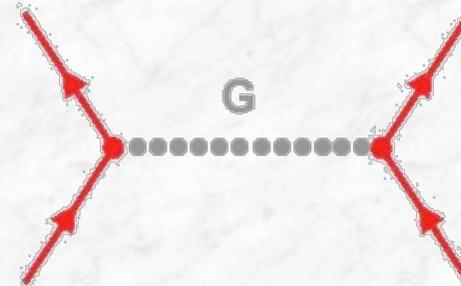
$\beta$ -Zerfall



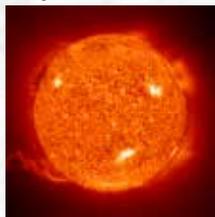
schwache Kraft

$$m_W \approx 80.4 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_Z \approx 91.2 \text{ GeV}/c^2$$



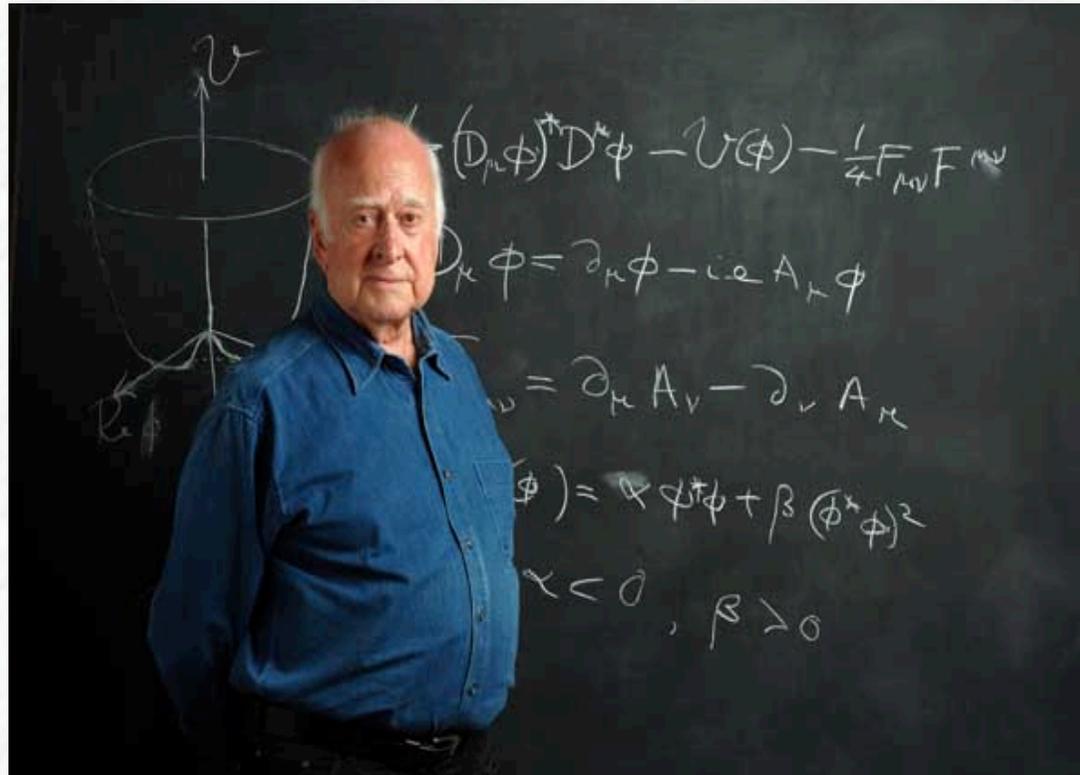
Gravitation



Theoretische Beschreibung: Quantenfeldtheorie  
Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“

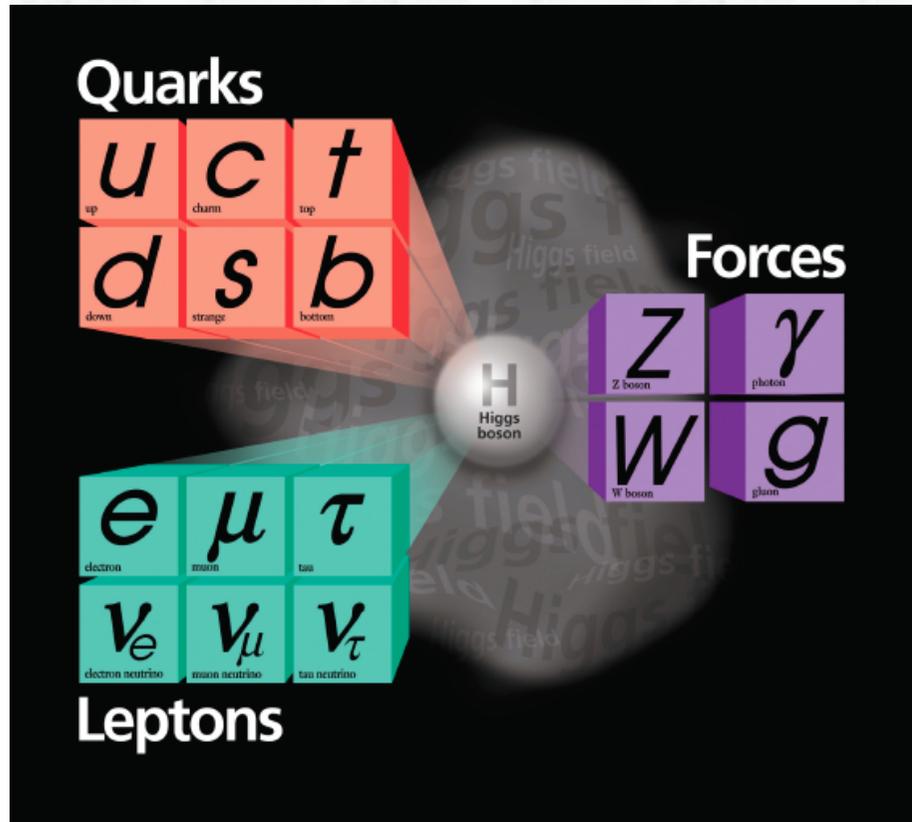
**Problem:** Austauschteilchen müssen masselos sein !

# Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus



F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;  
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;  
G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

# Der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

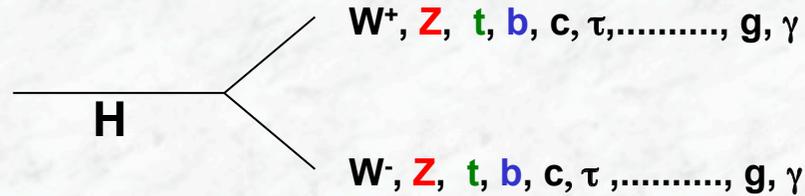


- Ein neues Feld (Higgs-Feld) wird postuliert, durchdringt das Vakuum
- Masse wird erzeugt durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**

Seine Masse wird nicht vorhergesagt!

# Zerfälle des Higgs-Teilchens

Produktions- und Zerfallseigenschaften des Higgs-Teilchens sind bekannt, **sobald die Masse bekannt ist:**



Zerfallsraten hängen auch von der Masse der Zerfallsprodukte ab

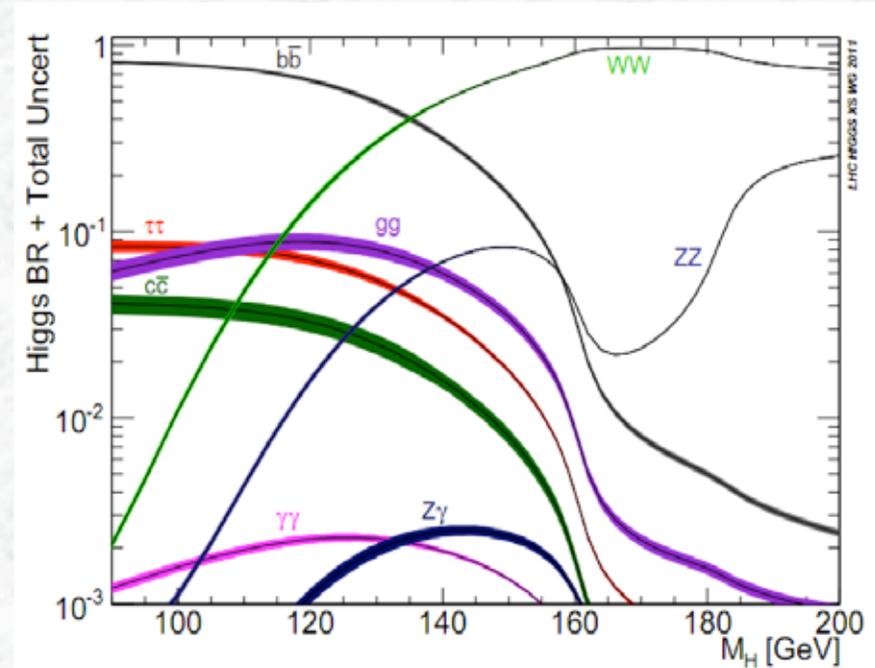
$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_C \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2(M_H^2) M_H$$

$$\Gamma(H \rightarrow VV) = \delta_V \frac{G_F}{16\sqrt{2}\pi} M_H^3 (1 - 4x + 12x^2) \beta_V$$

where:  $\delta_Z = 1$ ,  $\delta_W = 2$ ,  $x = M_V^2 / M_H^2$ ,  $\beta = \text{velocity}$

$$\Gamma(H \rightarrow gg) = \frac{G_F \alpha_a^2(M_H^2)}{36\sqrt{2}\pi^3} M_H^3 \left[ 1 + \left( \frac{95}{4} - \frac{7N_f}{6} \right) \frac{\alpha_a}{\pi} \right]$$

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_F \alpha_a^2}{128\sqrt{2}\pi^3} M_H^3 \left[ \frac{4}{3} N_C e_t^2 - 7 \right]^2$$





# Der Higgs Mechanismus, eine Analogie:

Prof. D. Miller  
UC London



Higgs-Hintergrundfeld  
erfüllt den Raum



Ein **Teilchen**  
im Higgs-Feld...



... Widerstand gegen  
Bewegung ...

**Trägheit** ↔ **Masse**

# CERN

Ein Musterbeispiel europäischer Kooperation



# Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik CERN in Genf

- Zielsetzung:  
Schaffung einer leistungs- und konkurrenzfähigen Infrastruktur für die zivile, naturwissenschaftliche Grundlagenforschung in Europa

- 1952: Gründung des "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"

Belgien, Dänemark, Deutschland (West), Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Jugoslawien, Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz

- Inkrafttreten der Konvention am 29. September 1954:  
Gründung der "Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire"

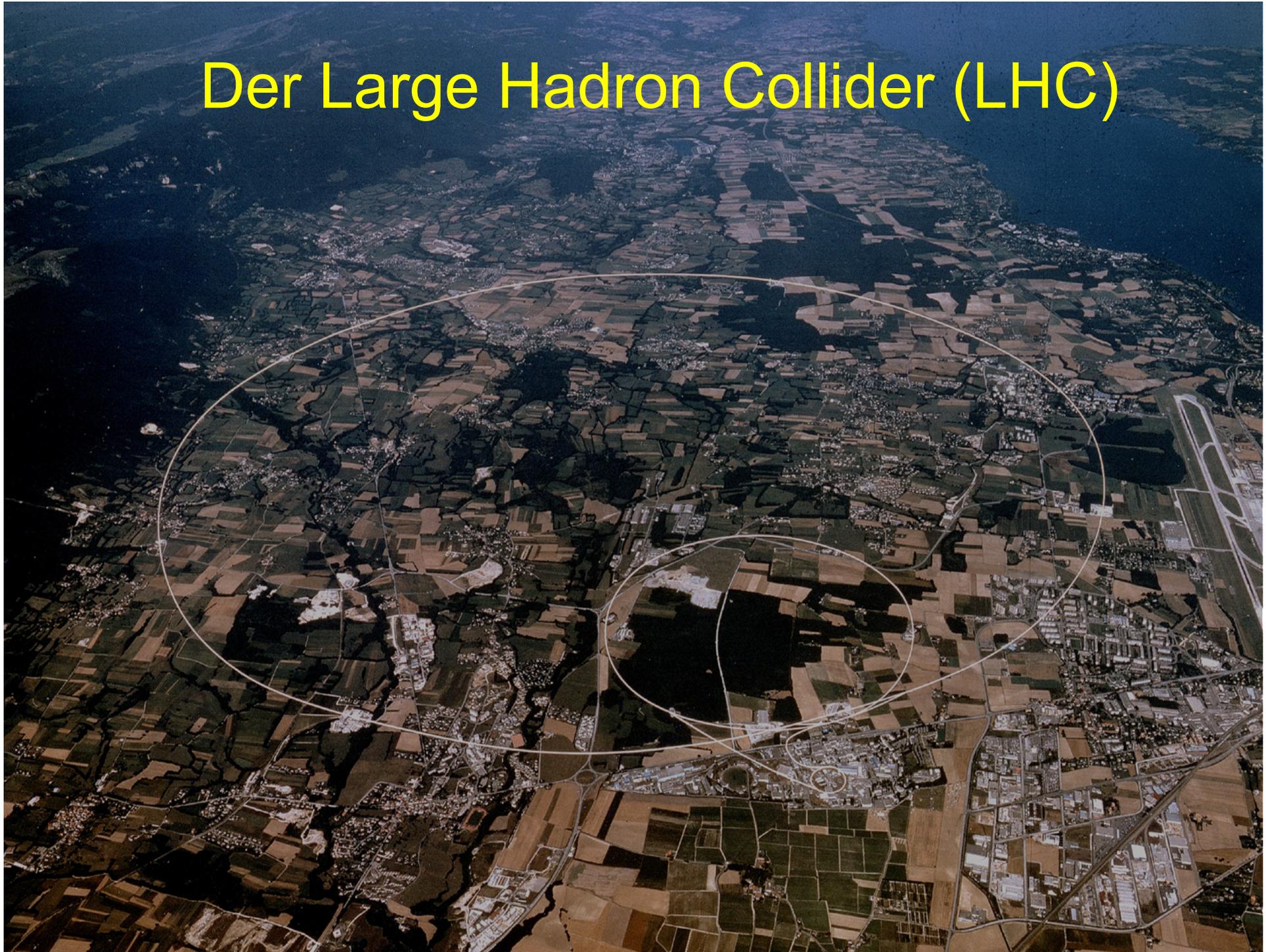


# CERN heute

- 20 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
- Weltgrößte Forschungszentrum für physikalische Grundlagenforschung  
Etat: ~1.000 MSF
- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für neue Technologien
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum



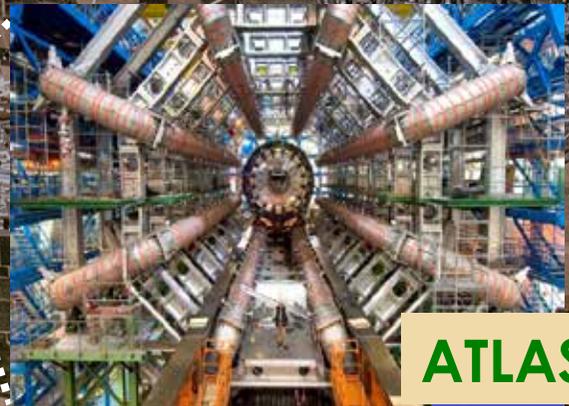
# Der Large Hadron Collider (LHC)



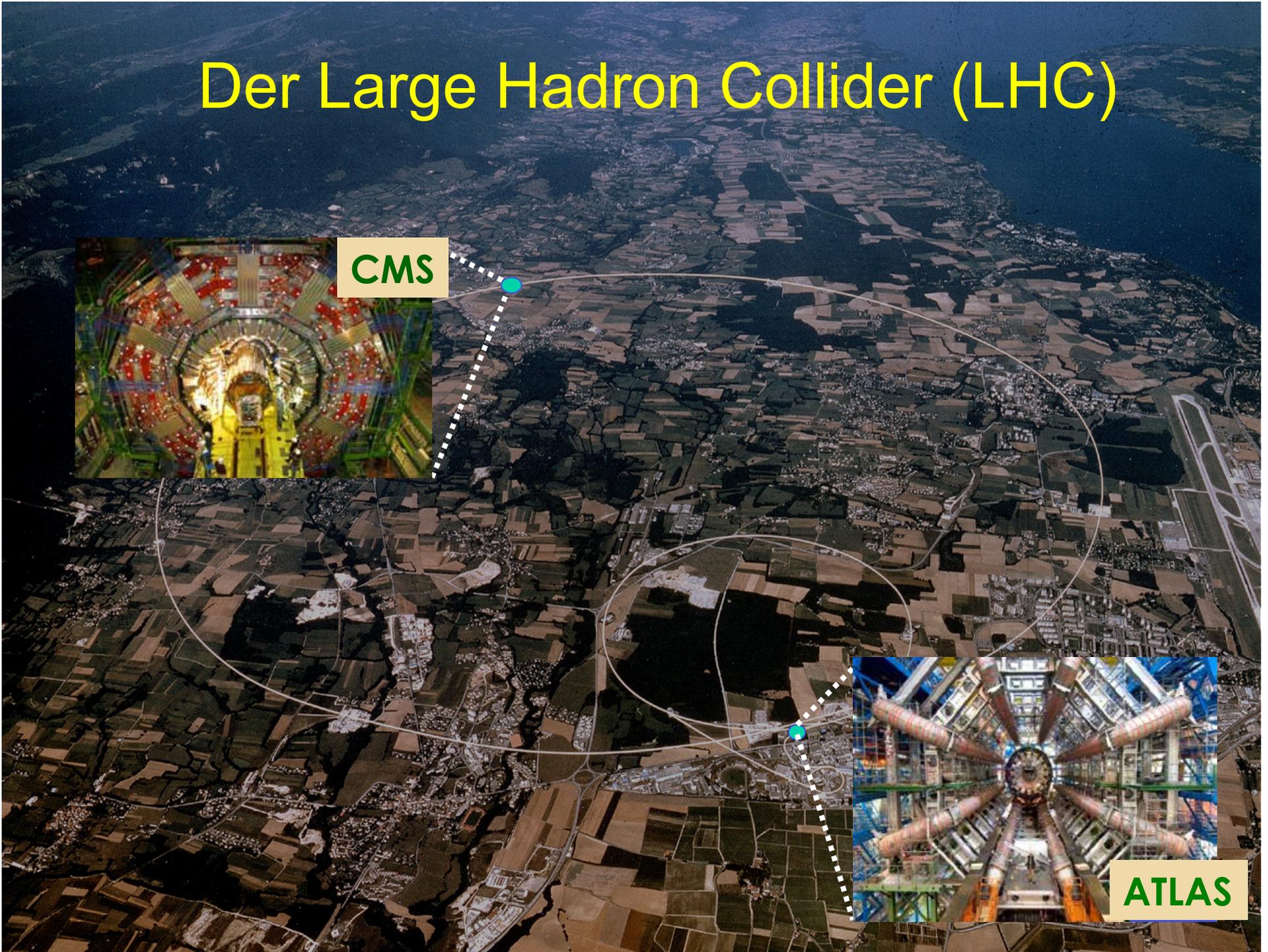
# Der Large Hadron Collider (LHC)



CMS



ATLAS

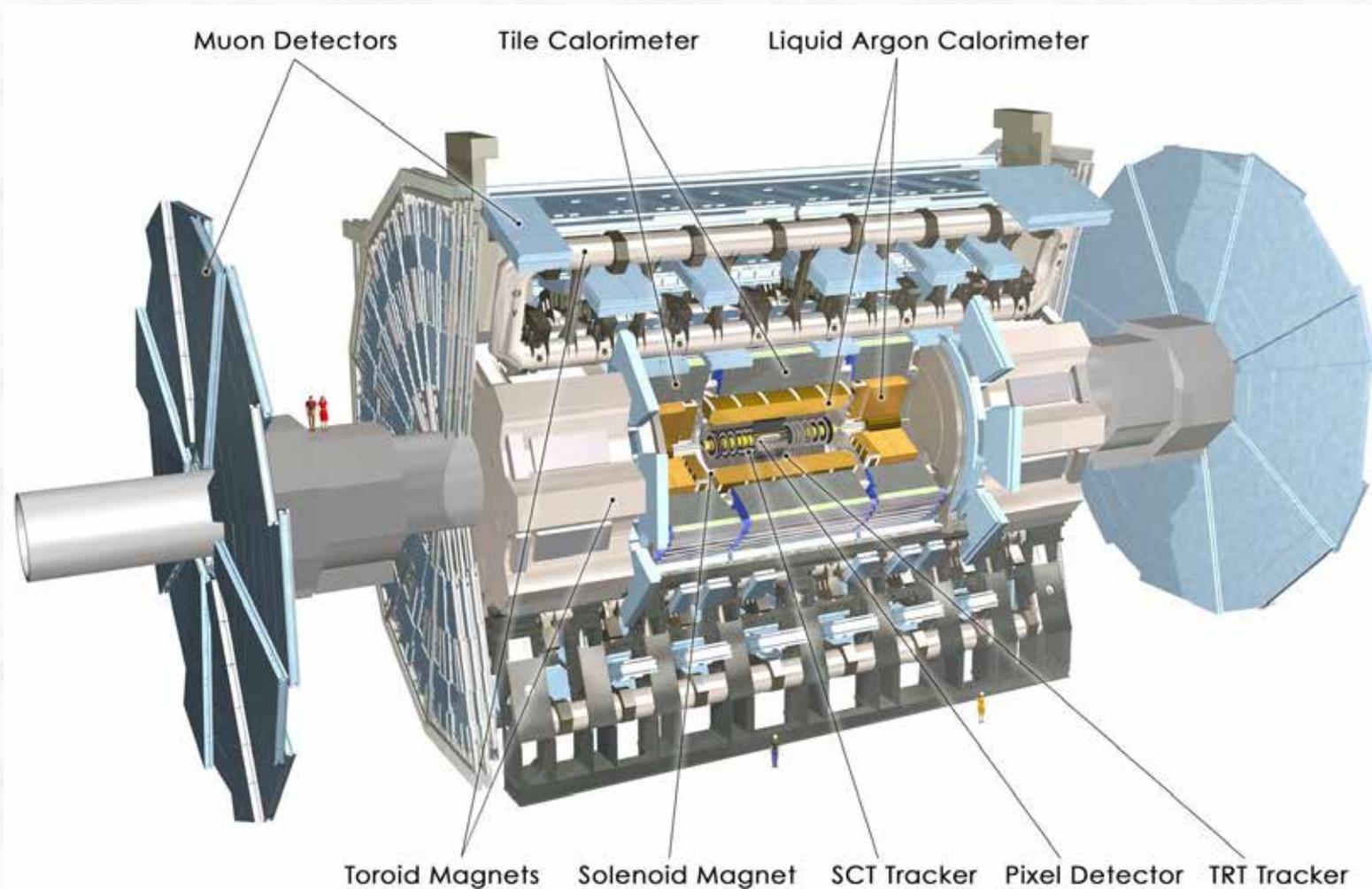


# Ein Blick in den Beschleunigertunnel



Inbetriebnahme 2008 / 2009  
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

# Das ATLAS-Experiment

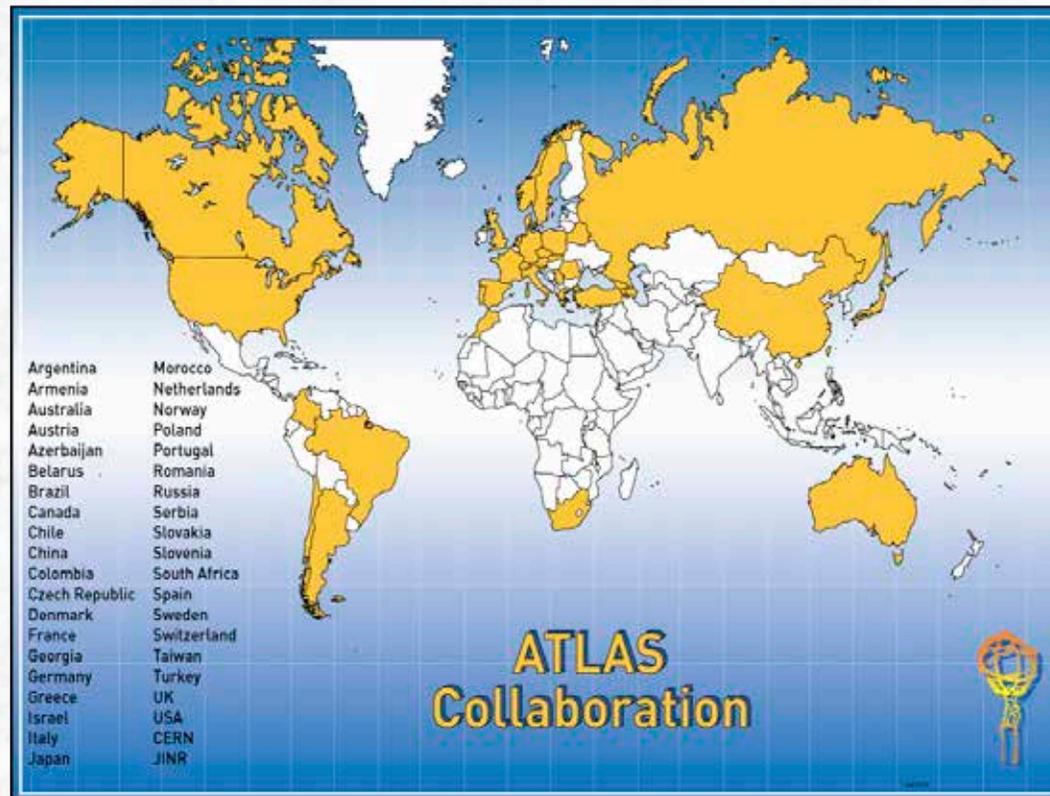


Durchmesser: 25 m  
Gesamtlänge: 46 m  
Gesamtgewicht: 7000 t

- ~200 Mio. Auslesekanäle, aufnahmebereit alle 25 ns
- 40 Mio. Ereignisse pro Sekunde
- 400 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien

# Das ATLAS-Experiment

- Die Experimente werden nicht von CERN gebaut
- Eigenständig, Kollaboration von Instituten (weltweit); „ATLAS-Organisation“, Sprecher, Management-Struktur



ATLAS Deutschland:  
BMBF-Forschungsschwerpunkt  
FSP-103

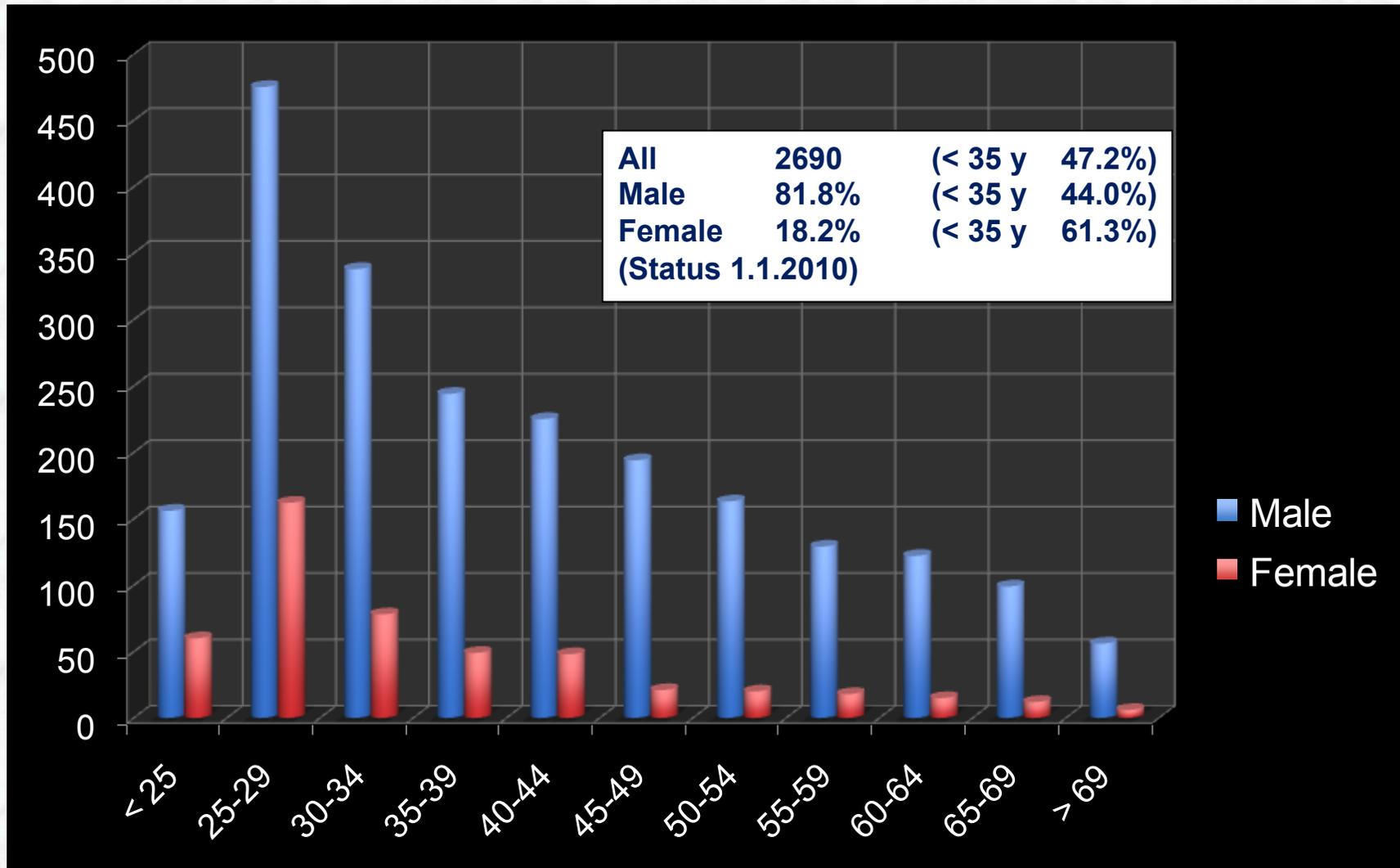


□ HU Berlin, Bonn, **DESY**, Dortmund, Dresden, Freiburg, Gießen, Göttingen, Heidelberg, Mainz, LMU München, **MPP München**, Siegen, Würzburg, Wuppertal

□ ~ 420 Wissenschaftler/innen

Etwa 3000 Wissenschaftler,  
aus 177 Instituten und 38 Ländern

## Altersverteilung der ATLAS-Physiker/innen



Insgesamt etwa: 1000 Student/inn/en

Für Deutschland: ~200 (aus 420) Student/inn/en