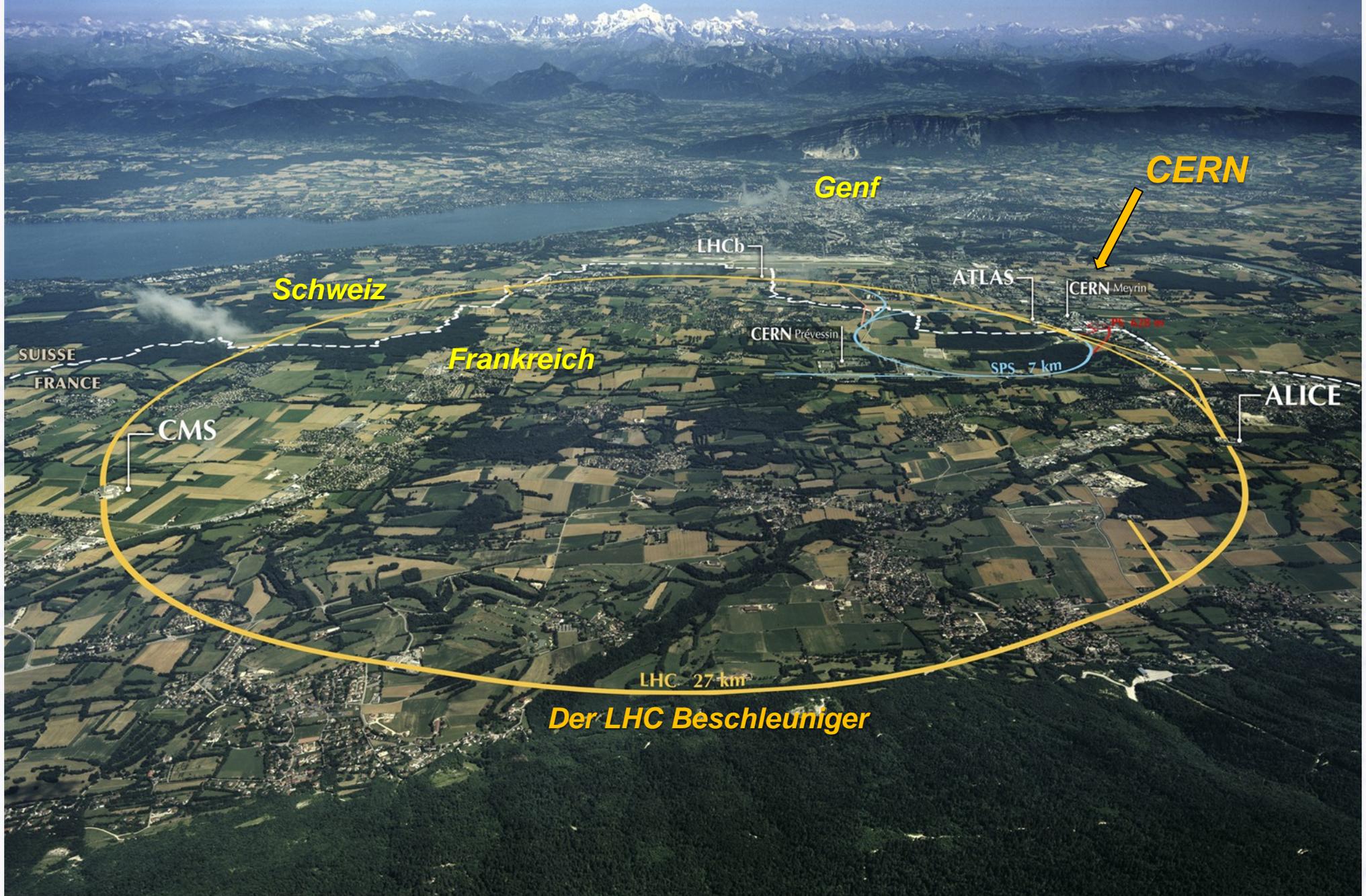
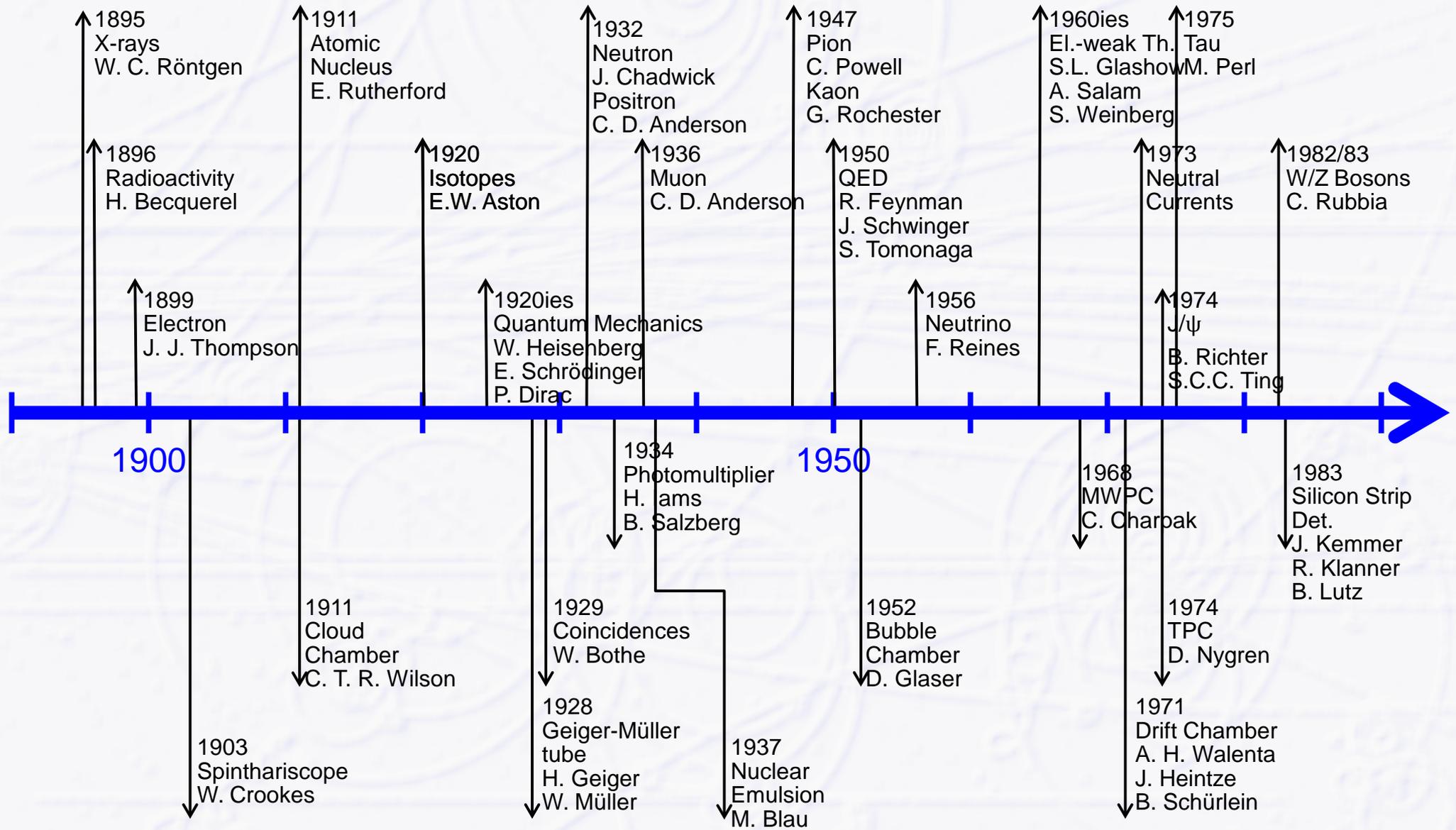


Higgs & Co.



Wichtige Daten der Teilchenphysik und der Detektorentwicklung

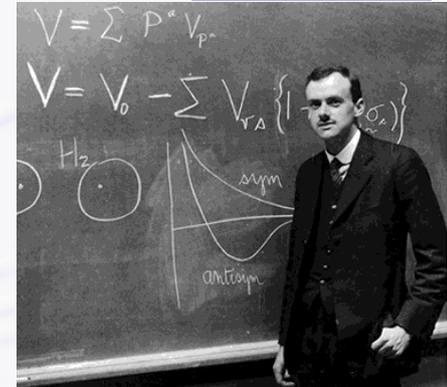


Entdeckung des Positrons

Paul Dirac

Positronennachweis durch Nebelkammer

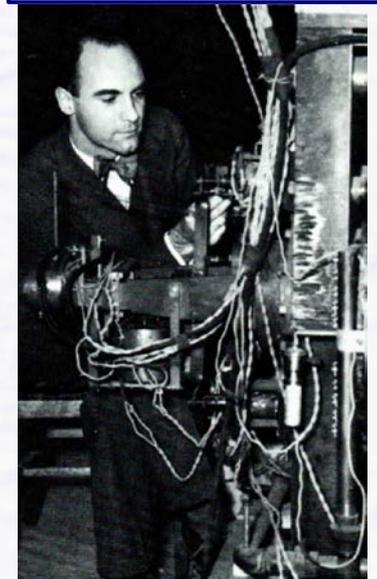
- e^+ vorhergesagt von Paul Dirac 1928 (Nobelpreis 1933)
- gefunden von Carl D. Anderson 1932 (Nobelpreis 1936)



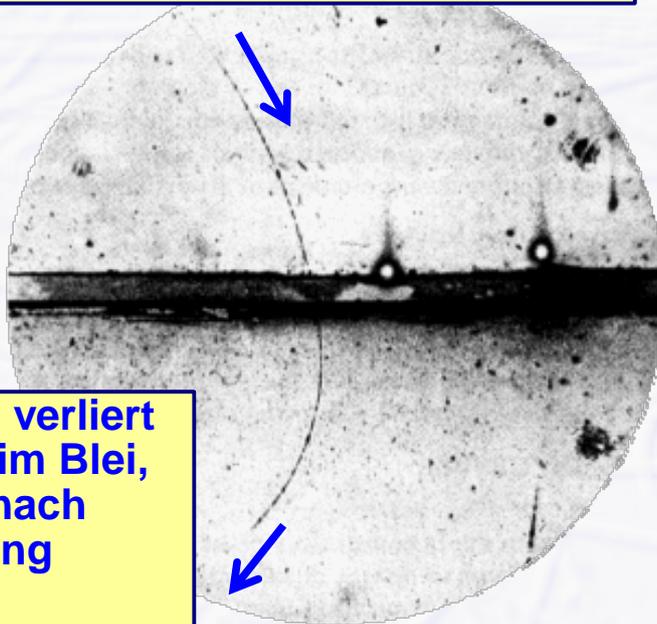
Anderson fand 1936 auch das **Myon**,
erstes Teilchen der 2. Generation
im Standardmodell

Isidor Isaac Rabi meinte:
"Who ordered that?"

Carl D. Anderson



von oben einlaufendes Positron, 63 MeV



6 mm Bleiplatte

1.5 T Magnetfeld

Positron verliert
Energie im Blei,
23 MeV nach
Durchgang
→

Kleinerer Radius,
dies definiert die
Flugrichtung!

Erste Mesonen

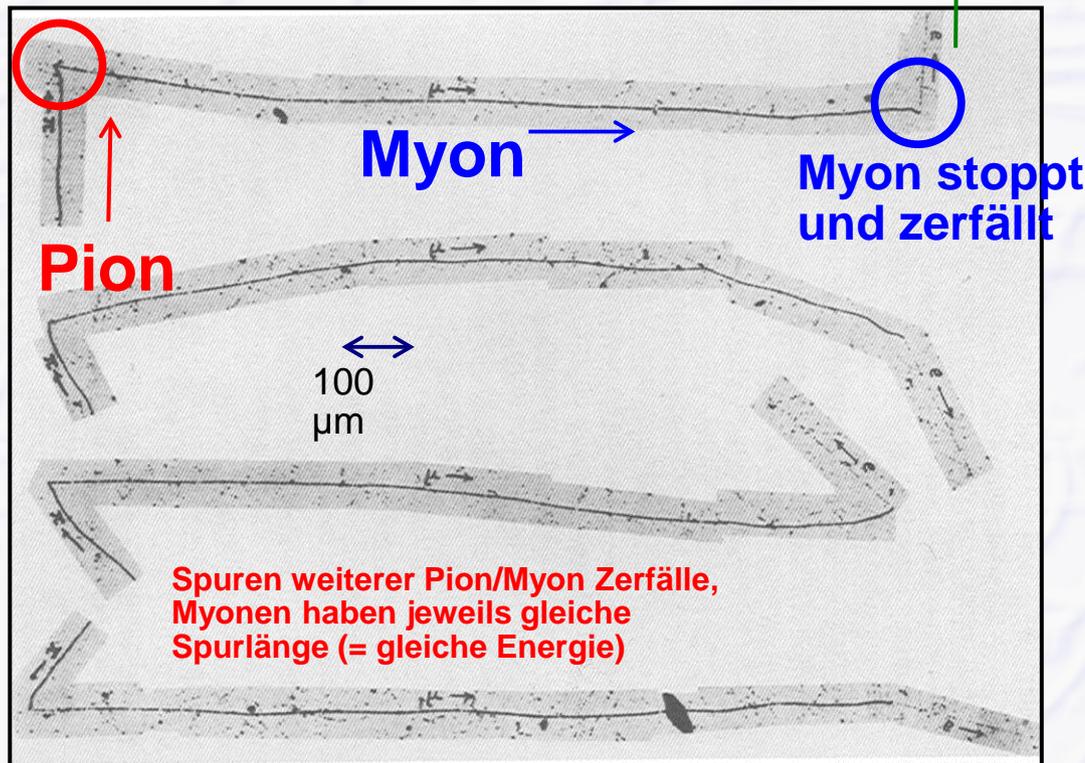
- Entdeckung des **Pion** in Kosmischer Strahlung durch Cecil Powell 1947 (Nobelpreis 1950)
- Entdeckung des **Kaon** 1949 (G. Rochester)

Cecil Powell



Pion stoppt und zerfällt

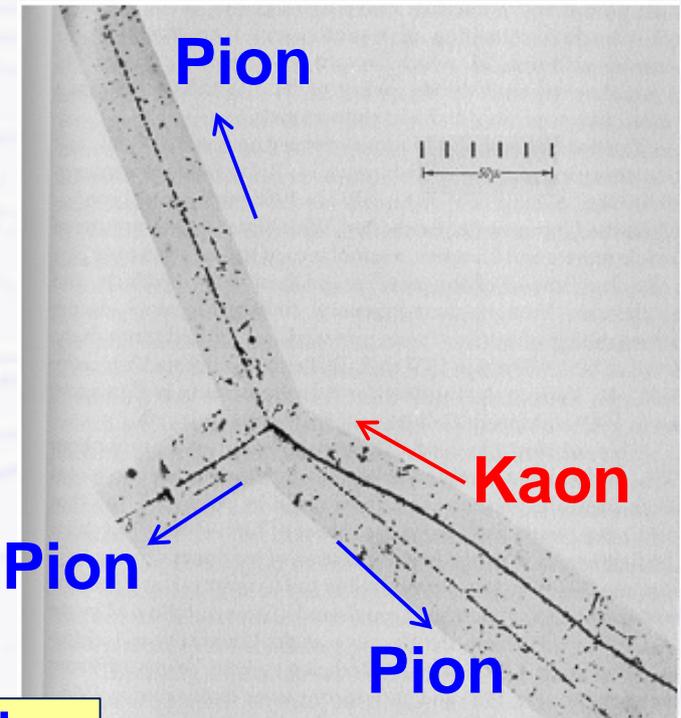
Elektron



Myon stoppt und zerfällt

100 μm

Spuren weiterer Pion/Myon Zerfälle,
Myonen haben jeweils gleiche
Spurlänge (= gleiche Energie)



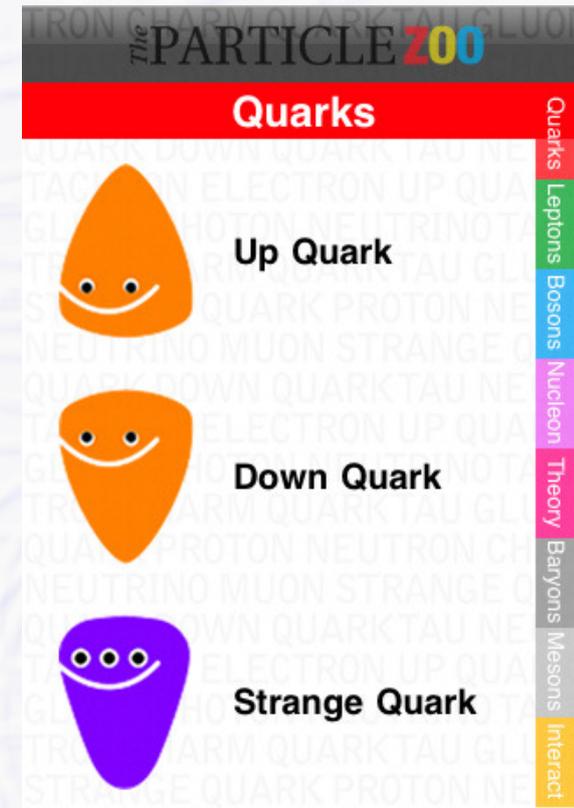
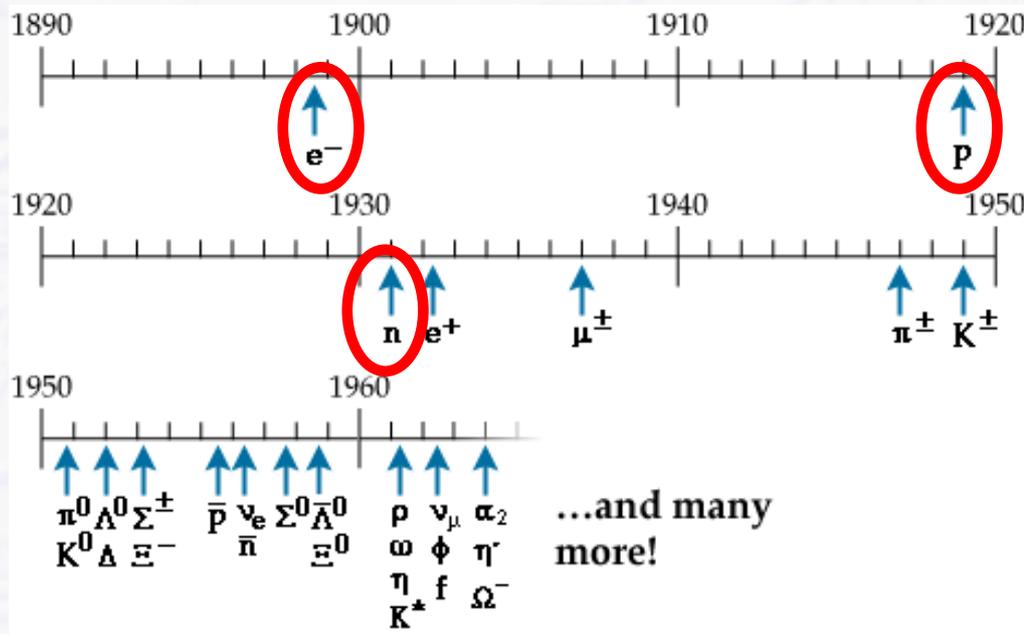
Photoemulsion

Teilchenphysik in den 1950...60ern

● Viele neue Teilchen wurden entdeckt ("Teilchenzoo")

→ möglich gemacht durch immer stärkere Beschleuniger

→ 1959: CERN Proton Synchrotron (noch heute in Betrieb)



● Fundamentale Fragen

→ Was sind grundlegenden Bausteine der Materie? → Quarktheorie (1964)

→ Welche Kräfte wirken zwischen den Materieteilchen? → Standardmodell

→ Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → Higgs (1964/2012)

Aufbau der Materie

● Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur

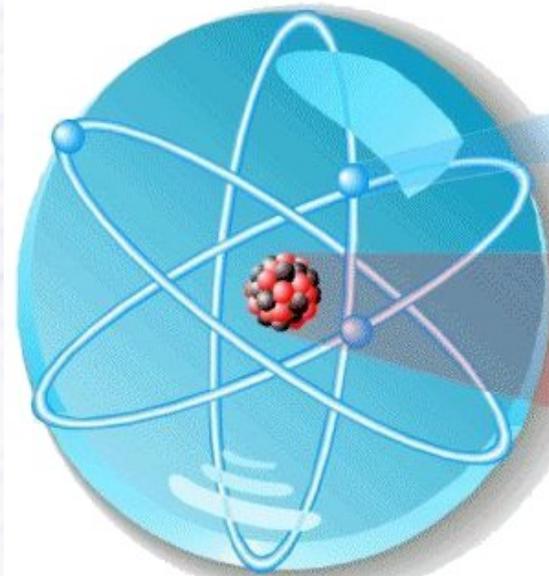
→ nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

Atom:

Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus
Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin,
Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905

Elektron:

J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897



atom $\sim 10^{-8}$ cm



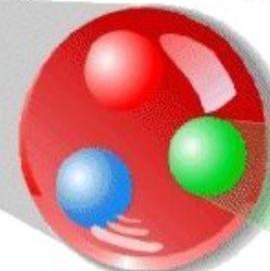
electron
 $< 10^{-16}$ cm



nucleus
 $\sim 10^{-12}$ cm

proton
(neutron)

Proton: Rutherford, 1919
Neutron: Chadwick, 1932



$\sim 10^{-13}$ cm

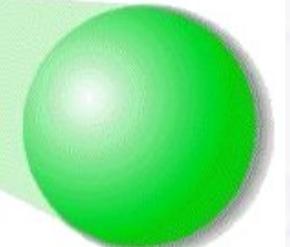
quark
 $< 10^{-16}$ cm

Atomkern:

Rutherford, Streuung von
 α -Teilchen (Heliumkernen)
an Goldatomen, 1910

Quark-Modell:

Gell-Mann, Zweig, 1964



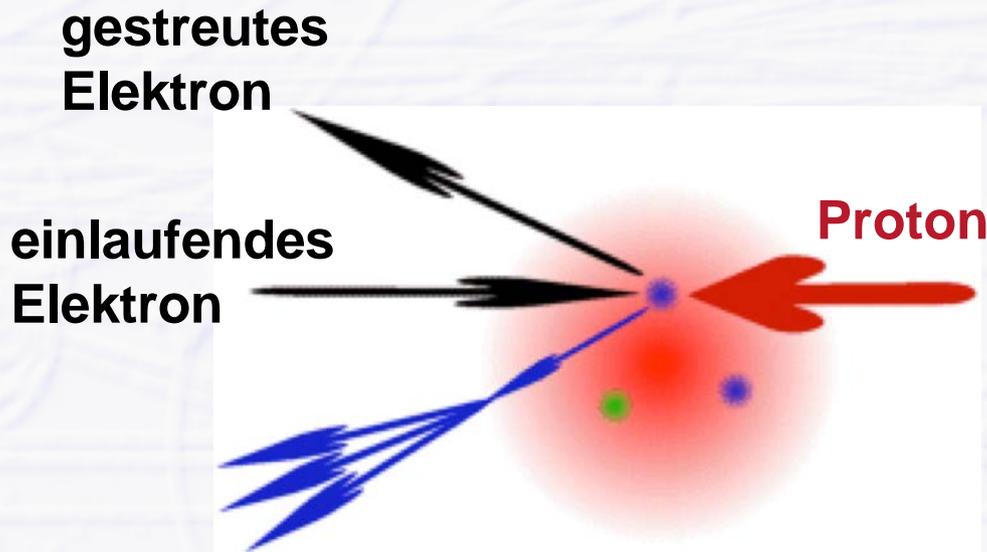
Entdeckung der Quarks

Streuung von Elektronen an Protonen (SLAC, 1968)

→ Impuls der Elektronen muss gross sein, um kleine Strukturen zu sehen

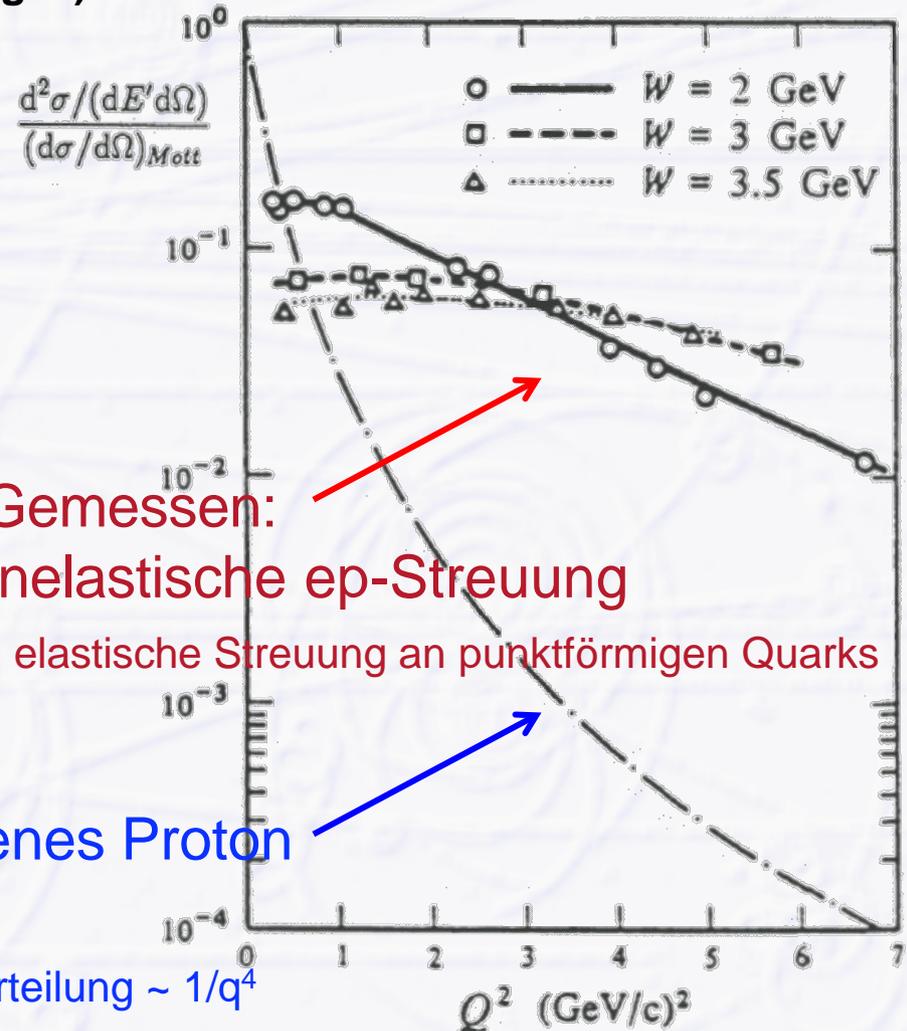
hoher Impuls → Materiewellenlänge (de Broglie) klein!

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Erwartung für homogenes Proton
(elastische Streuung)

exp. abfallende Ladungsverteilung $\sim 1/q^4$



Struktur des Protons

- Protonen sind (noch) komplizierter

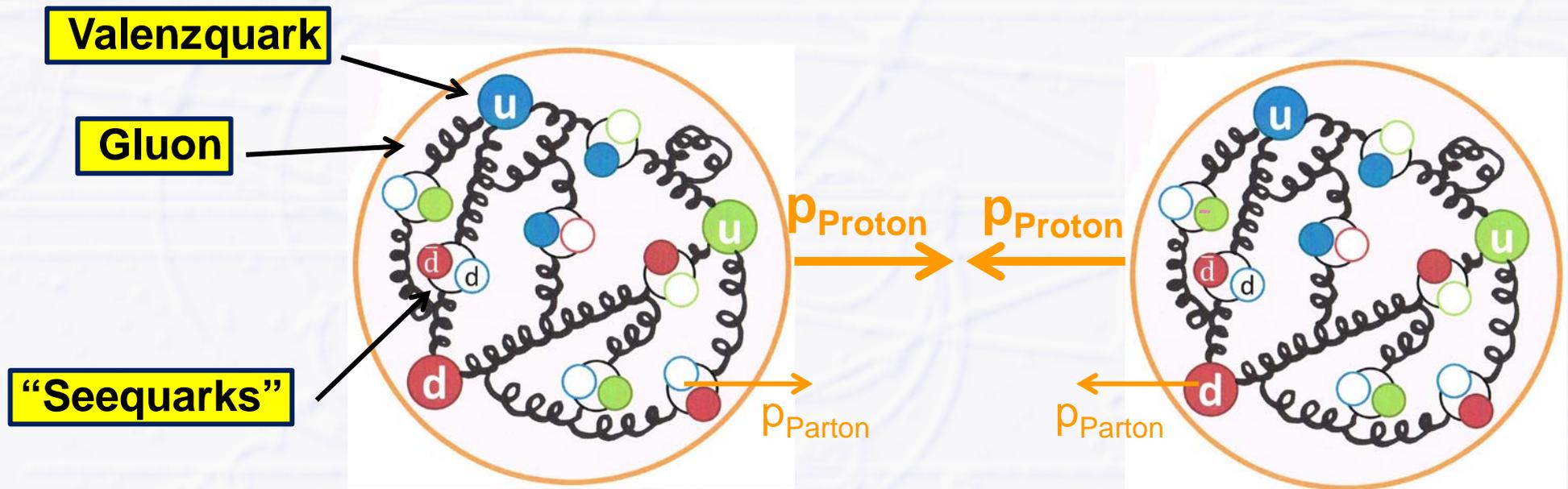
- 3 **Valenzquarks** (uud) mit unterschiedlicher Farbladung

- (Viele) **Gluonen** als Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung

- (Viele) **“Seequarks”** = kurzzeitig entstehende Quark – Antiquark Paare

- Nur die **“Partonen”** der Protonen kollidieren

Quark – Quark, Gluon – Gluon, Quark – Gluon, Antiquark – Gluon, Quark - Antiquark



Das Standardmodell – Materie

Alle bekannte Materie besteht aus nur wenigen elementaren Teilchen

...aber in 3 verschiedenen Versionen ("Generationen")

...und für jedes Teilchen gibt es noch ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung

mit starker Wechselwirkung

ohne starke Wechselwirkung

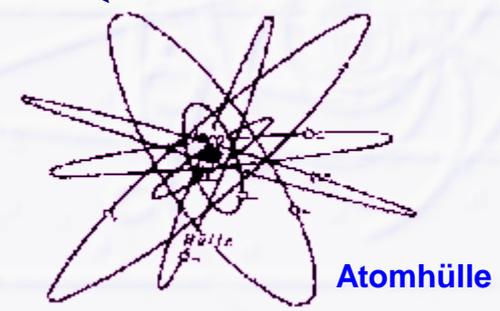
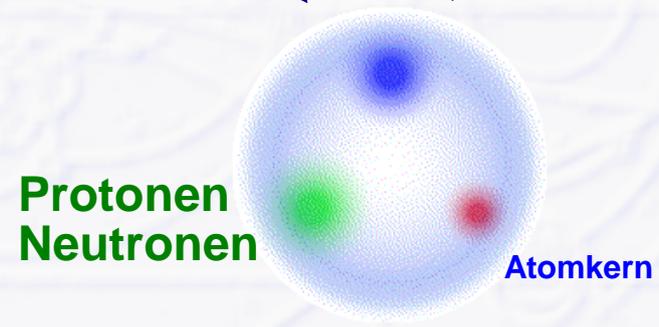
Überschwere, sehr instabile Materie

Schwere, instabile Materie

Normale, stabile Materie

	Quarks		Leptonen	
Generation 3	t Top	b Bottom	τ Tau	ν_τ Tau-neutrino
Generation 2	c Charm	s Strange	μ Muon	ν_μ Muon-neutrino
Generation 1	u Up	d Down	e Electron	ν_e Electron-neutrino

WIR und alles, was wir um uns sehen!



Wechselwirkungen

● Austausch von Kräften zwischen (Anti-)Materie-Teilchen erfolgt durch 4 verschiedene Wechselwirkungen

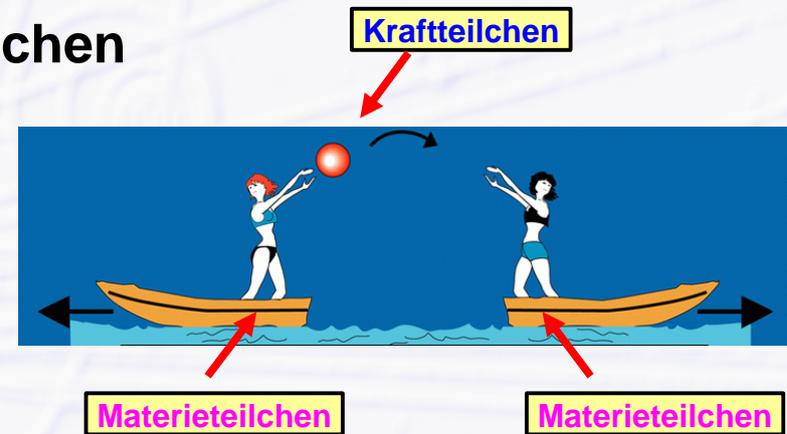
→ Vermittlung der Kräfte durch Kraftteilchen

→ **Kraftteilchen sind Bosonen**

- o ganzzahliger Spin

→ **Materieteilchen sind Fermionen**

- o halbzahliger Spin



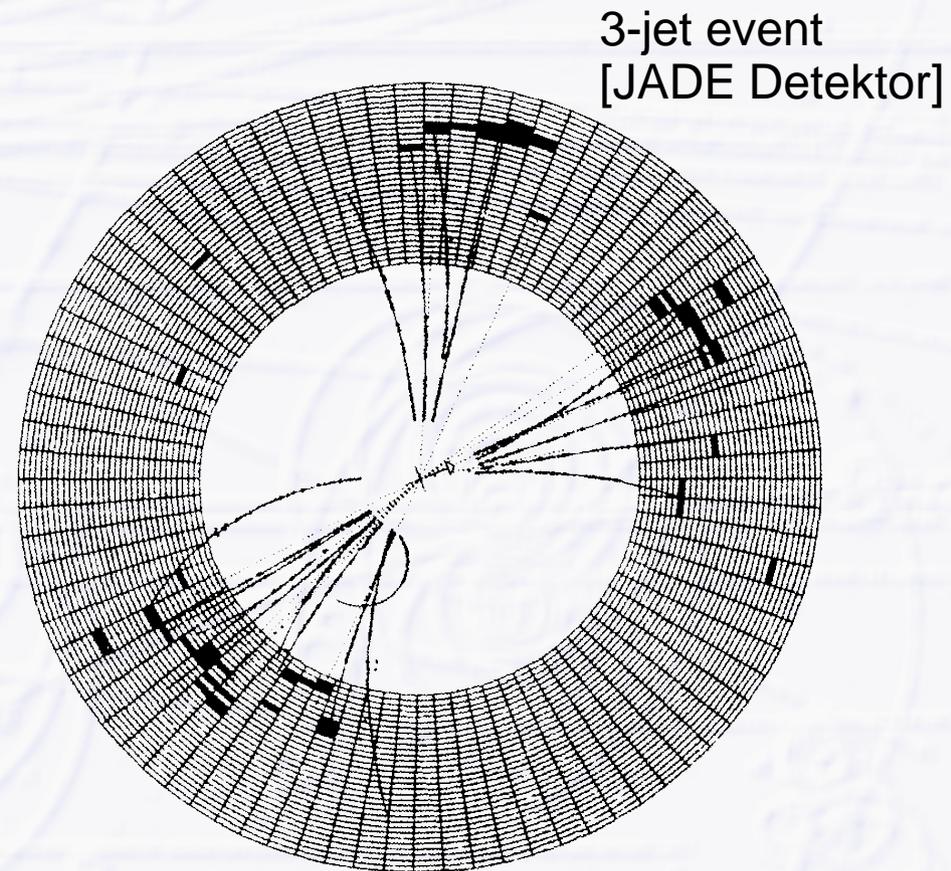
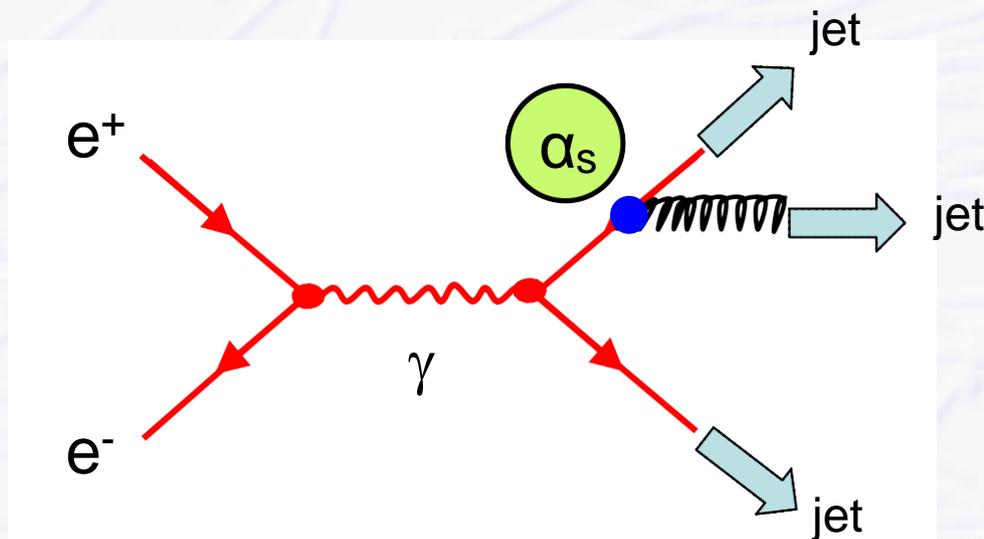
Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite	Kraftteilchen	Wirkung
stark	1	10^{-15} m	8 Gluonen	Kernkraft, Zusammenhalt von Protonen, Neutronen etc.
elektromagnetisch	10^{-2}	∞	Photon	Elektrizität, Magnetismus, Licht
schwach	10^{-5}	10^{-18} m	W^+ , W^- , Z	Radioaktivität, Zerfälle
Gravitation	10^{-38}	∞	“Graviton”	Schwerkraft

Nachweis des Gluons 1979

- **PETRA e^+e^- collider am DESY/Hamburg**

→ Erzeugung von Quark – Antiquark Paaren (2 Jets)

- **Abstrahlung eines Gluons erzeugt 3. Jet**



3 – jet events
2 – jet events $\sim \alpha_s(s)$

Kopplungsstärke

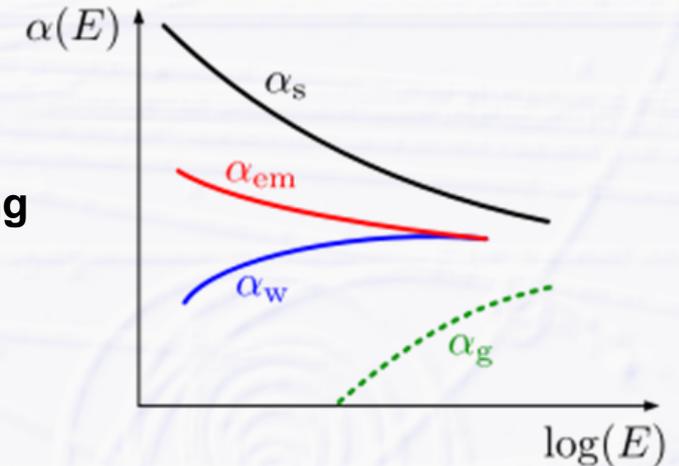
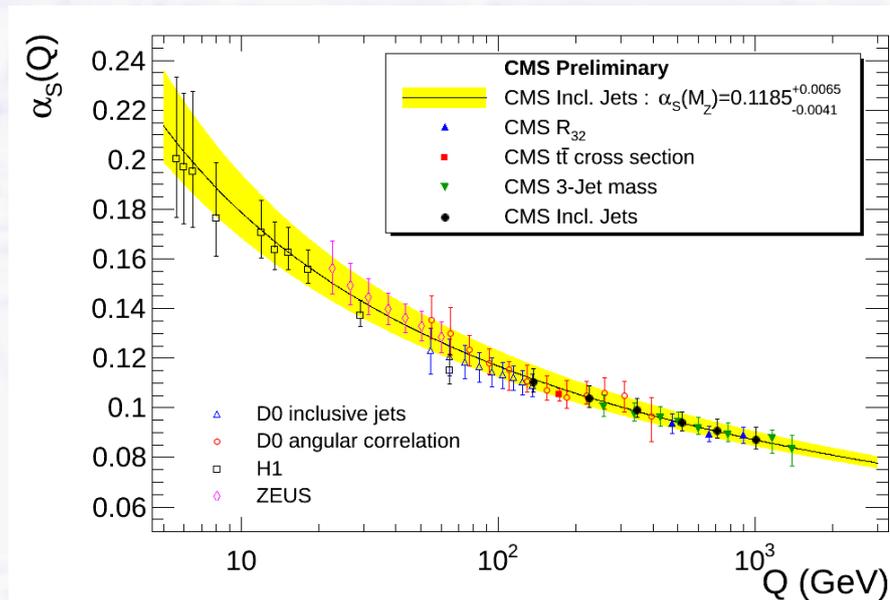
- Die Stärken der Wechselwirkungen (Kopplungsstärke) sind nicht konstant!

→ Kopplungsstärken sind **energieabhängig**

- Kopplungsstärke der elektro-magnetischen WW für kleine E („Feinstrukturkonstante“)

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{2c\epsilon_0 h} \approx \frac{1}{137} \approx 0.0073$$

- gemessenes „running“ α_s der starken Wechselwirkung



Ursache:

→ **Vakuumfluktuationen**

Vakuumfluktuationen

Das Vakuum ist nicht leer!

→ Heisenberg'sche Unschärferelation: $\Delta x \Delta p \geq h$

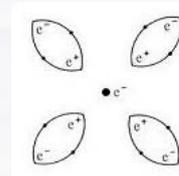
- o Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden

→ aber auch: $\Delta E \Delta t \geq h$

- o für eine kurze Zeit Δt kann die Energie ΔE aus dem Vakuum "geborgt" werden

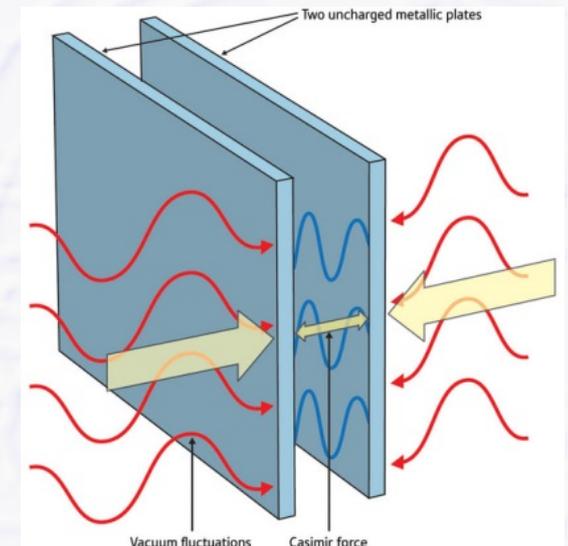
Ursache für kurzzeitig auftauchende & verschwindende Teilchen – Antiteilchen Paare aus dem Vakuum

→ z.B. Abschirmung der Elektronladung



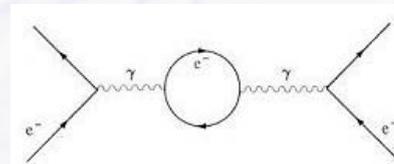
→ Messbar durch Casimir-Effekt

- o äußerer Druck auf 2 Metallplatten mit kleinem Abstand
 - o nicht alle Moden passen zwischen die Platten
- Wellencharakter der Teilchen!



Das Vakuum ist kompliziert!

- o viele zusätzliche Beiträge, z.B. Schleifen

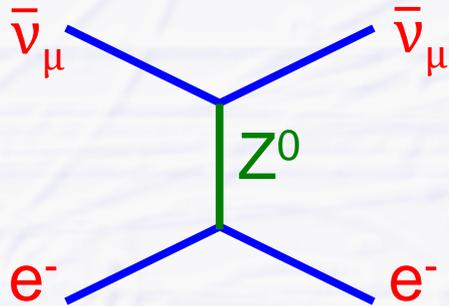


“Neutrale Ströme”

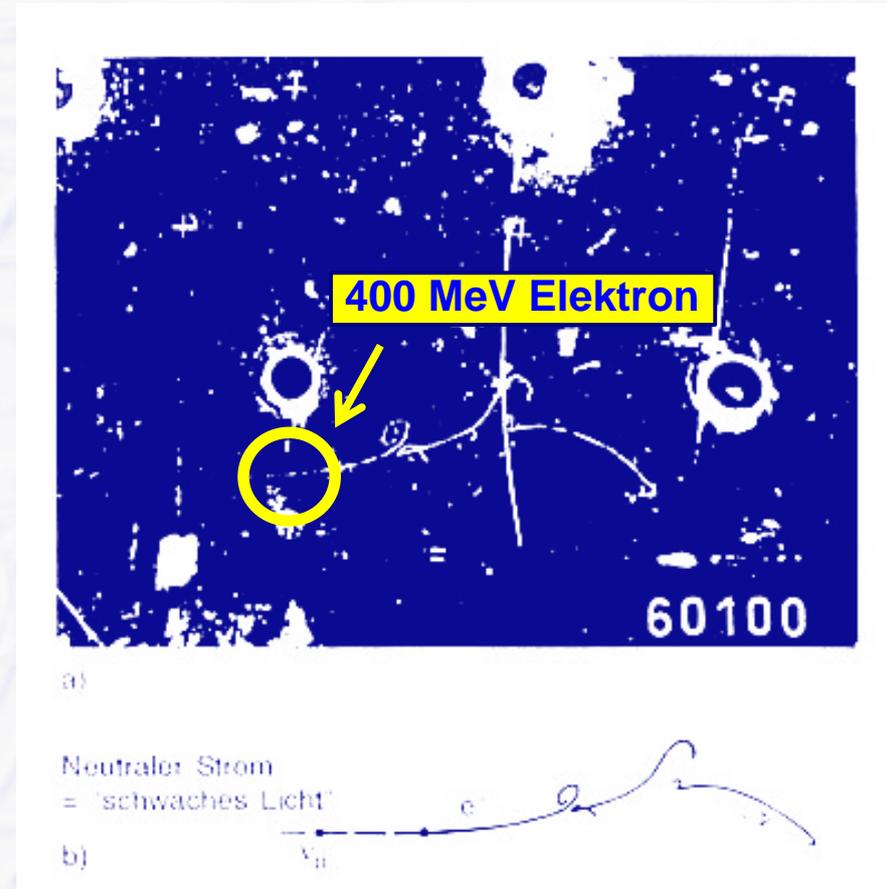
● Indirekter Hinweis auf Existenz des Z^0 am CERN 1973

→ elastischer Stoß eines Neutrinos mit einem Elektron der Atomhülle

- schwache Wechselwirkung, Austausch eines Z^0 (“schwaches Licht”)
- keine el.-magn. Wechselwirkung, kein Photonaustausch

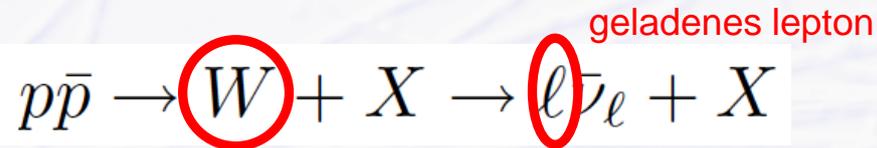


$\bar{\nu}_\mu \rightarrow$

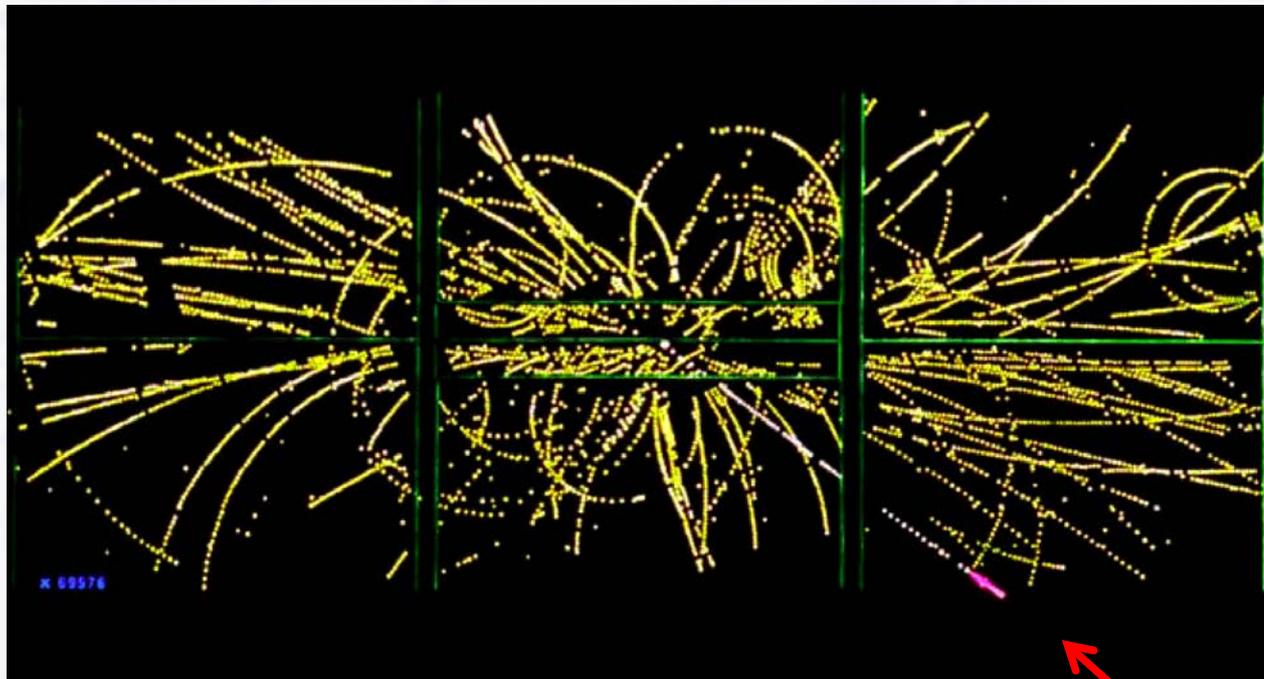


Direkte Entdeckung des W und Z^0

- **SppS collider am CERN 1983** (Nobelpreis 1984, C. Rubbia + S. van der Meer)
 - Super Proton Synchrotron betrieben als Proton – Antiproton Collider
 - 2 Experimente/Detektoren: UA1 + UA2 (Underground Area 1 + 2)



Kollision im
UA1 Spurdetektor



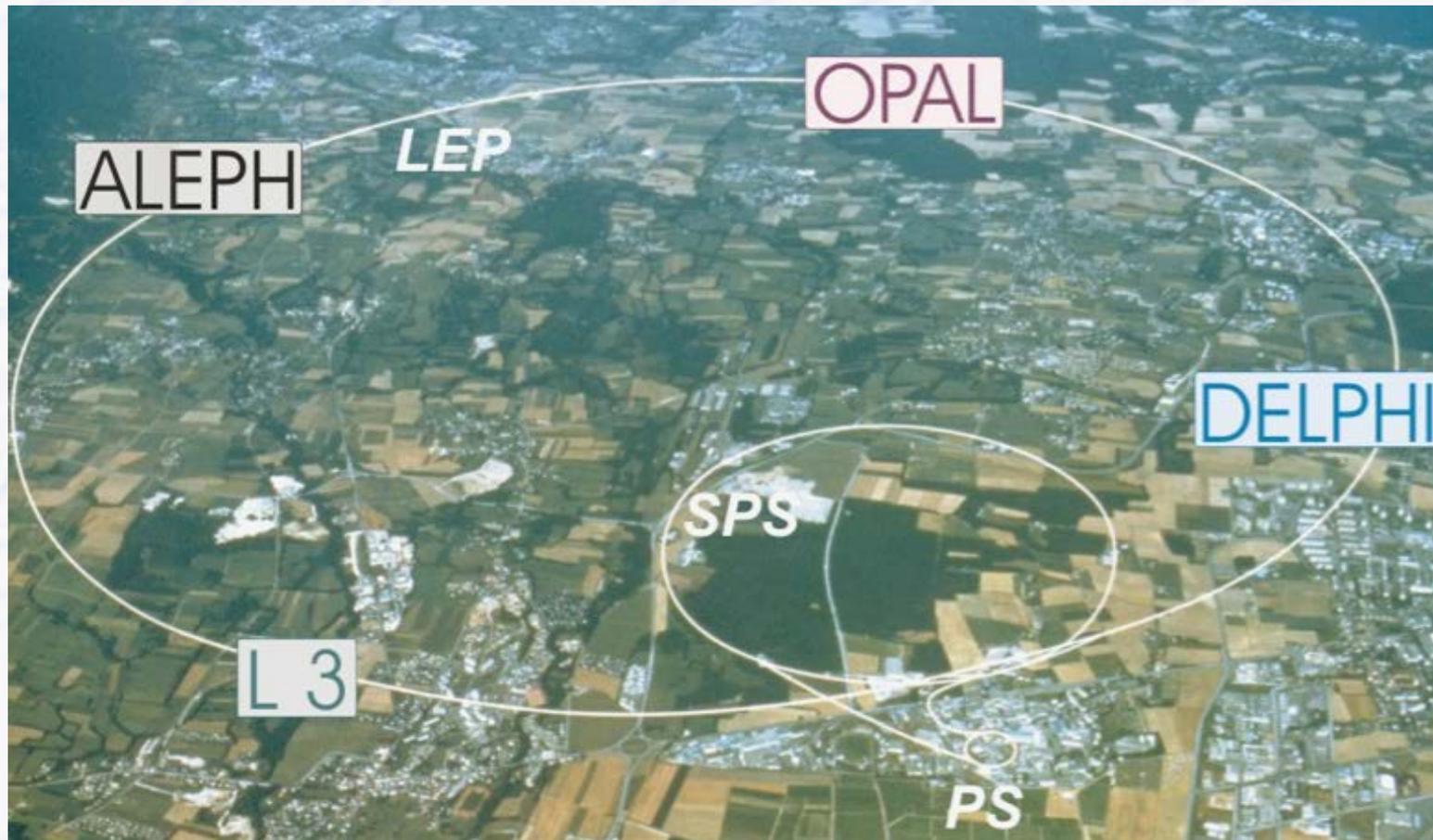
hochenergetisches Elektron

Der LEP e^+e^- Collider

● Heutiger LHC Tunnel war geplant für LEP (1989 – 2000)

◦ LEP = **L**arge **E**lektron **P**ositron collider

→ Tunnelquerschnitt berücksichtigt aber schon möglichen LHC

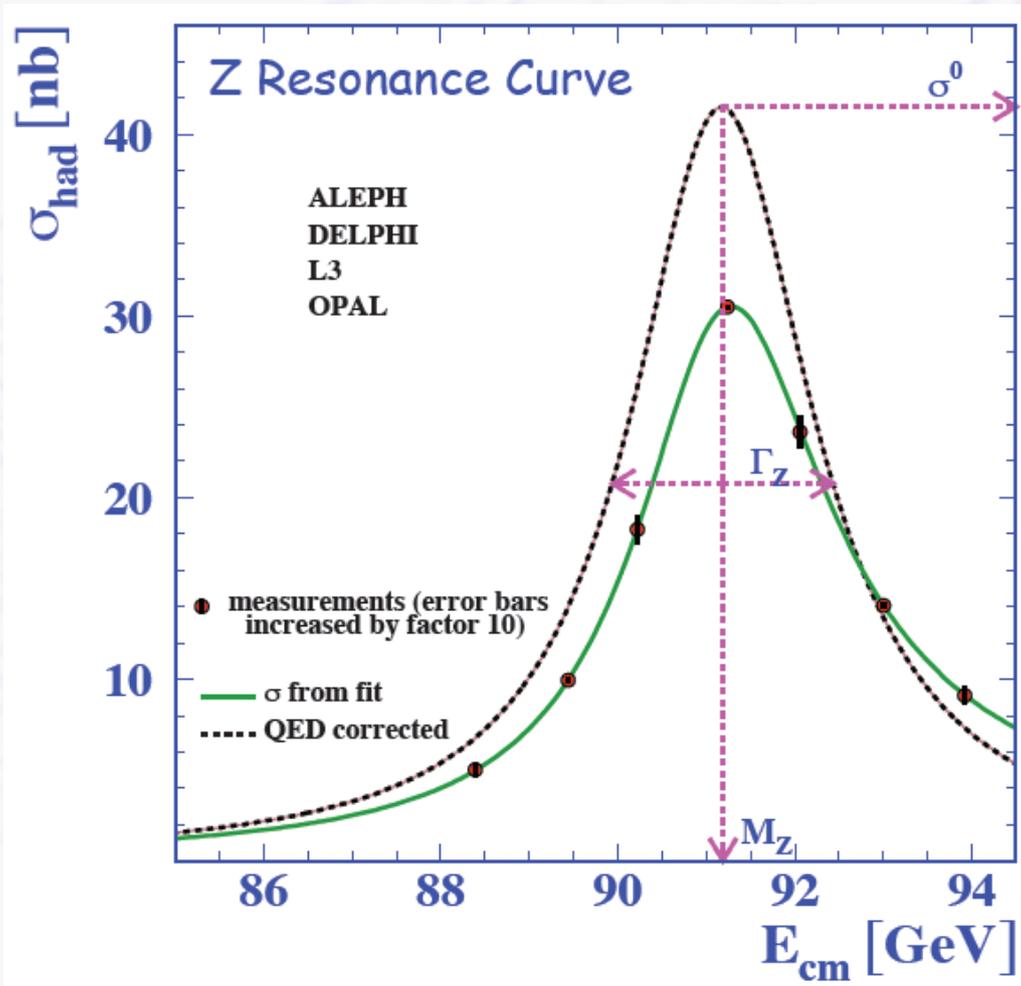


E_{cm} von 90 GeV
bis 200 GeV

4 Experimente

Vermessung der Z^0 Resonanzkurve

- Kurvenform: Breit-Wigner (wie Spektralline oder harmonischer Oszillator)



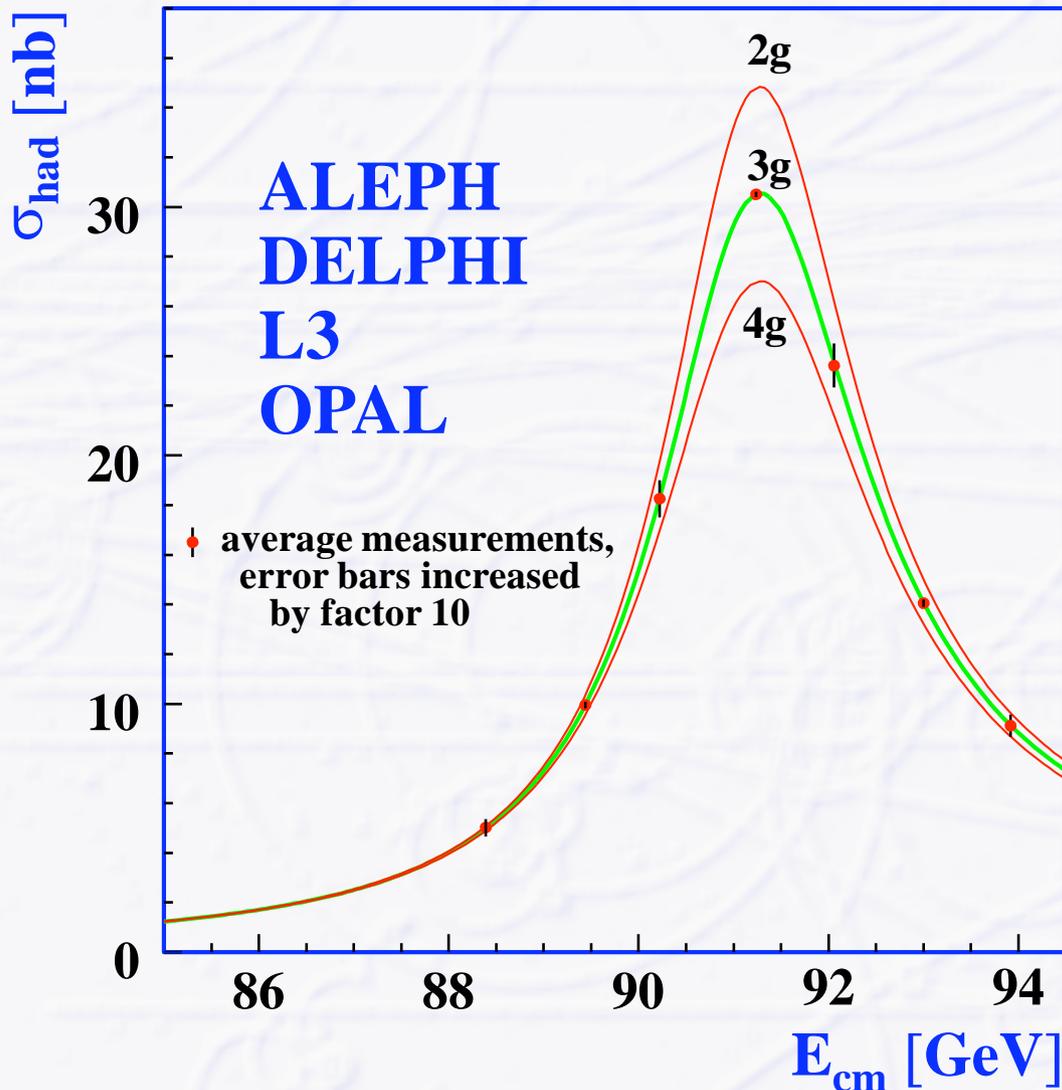
$$\sigma^0(s) \approx 12\pi \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{m_Z^2} \cdot \frac{s}{(s - m_Z^2)^2 + \Gamma_Z^2 m_Z^2}$$

- Resonance position $\rightarrow M_Z$
- Peak cross section $\rightarrow \Gamma_e \Gamma_f$
- Resonance width $\rightarrow \Gamma_Z$

Form der Resonanzkurve stark abhängig von zusätzlichen Beiträgen höherer Ordnung (Vakuumpolarisation etc.)

Anzahl der Generationen

- Z^0 Resonanzform abhängig von Anzahl der (leichten) Neutrino-Generationen



$$\Gamma_Z = \Gamma_{\text{had}} + 3\Gamma_{\ell} + \underbrace{N_{\nu}}_{\substack{\text{leptonic width} \\ \text{number of} \\ \text{light neutrinos}}} \Gamma_{\nu}^{\text{inv}}$$

Anzahl der leichten(!) neutrino Generationen:

$$N_{\nu} = 2.9840 \pm 0.0082$$

“leicht” = Zerfälle $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$
müssen möglich sein: $M_{\nu} < \frac{1}{2} M_Z$

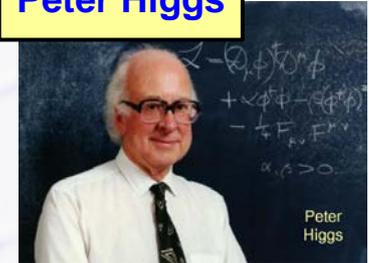
Das Standardmodell

● Wesentliche Botschaften

- Alle Materie ist aus nur **wenigen elementaren** (= nicht weiter teilbaren) **Marieteilchen** aufgebaut
- Kräfte zwischen den Marieteilchen werden durch **Kraftteilchen** übertragen (Analogie: Austausch eines Balls zwischen 2 Booten)
 - Es gibt **4 verschiedene Kräfte** mit verschiedenen Kraftteilchen
 - bekannteste Kraft: elektro-magnetische Kraft mit Photon als Kraftteilchen
- Die Marieteilchen bestehen aus 2 Gruppen
 - **Quarks** (Teilchen mit starker Wechselwirkung)
 - **Leptonen** (Teilchen ohne starke Wechselwirkung)
- Die Marieteilchen treten in **3 Generationen** auf
 - 1. Generation: leicht, 2. Generation: schwer, 3. Generation: überschwer
 - wir wissen nicht, warum es 3 Generationen gibt
 - nur die Marieteilchen der ersten Generation sind stabil
- **Alle Materie besteht aus Quarks und Leptonen der ersten Generation**
 - Quarks: Protonen, Neutronen (Atomkerne), Leptonen: Atomhülle

Higgs-Feld, Higgs-Teilchen

Peter Higgs



Das Standardmodell ist (war) fast komplett

→ alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden

- zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)

→ **aber: alle Teilchen haben im Standardmodell keine Masse**

Idee von Peter Higgs (1964) und anderen

→ **masselose Teilchen wechselwirken ständig mit einem Higgs-Field**

- Higgs-Feld = allumfassendes Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld

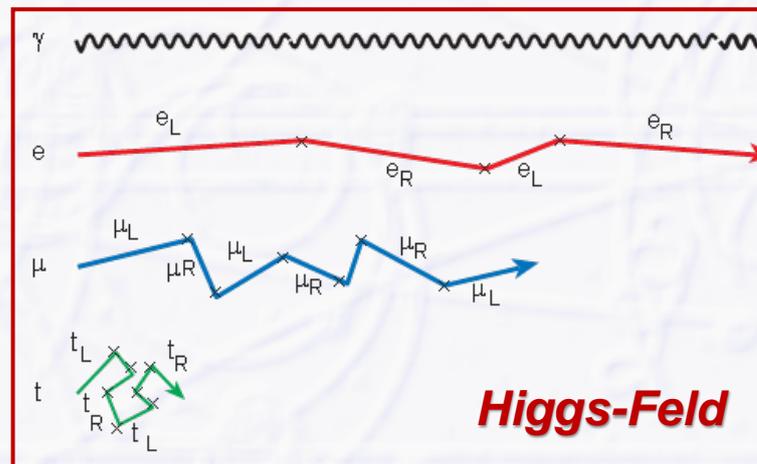
→ **Wechselwirkung verursacht “Trägheit” = Teilchen erhält träge Masse**

keine Masse: Photon

geringe Masse: Elektron

mittelschwere Masse: Myon

sehr schwere Masse: Top-Quark



Physikgeschichte 1964

● Drei wichtige Veröffentlichungen in der gleichen Ausgabe von Physical Review Letters 1964 über Erzeugung von Masse

- Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons
Francois **Englert** and Robert **Brout**
Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964), eingesendet 26. Juni 1964
- Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons
Peter W. **Higgs**
Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964), eingesendet 31. August 1964
- Global Conservation Laws and Massless Particles
Gerald S. **Guralnik**, Carl R. **Hagen**, and Thomas W. **Kibble**
Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964), eingesendet 12. Oktober 1964



Veröffentlichung von Higgs 1964 (1½ Seiten)

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson³ has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone² himself: Two real⁴ scalar fields φ_1, φ_2 and a real vector field A_μ interact through the Lagrangian density

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}, \quad (1)$$

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - eA_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu.$$

e is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as $-+++$. L is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on $\varphi_1 \pm i\varphi_2$ and of the second kind on A_μ . Let us suppose that $V'(\varphi_0^2) = 0$, $V''(\varphi_0^2) > 0$; then spontaneous breakdown of $U(1)$ symmetry occurs. Consider the equations [derived from (1) by treating $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, and A_μ as small quantities] governing the propagation of small oscillations

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

$$G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0. \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass $e\varphi_0$. In the absence of the gauge field coupling ($e = 0$) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current: It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.⁵

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.⁶ The model of the most immediate interest is that in which the scalar fields form an octet under $SU(3)$: Here one finds the possibility of two nonvanishing vacuum expectation values, which may be chosen to be the two $Y = 0$, $I_3 = 0$ members of the octet.⁷ There are two massive scalar bosons with just these quantum numbers; the remaining six components of the scalar octet combine with the corresponding components of the gauge-field octet to describe

massive vector bosons. There are two $I = \frac{1}{2}$ vector doublets, degenerate in mass between $Y = \pm 1$ but with an electromagnetic mass splitting between $I_3 = \pm \frac{1}{2}$, and the $I_3 = \pm 1$ components of a $Y = 0$, $I = 1$ triplet whose mass is entirely electromagnetic. The two $Y = 0$, $I = 0$ gauge fields remain massless: This is associated with the residual unbroken symmetry under the Abelian group generated by Y and I_3 . It may be expected that when a further mechanism (presumably related to the weak interactions) is introduced in order to break Y conservation, one of these gauge fields will acquire mass, leaving the photon as the only massless vector particle. A detailed discussion of these questions will be presented elsewhere.

It is worth noting that an essential feature of the type of theory which has been described in this note is the prediction of incomplete multiplets of scalar and vector bosons.⁸ It is to be expected that this feature will appear also in theories in which the symmetry-breaking scalar fields are not elementary dynamic variables but bilinear combinations of Fermi fields.⁹

¹P. W. Higgs, to be published.

²J. Goldstone, *Nuovo Cimento* **19**, 154 (1961);

J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, *Phys. Rev.* **127**, 965 (1962).

³P. W. Anderson, *Phys. Rev.* **130**, 439 (1963).

⁴In the present note the model is discussed mainly in classical terms; nothing is proved about the quantized theory. It should be understood, therefore, that the conclusions which are presented concerning the masses of particles are conjectures based on the quantization of linearized classical field equations. However, essentially the same conclusions have been reached independently by F. Englert and R. Brout, *Phys. Rev. Letters* **13**, 321 (1964): These authors discuss the same model quantum mechanically in lowest order perturbation theory about the self-consistent vacuum.

⁵In the theory of superconductivity such a term arises from collective excitations of the Fermi gas.

⁶See, for example, S. L. Glashow and M. Gell-Mann, *Ann. Phys. (N. Y.)* **15**, 437 (1961).

⁷These are just the parameters which, if the scalar octet interacts with baryons and mesons, lead to the Gell-Mann-Okubo and electromagnetic mass splittings: See S. Coleman and S. L. Glashow, *Phys. Rev.* **131**, B671 (1964).

⁸Tentative proposals that incomplete $SU(3)$ octets of scalar particles exist have been made by a number of people. Such a rôle, as an isolated $Y = \pm 1$, $I = \frac{1}{2}$ state, was proposed for the κ meson (725 MeV) by Y. Nambu and J. J. Sakurai, *Phys. Rev. Letters* **11**, 42 (1963). More recently the possibility that the σ meson (385 MeV) may be the $Y = I = 0$ member of an incomplete octet has been considered by L. M. Brown, *Phys. Rev. Letters* **13**, 42 (1964).

⁹In the theory of superconductivity the scalar fields are associated with fermion pairs; the doubly charged excitation responsible for the quantization of magnetic flux is then the surviving member of a $U(1)$ doublet.

➔ erste Version abgelehnt

- Gutachter war Yoichiro Nambu, der vorschlug, einen Abschnitt über die Auswirkungen der Theorie hinzuzufügen
- Higgs ergänzte, daß die Anregung des Feldes zu einem neuen Teilchen führen würde...

➔ ...getauft "Higgs boson"

- durch Theoretiker Ben Lee auf der Rochester Konferenz 1966

Das Higgs-Feld

Das Higgs-Feld existiert überall im gesamten Universum

→ Das Vakuum ist nie leer, sondern immer erfüllt mit dem Higgs-Feld

- Higgs-Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld

→ (Ein) wesentlicher Unterschied:

- el. + magn. Felder sind gerichtet (Vektorfelder), Higgs-Feld hat keine Richtung (Skalarfeld)

Potential $V(\Phi)$ des Higgs-Feldes Φ

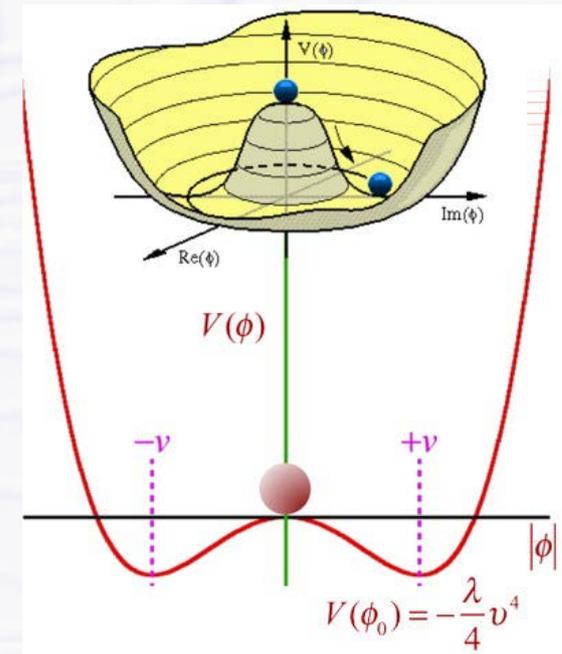
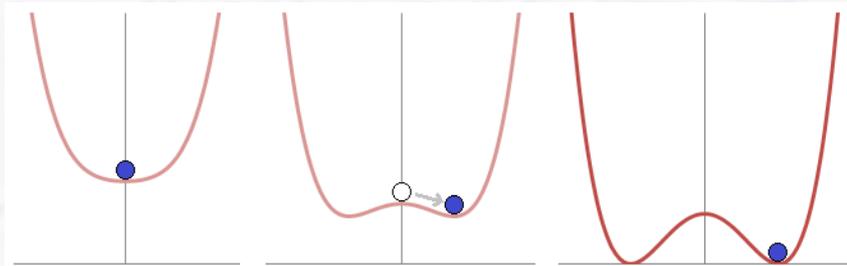
$$V(\Phi) = +\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$

Φ ist komplex
(2 Komponenten)

→ Sombrero-artige Form (“Mexikanischer Hut“)

→ Entstehung unmittelbar nach dem Urknall

heiss (E > 10¹⁵ GeV, T > 10³⁰ K) kühler kalt (E < 10¹⁴ GeV, T < 10²⁹ K)



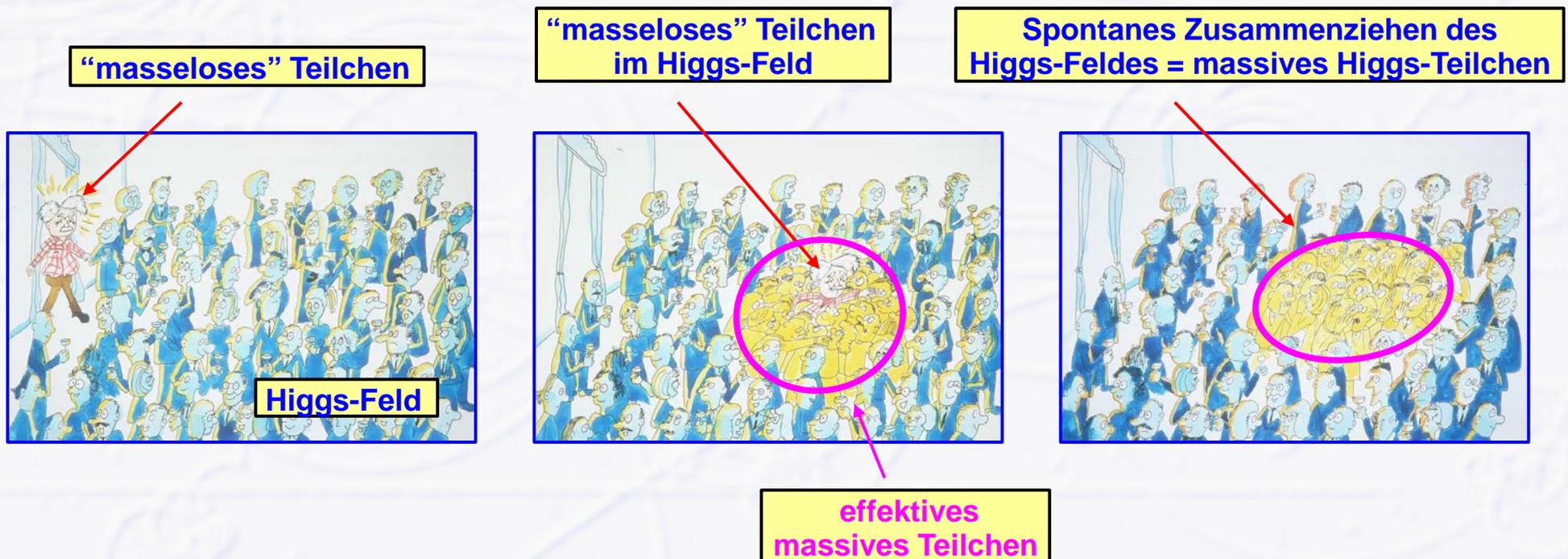
Minimum bei $|\Phi| \neq 0$
 (“Vakuumerwartungswert” = v)

v entspricht einer Energie des Vakuums von 246 GeV

Higgs-Mechanismus: Analogie 1

● Veranschaulichung im “Klassischen Bild”

- von **David Miller** (UC London) 1993 zum damaligen britischen Wissenschaftsminister auf dessen Frage zur Bedeutung des Higgs-Teilchens
 - ...und warum er dafür Steuergelder ausgeben sollte
- Vergleich mit politischer Partei (**Parteimitglieder = Higgs-Feld**) und dem plötzlichen Auftreten der **Parteivorsitzenden (masseloses Teilchen)**



Higgs-Mechanismus: Analogie 2

Alternatives Bild: Higgs-Feld als zähe Flüssigkeit

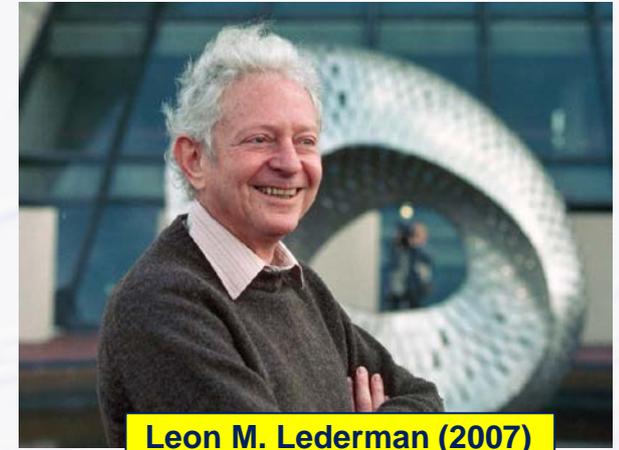
- masselose Teilchen durchqueren die Flüssigkeit
- zunächst lichtschnelle Teilchen (masselos) werden durch die zähe Flüssigkeit verlangsamt (Verleihung von Masse)
- **Verschiedene Teilchen erfahren unterschiedliche Viskositäten (unterschiedlich starke Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld)**
 - wenig Viskosität (Luft) = wenig Verlangsamung = leichtes Teilchen
 - mittlere Viskosität (Wasser) = stärkere Verlangsamung = mittelschweres Teilchen
 - hohe Viskosität (Sirup) = starke Verlangsamung = schweres Teilchen
- **Higgs-Teilchen als kurzzeitiger Anregungszustand der zähen Flüssigkeit (Higgs-Feld)**



“Das Gottesteilchen”

● “erfunden” von Leon M. Lederman

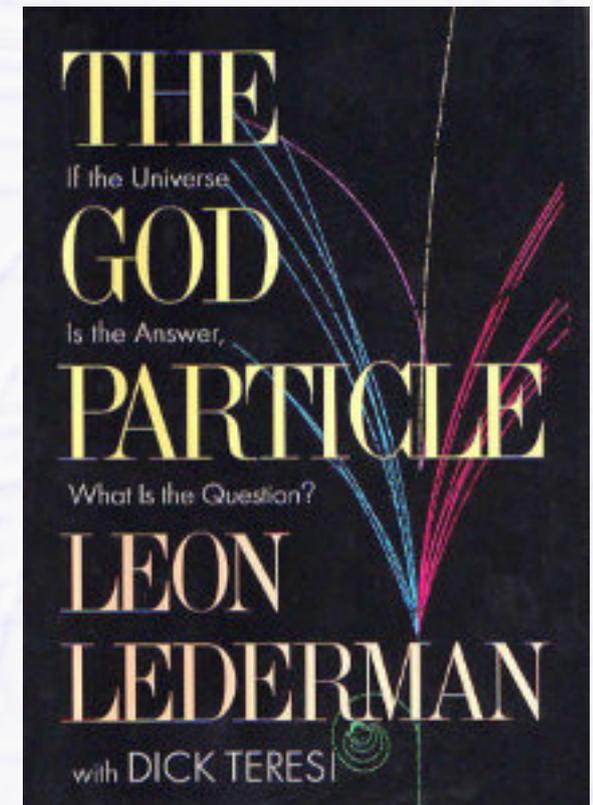
- geboren 1922, früherer Fermilab Direktor
- Nobelpreis 1988 (mit Melvin Schwartz und Jack Steinberger) für die Entdeckung des Myon Neutrinos 1962



● Lederman schrieb 1993 ein Buch über Teilchenphysik und das Higgs Boson (mit Wissenschaftsjournalist Dick Teresi)

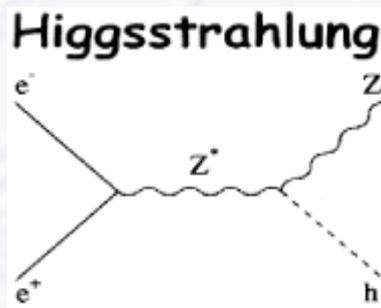
- und gab dem Higgs Boson den Spitznamen “**Das Gottesteilchen**”

- weil das Teilchen "so central to the state of physics today, so crucial to our final understanding of the structure of matter, yet so elusive"
- und weil "the publisher wouldn't let us call it the Goddamn Particle, though that might be a more appropriate title, given its villainous nature and the expense it is causing."



LEP Higgs Hunting

- Erwartete Higgs Erzeugung bei LEP über "Higgsstrahlung"



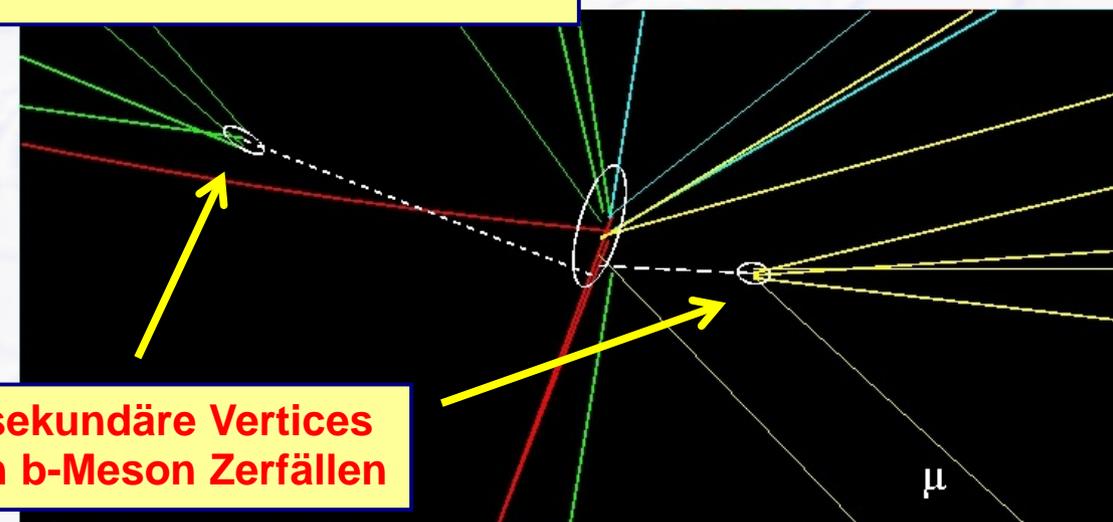
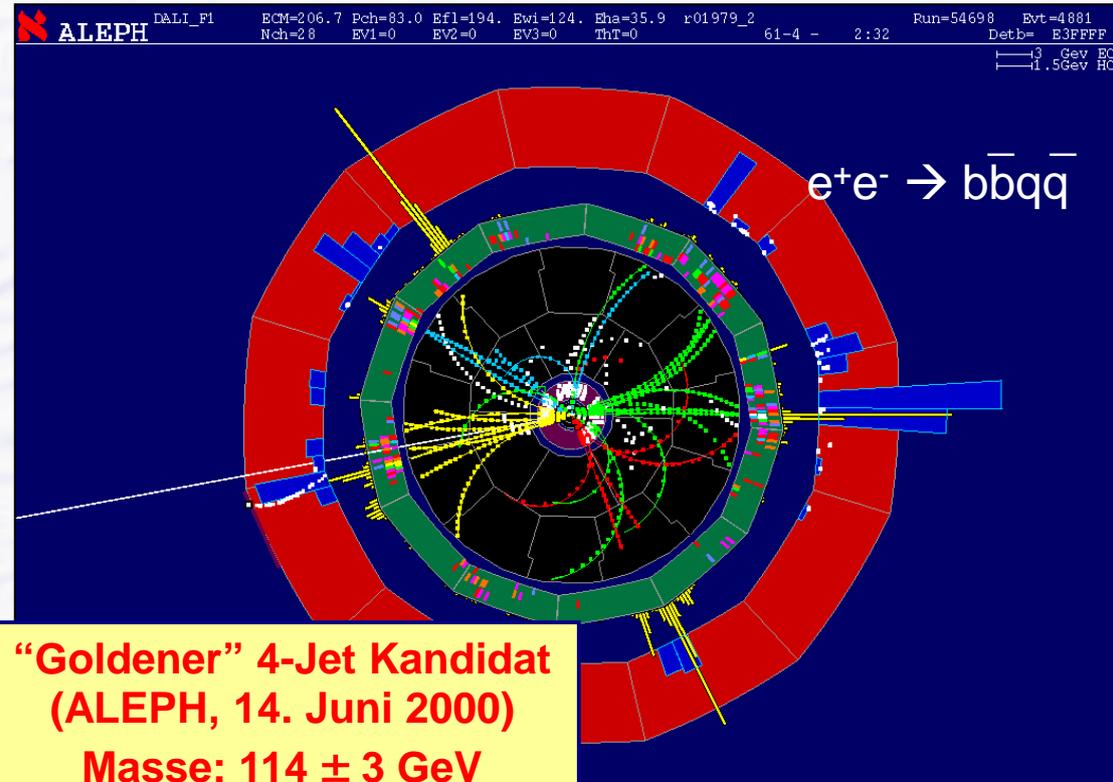
- Zerfall von Z^0 und Higgs

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q} \quad (2 \text{ Quark Jets})$$

$$H \rightarrow b\bar{b} \quad (2 \text{ b-Quark Jets})$$

→ b-Mesonen haben lange Lebensdauer

- sichtbare sekundäre Zerfälle abseits vom Kollisionspunkt



LEP "Higgs"

Am Ende des geplanten LEP Betriebs (November 2000)

→ Hinweise auf ein Higgs Signal, einige Ereignisse mit $M_{\text{Higgs}} \sim 115 \text{ GeV}$, 2-3 σ über dem erwarteten Untergrund... "very exciting"!!!

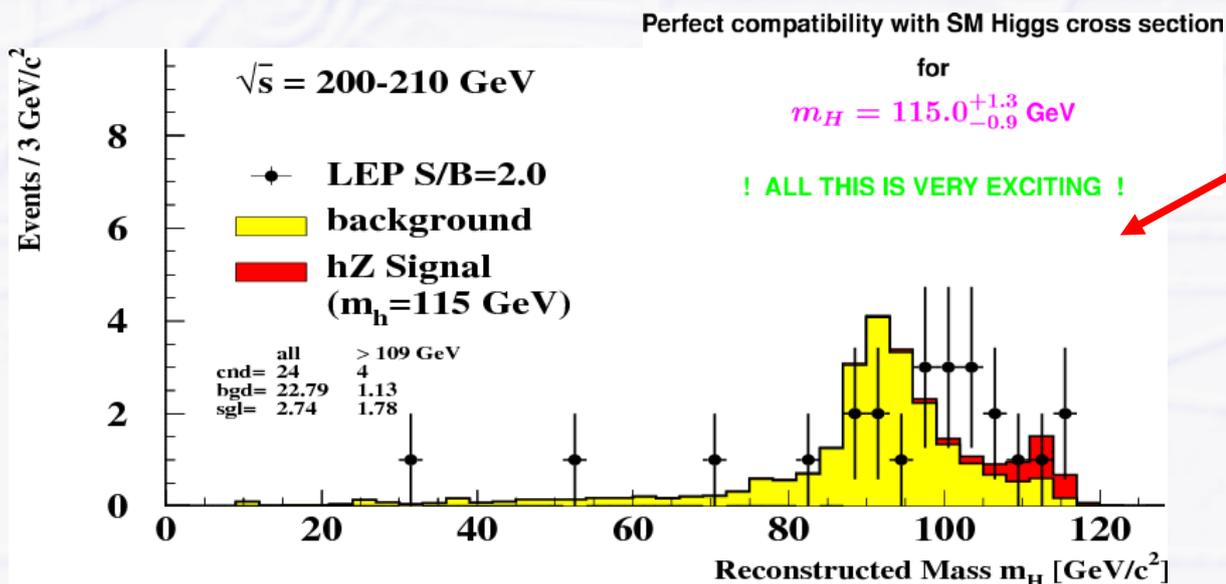
> 3 σ : "evidence for..." (Flüge nach Stockholm checken...)

> 4 σ : "strong evidence for..." (Flug nach Stockholm buchen...)

> 5 σ : "discovery of..." (Nach Stockholm fliegen...)

→ laaange Diskussion in Komitees + CERN Management

weiteres Jahr LEP Betrieb? oder nicht? Einfluß auf LHC Bau?



LEP Higgs Working Group
beim LEPC Seminar am 3. November 2000,
einen(!) Tag nachdem LEP abgeschaltet war
(Peter Igo-Kemenes)

...endgültige Entscheidung
durch das CERN Council...

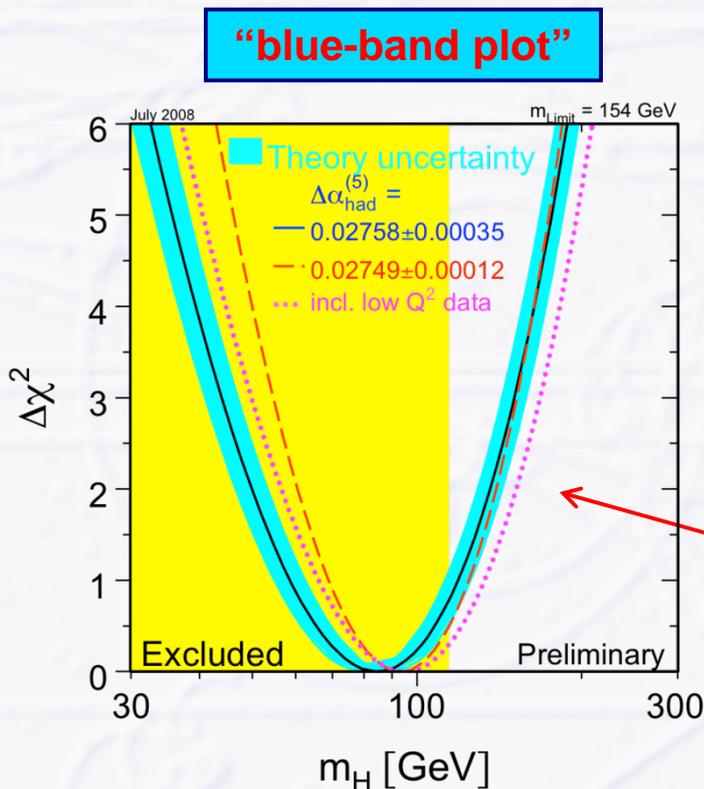
NEIN



LEP Higgs (Juli 2008, vor LHC Start)

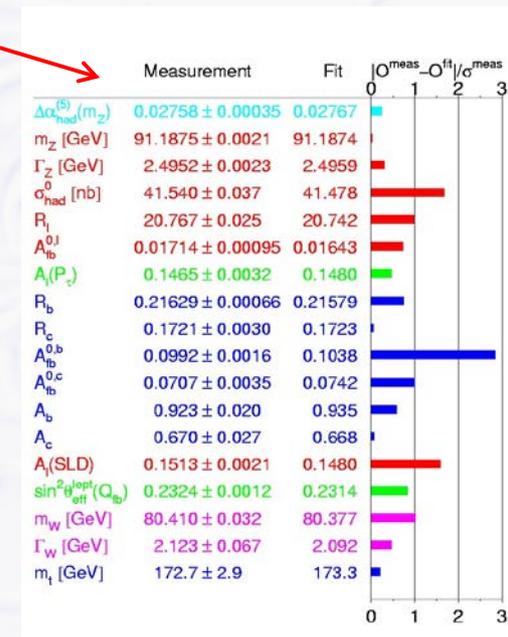
LEP Ausschlußgrenzen vor Beginn des LHC

- $M_{\text{Higgs}} > 114.4 \text{ GeV}$ (direkte Suche nach Higgs-Zerfällen)
- $M_{\text{Higgs}} < 154 \text{ GeV}$ (indirekt aus Präzisionsmessungen anderer Zerfälle)
- wahrscheinlichster Wert: $M_{\text{Higgs}} = 84 (+^{34} -_{26}) \text{ GeV}$
 - (nicht weit entfernt vom derzeitigen LHC Wert: 125.5 GeV)



Abweichung in σ der besten Anpassung an die Standard Modell Messergebnisse mit M_{Higgs} als freiem Parameter

χ^2 - Wahrscheinlichkeit für M_{Higgs}



Tevatron übernimmt von LEP

- Nach Ende von LEP, weitere Higgs Jagd in USA

→ Tevatron collider am Fermilab (FNAL, 50 km westlich Chicago)

→ Protonen und Antiprotonen Kollisionen bei $2 \times 0.98 \text{ TeV}$

- Energie 4 × geringer als LHC Run1 , Luminosität (~ Anzahl Kollisionen) 20 × geringer

- **2 Experimente**

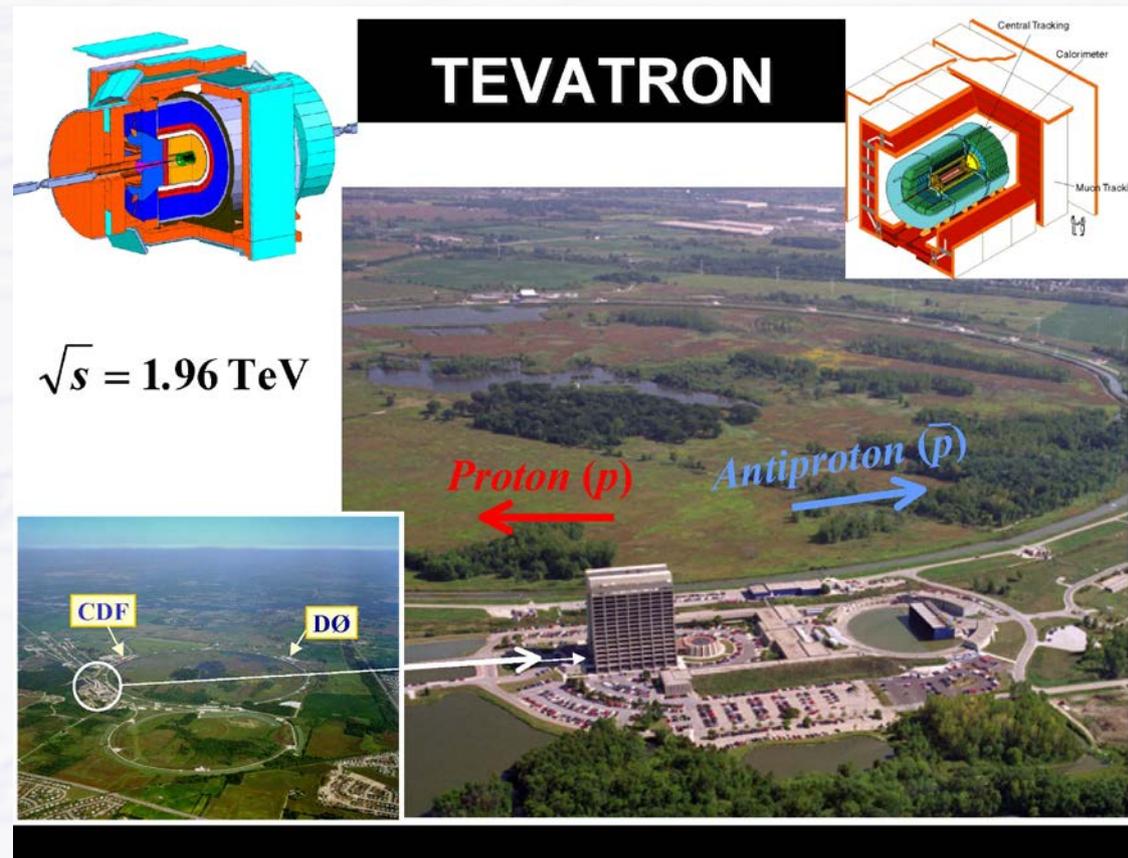
→ CDF, D0

→ top Quark Entdeckung 1995

→ wichtige Messungen zu top und bottom Quark Eigenschaften

→ top Quark Masse!

- wichtig für viele Berechnungen und Korrekturen



Tevatron Higgs Jagd

Seit 2000 Higgs Jagd am Tevatron

- Energie und Luminosität geringer als LHC
- Higgs Entdeckung nur möglich im Bereich 160...170 GeV
 - abgeschaltet am 30. September 2011 nach 25 Jahren Betrieb

Higgs Endergebnisse verkündet am 2. Juli 2012

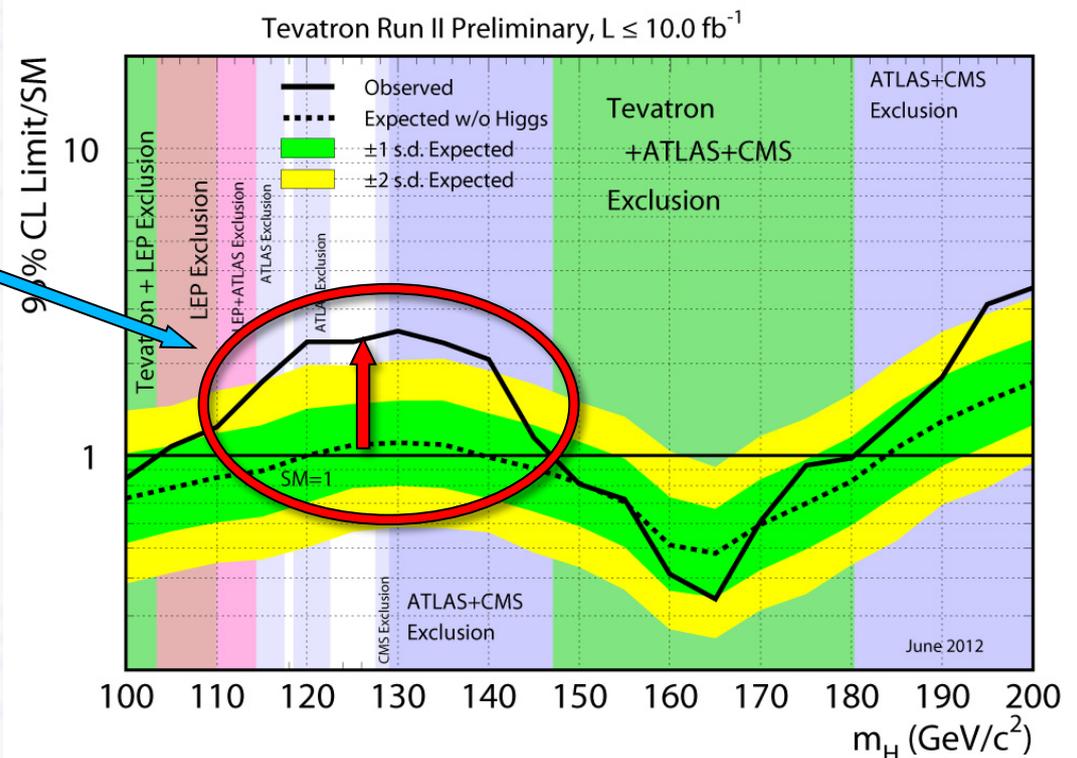
(2 Tage vor dem historischen CERN Seminar mit der Higgs Entdeckung)

- 2.9 σ Anhäufung im Massenbereich 115 – 135 GeV

Typischer “Brazil plot”

- Abweichung in σ von den erwarteten Ergebnissen für “kein Higgs” im gesamten Massenbereich der Suche

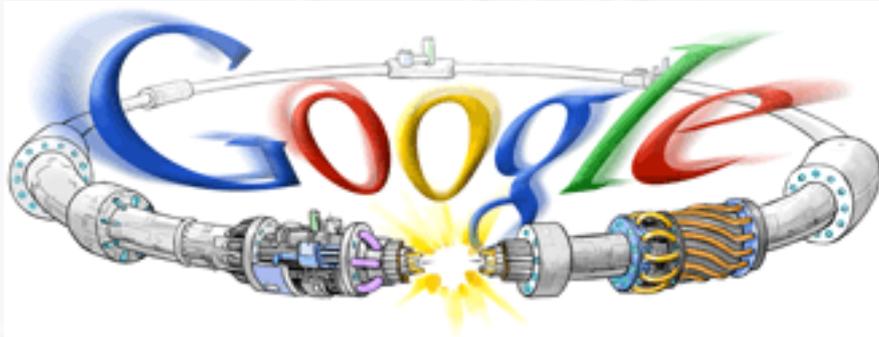
- 1 σ = grün, 2 σ = gelb



“Erstes Higgs” am LHC (4. April 2008)



LHC Start – 10. September 2008



● Größtes Medienevent in der Geschichte der Wissenschaft

- Top News weltweit (keine weiteren Katastrophen, Politikevents etc.)
- Eurovision live satellite feed von 9:00-18:00 + Webcast
 - 2500 TV Ausstrahlungen
 - mehrere hundert Millionen Zuschauer
- 260 akkreditierte Journalisten
 - 5800 Presseartikel
- 100 Millionen Hits auf den CERN Webseiten



CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)



LHC Start in deutschen Medien

DAS GRÖSSTE EXPERIMENT ALLER ZEITEN

Ab heute urknallt's

Frankfurter Allgemeine
ZEITUNG FÜR DEUTSCHLAND

1.9.2008 4. F. & E. im Internet: f.a.z.net

Jetzt geht es rund

Das Forschungszentrum Cern nimmt heute der größte Teilchenbeschleuniger der Welt in Betrieb



Das Streiflicht
Die Welt hat heute noch nicht von dem Moment gewusst, als der Teilchenbeschleuniger LHC in Betrieb genommen wurde. Die ersten Teilchenkollisionen werden erst am Montag stattfinden. Bis dahin wird die Maschine mit Protonen beaufschlagt werden. Die ersten Teilchenkollisionen werden am Montag stattfinden. Bis dahin wird die Maschine mit Protonen beaufschlagt werden.

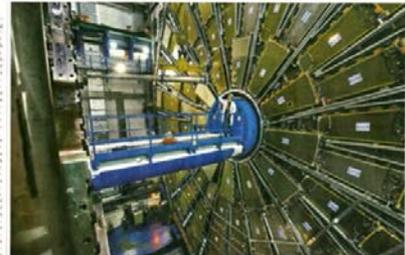
„Ich muss gar nichts“: Warum Nicolas Hayek Aktionäre ignoriert / Wirtschaft

Süddeutsche Zeitung

NEUESTE NACHRICHTEN AUS POLITIK, KULTUR, WIRTSCHAFT UND SPORT

München, Donnerstag, 11. September 2008

Das größte Experiment der Menschheit



Die Urknall-Maschine läuft
Das Weltwunder an der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz ist heute in Betrieb. Die ersten Teilchenkollisionen werden am Montag stattfinden. Bis dahin wird die Maschine mit Protonen beaufschlagt werden.

Karlsruhe uneinig
Verfassungsrichter beraten über Pensionszuschüsse

Bedienschulung bleibt vielen Senioren erspart

Verschwinden wir in ein schwarzes Loch?

Nicht Dritter

Die Partikel Detektor sollen heute in Betrieb genommen werden. Die ersten Teilchenkollisionen werden am Montag stattfinden. Bis dahin wird die Maschine mit Protonen beaufschlagt werden.



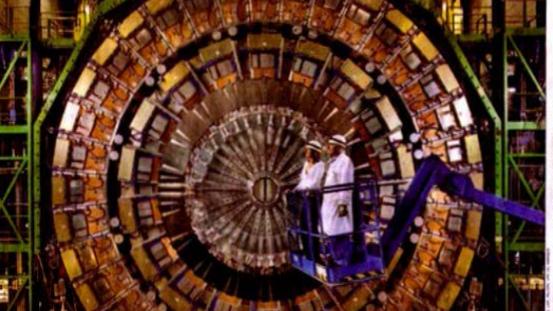
DER SPIEGEL

DIE SEKUNDE NULL



Die erste Teilchenkollision an der Weltmaschine

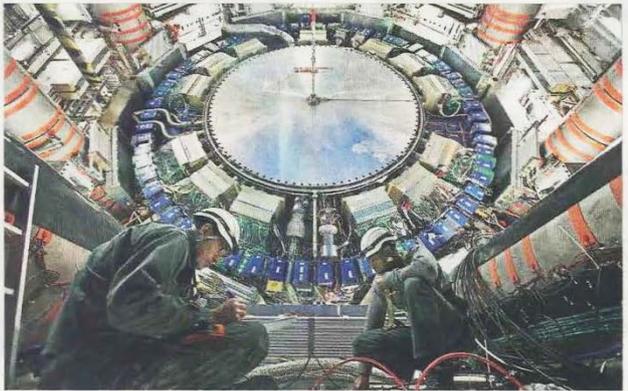
Das größte Experiment der Menschheit



Es ist ein Versuch der Superlativ: In einem 27 Kilometer langen Ringstadium unter der französischen-schweizerischen Grenze bei Genf werden heute zum ersten Mal Protonen beschleunigt. Mit der größten Experimentieranlage der Welt, dem Cern, sollen grundlegende Fragen der Teilchenphysik und Kosmologie erstmals beantwortet werden. Zuletzt hatte der LHC genannte Teilchenbeschleuniger nach knapp fünfjähriger Bauzeit für Schlagzeilen gesorgt, weil einige Skandale durch die geplanten Versuche des Untergang der Welt befeuert. N.J.

Zertrümmern und Erkennen

Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“, dem Teilchenbeschleuniger LHC, werden heute am Forschungszentrum Cern bei Genf in bislang unbeobachtete Regionen stattfinden.



DER SPIEGEL

KulturSPIEGEL

Die ersten Teilchenkollisionen an der Weltmaschine

DER TAGESSPIEGEL

Ikone des Behindertensports: **Marianne Buggenhagen** gewinnt mit 55 Jahren Gold – Seite 19

Zurück im Job: Wie sieben Berliner wieder Arbeit fanden – Seite 11

Auf ewig mit Stil: **Karl Lagerfeld** feiert 75. Geburtstag – Seite 28

Supermaschine am Start

Berlin: Rot-Rot ohne Opposition

Der LHC Unfall – 19. September 2008

● Aufschmelzen einer schlechten Stromverbindung (13'000 A)

- sehr heisser elektischer Lichtbogen
- Zerstörung der unmittelbaren Umgebung
- ➔ + Heliumgas Druckwelle
- weitere mechanische Verschiebungen über 700 m Strecke

● Reparatur über mehr als 1 Jahr

- Entdeckung weiterer Schwachstellen, die mehr Zeit benötigt hätten
- ➔ Entscheidung 2009: LHC Betrieb vorerst nur bei $\sim 1/2$ **Energie** von 2010-12
- danach lange Instandsetzungsphase 2013-14

● **Volle Energie ab 2015**



Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie

ATLAS Kontrollraum



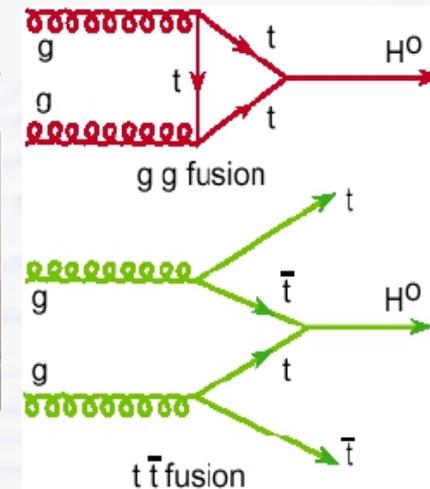
Higgs-Teilchen Produktion und Zerfall

Higgs-Feld Nachweis durch Higgs-Teilchen

→ Higgs-Teilchen = kurzzeitige Anregung des Higgs-Felds

◦ (Ähnlich einem Wirbel ~ Anregung der Luft)

→ Teilchen müssen mit hoher Energie kollidieren, das Higgs-Feld anzuregen und ein Higgs-Teilchen zu erzeugen



Higgs-Teilchen Zerfälle sind bekannt

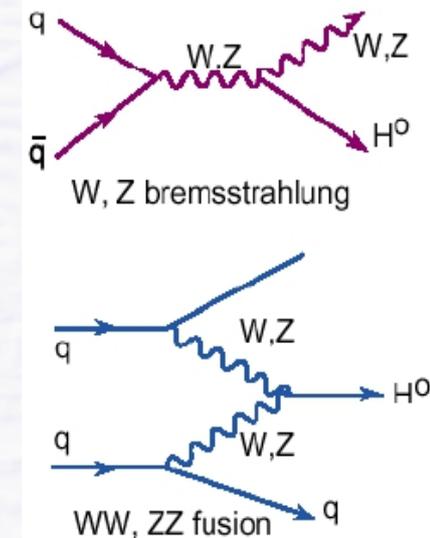
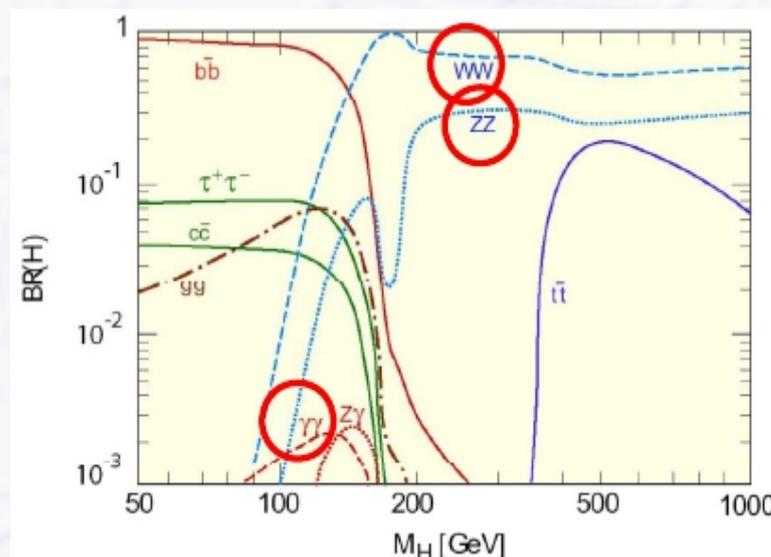
→ nur abhängig von der (zunächst unbekannt) Masse

→ Vektor Boson Zerfälle

- $H \rightarrow ZZ$ (wenn M_H groß)
- $H \rightarrow WW$ (wenn M_H groß)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (wenn M_H klein)

→ Zerfälle in Fermionen

- $H \rightarrow \tau\tau$ (wenn M_H klein)
- $H \rightarrow bb$ (wenn M_H klein)



Higgs Produktionsrate

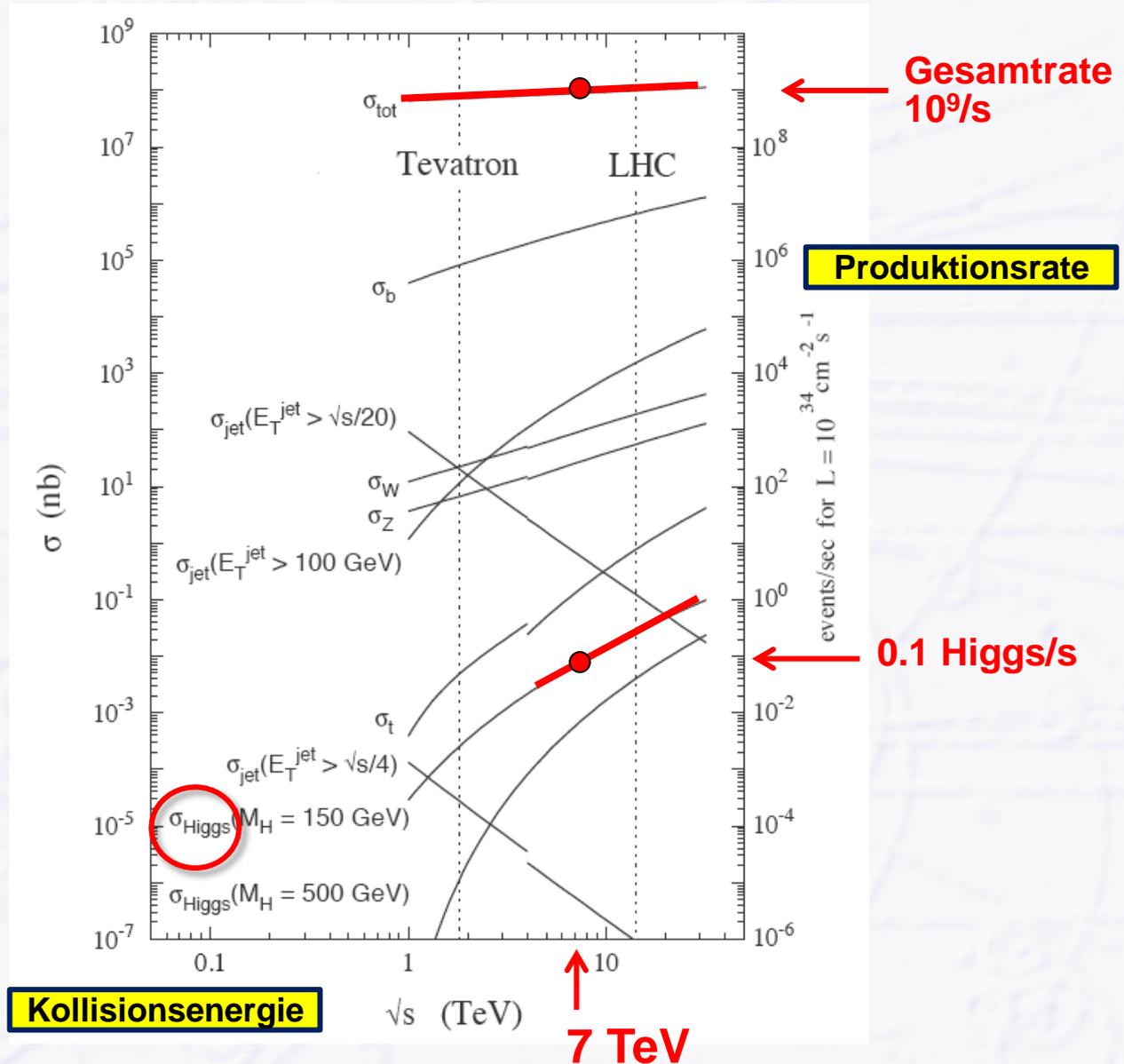
- **Produktionsrate:**
~100 Higgs-Teilchen pro Stunde

→ Seit Beginn der ATLAS Datennahme wurden ca. 300'000 Higgs-Teilchen produziert

- **ABER: Higgs-Teilchen zerfallen sofort nach der Erzeugung**

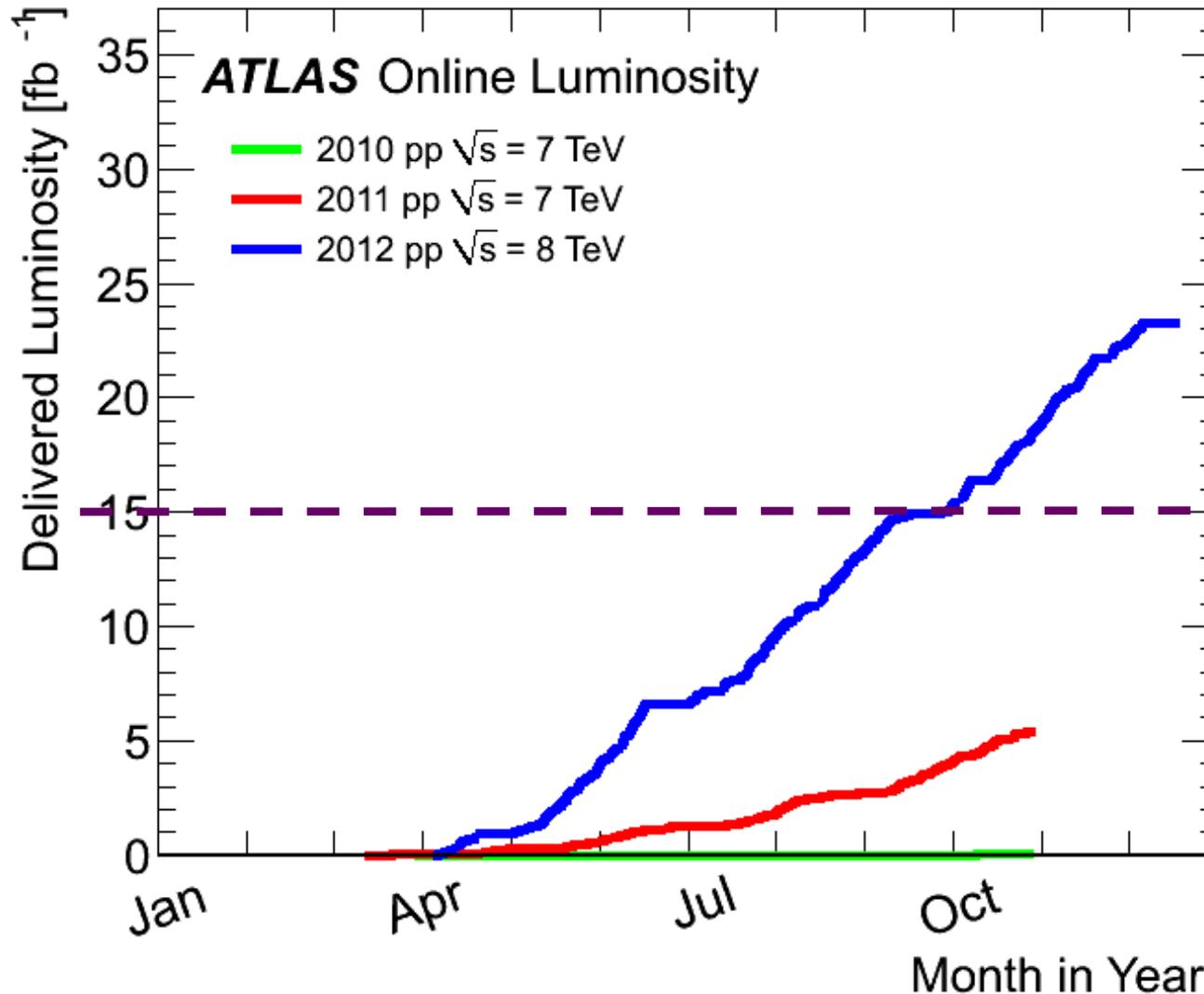
- nur wenige (seltene) Zerfallskanäle eignen sich zum Nachweis

→ nur ~1'000 Higgs-Teilchen wurden nachgewiesen



Entwicklung der LHC Luminosität

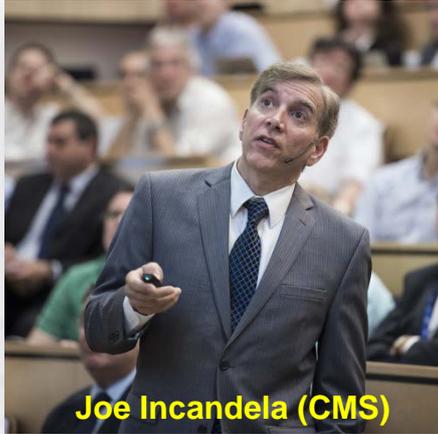
- LHC Start im März 2010 mit hochenergetischen pp Kollisionen



Ziel für 2012

← 4. Juli 2012

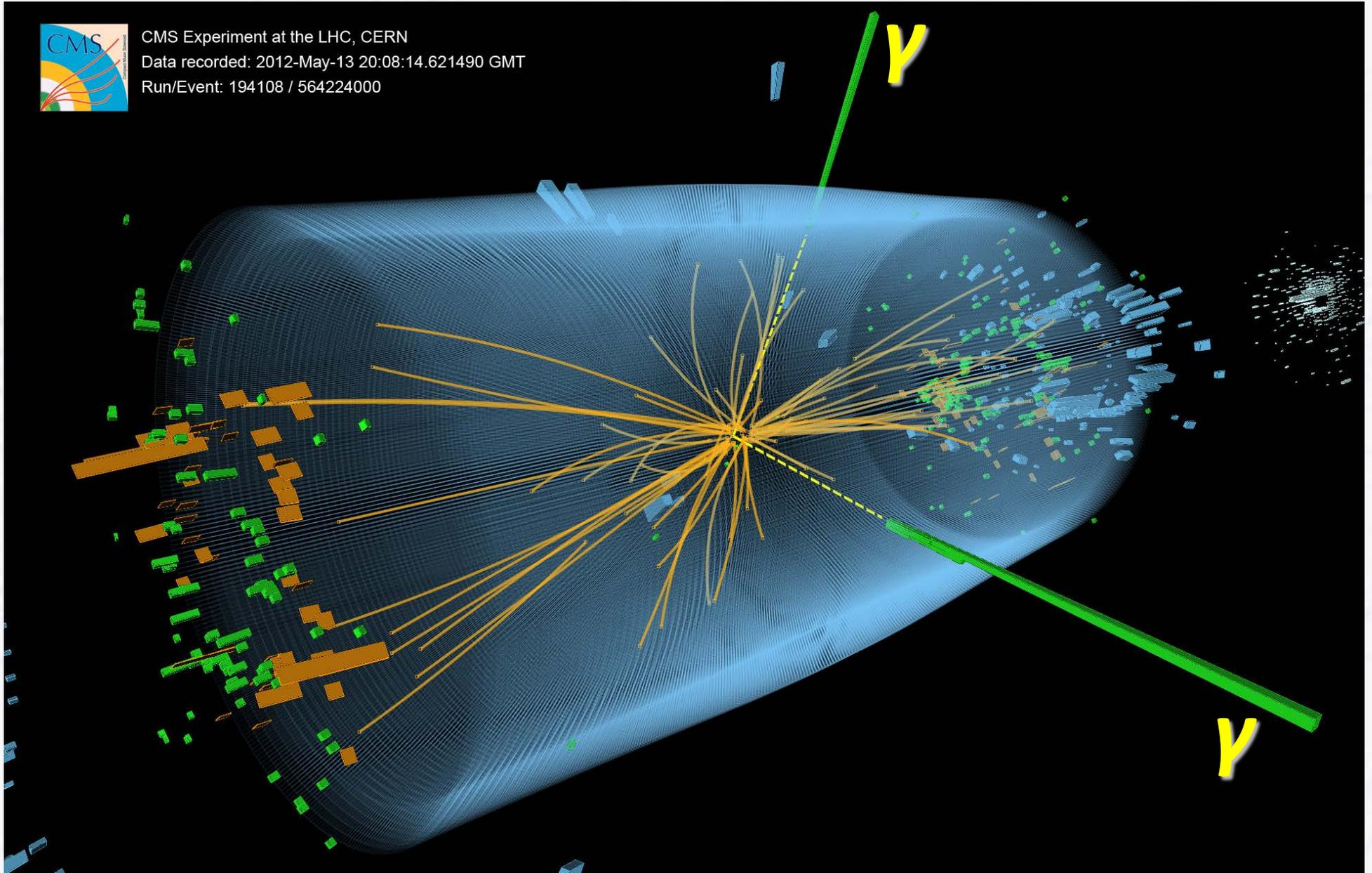
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



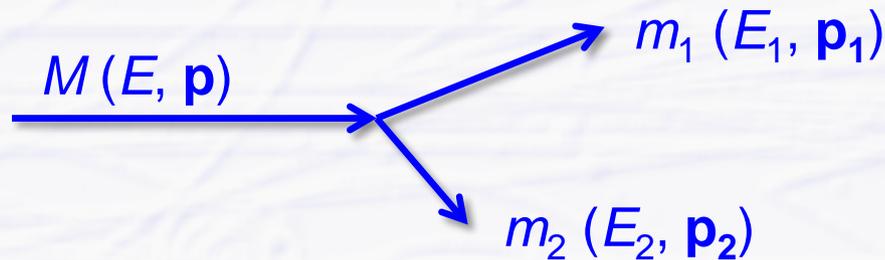
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Invariante Masse

- Die Ruhemasse M eines Teilchens ist konstant in allen Bezugssystemen (= **“invariante Masse”**)

→ Beim Zerfall des Teilchens bleibt die invariante Masse des Systems der Tochterteilchen erhalten



Invariante Masse

$$\begin{aligned} M^2 &= (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2) \end{aligned}$$

- Spezialfall: masselose Tochterteilchen**

→ z.B. Higgszerfall in 2 Photonen: $H \rightarrow \gamma \gamma$

$$\begin{aligned} M^2 &= (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\|^2 \\ &= [(p_1, 0, 0, p_1) + (p_2, 0, p_2 \sin \theta, p_2 \cos \theta)]^2 = (p_1 + p_2)^2 - p_2^2 \sin^2 \theta - (p_1 + p_2 \cos \theta)^2 \\ &= \boxed{2p_1 p_2 (1 - \cos \theta)} \end{aligned}$$

- Messung der Higgsmasse aus Photonimpulsen + Winkel**

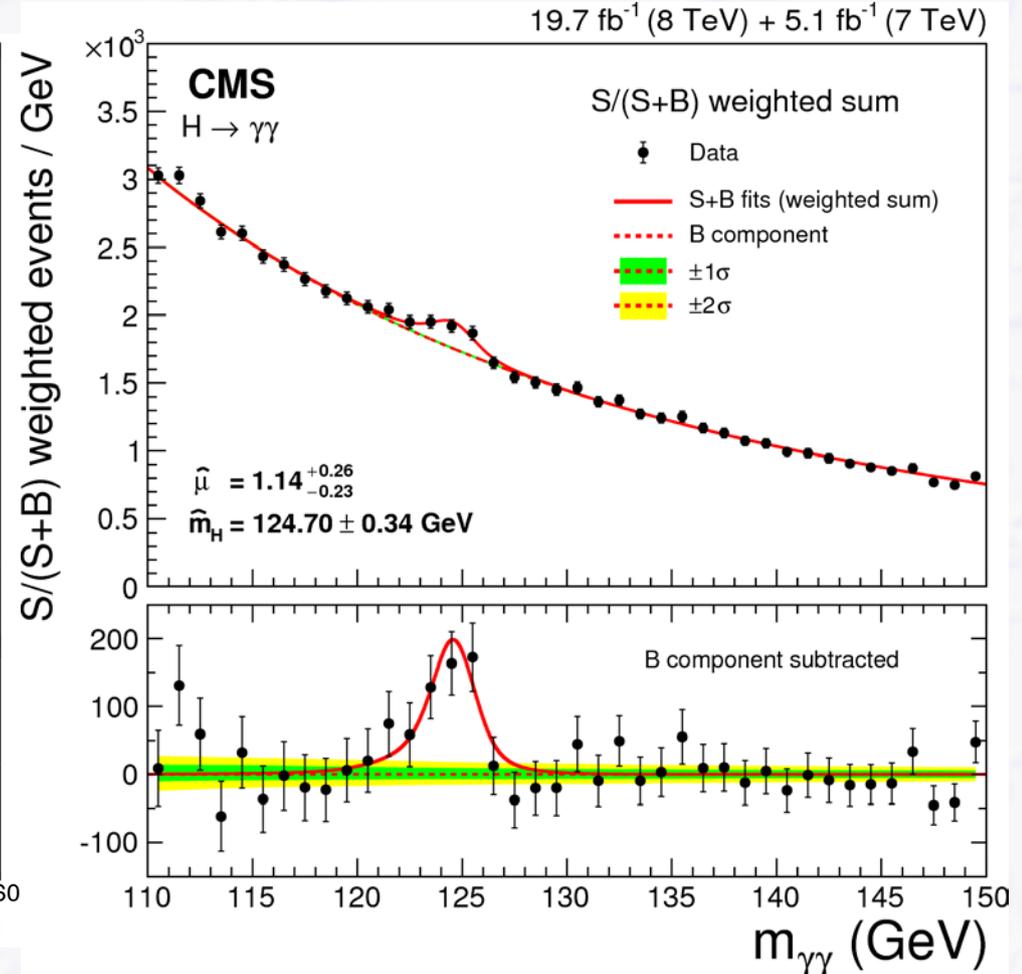
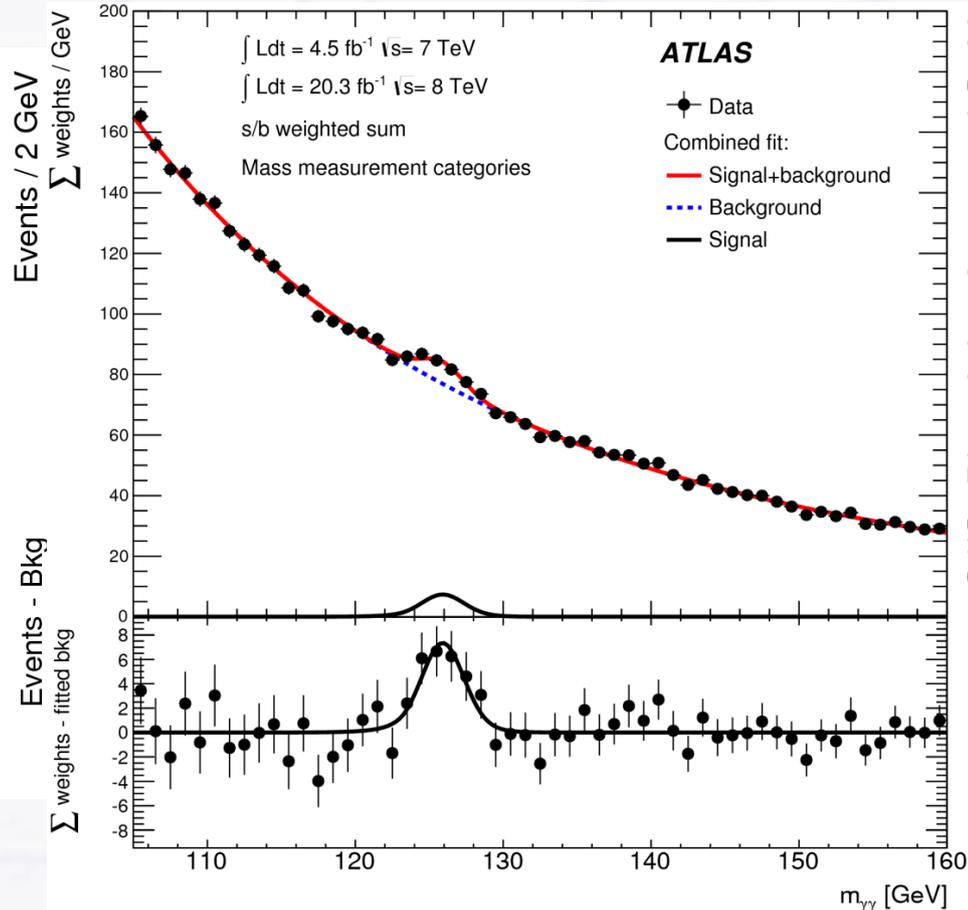
$H \rightarrow \gamma\gamma$

● **Beste Zerfallskanal für $M_H < 120$ GeV**

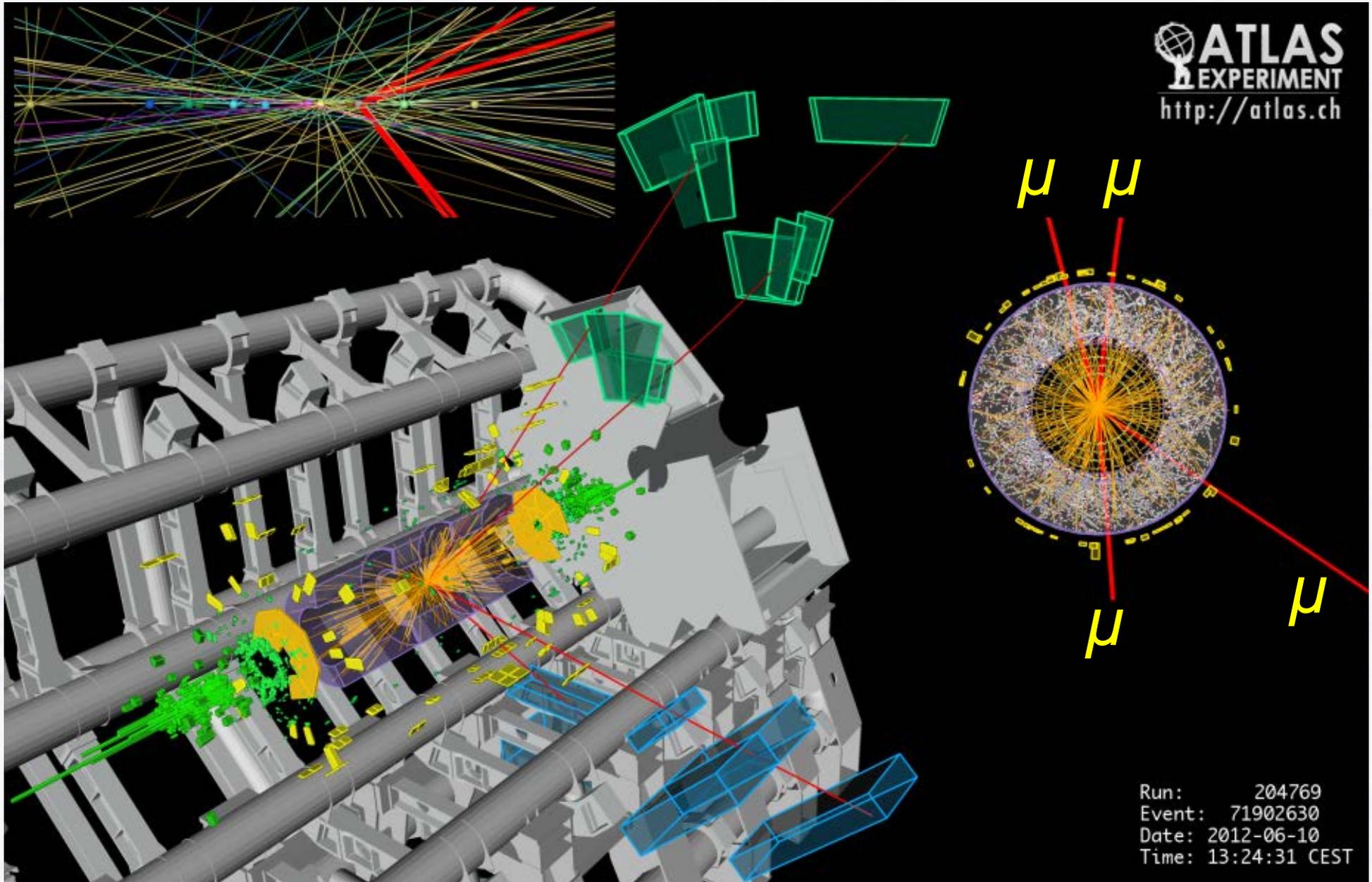
➔ **zweitbeste Zerfallskanal für $120 < M_H < 130$ GeV**

● **Trotzdem nur kleines Signal über großem Untergrund**

Stand: 16. Juni 2014



Higgs Zerfall $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

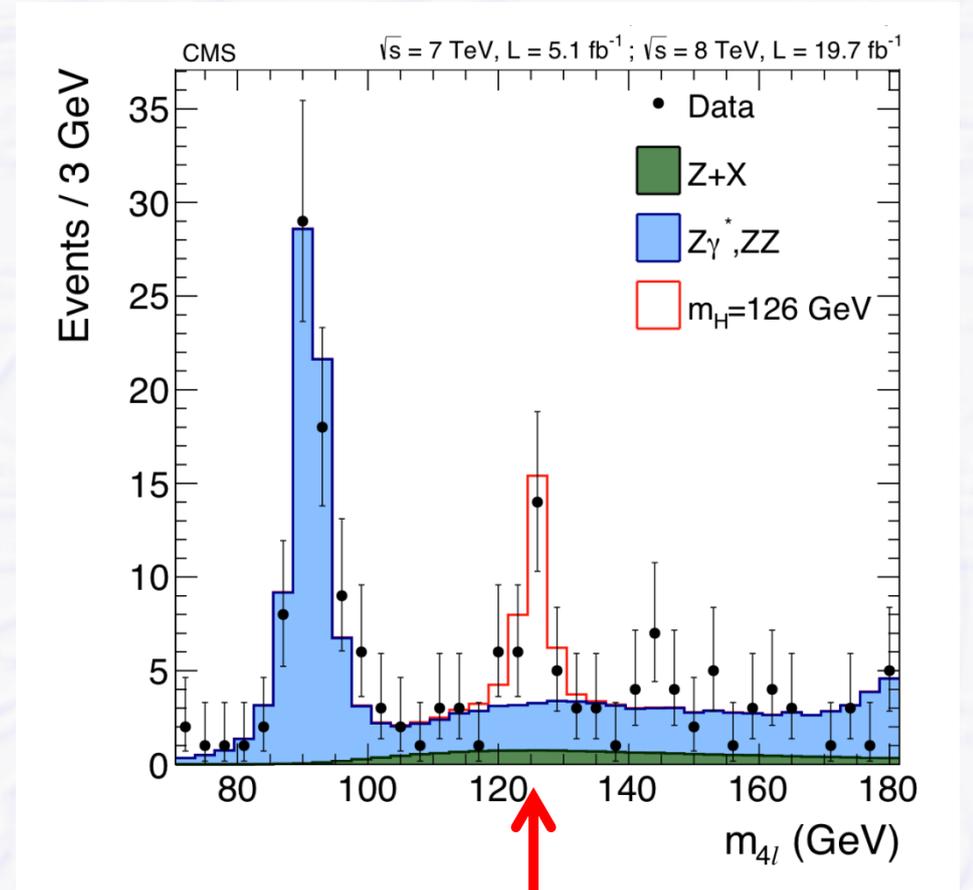
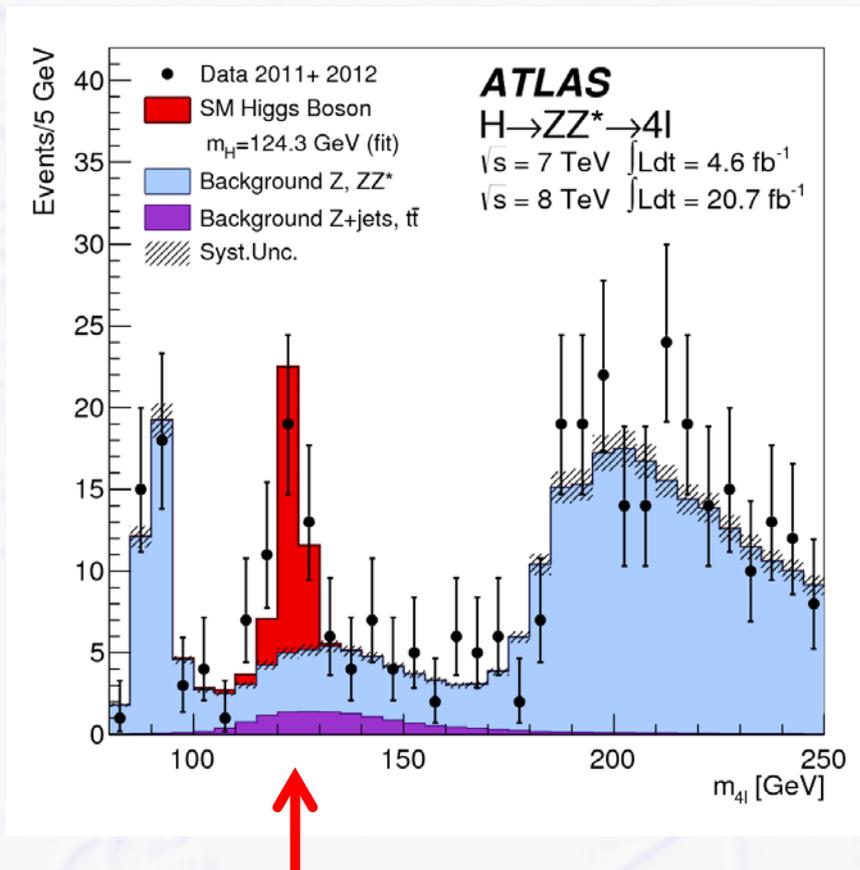


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptons}$

”Goldener Zerfallskanal”

- praktisch “kein” Untergrund
- bester Zerfallskanal für $200 \text{ GeV} < M_H < 300 \text{ GeV}$
- zweitbestener Zerfallskanal (nach WW) für $130 \text{ GeV} < M_H < 200 \text{ GeV}$
- ➔ aber sehr viel bessere Massenauflösung als WW

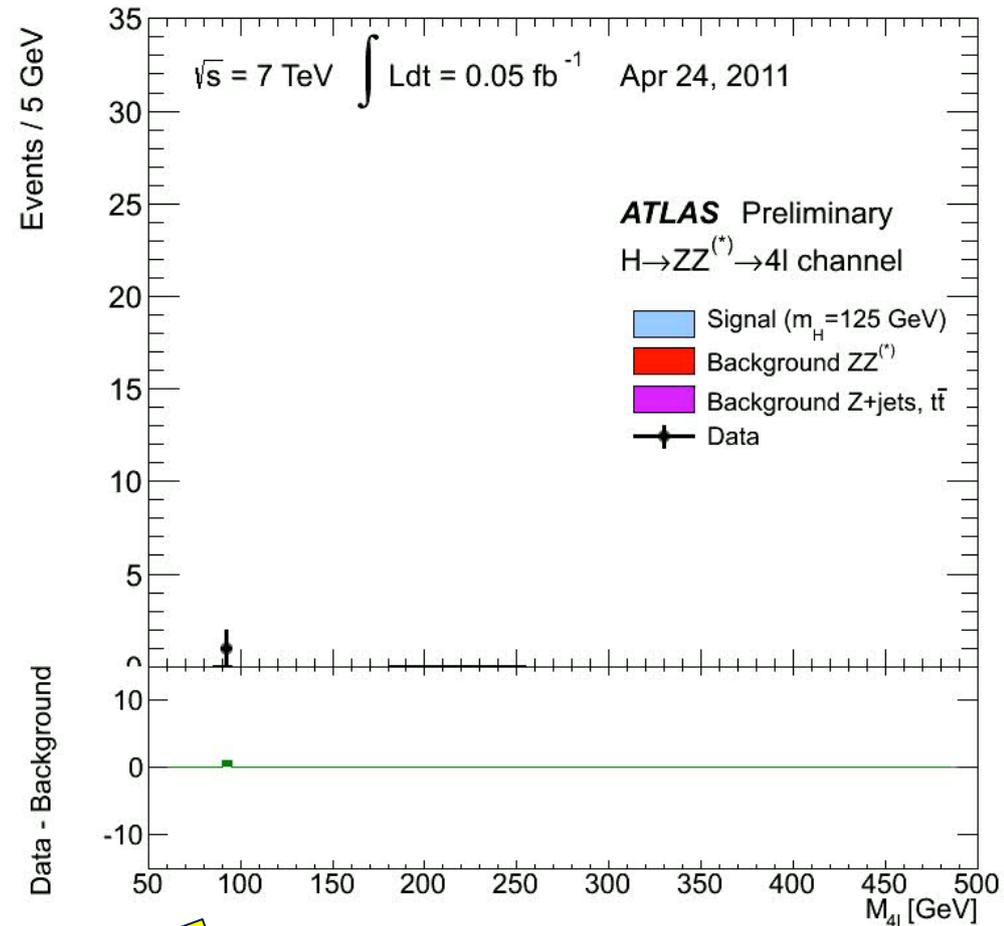
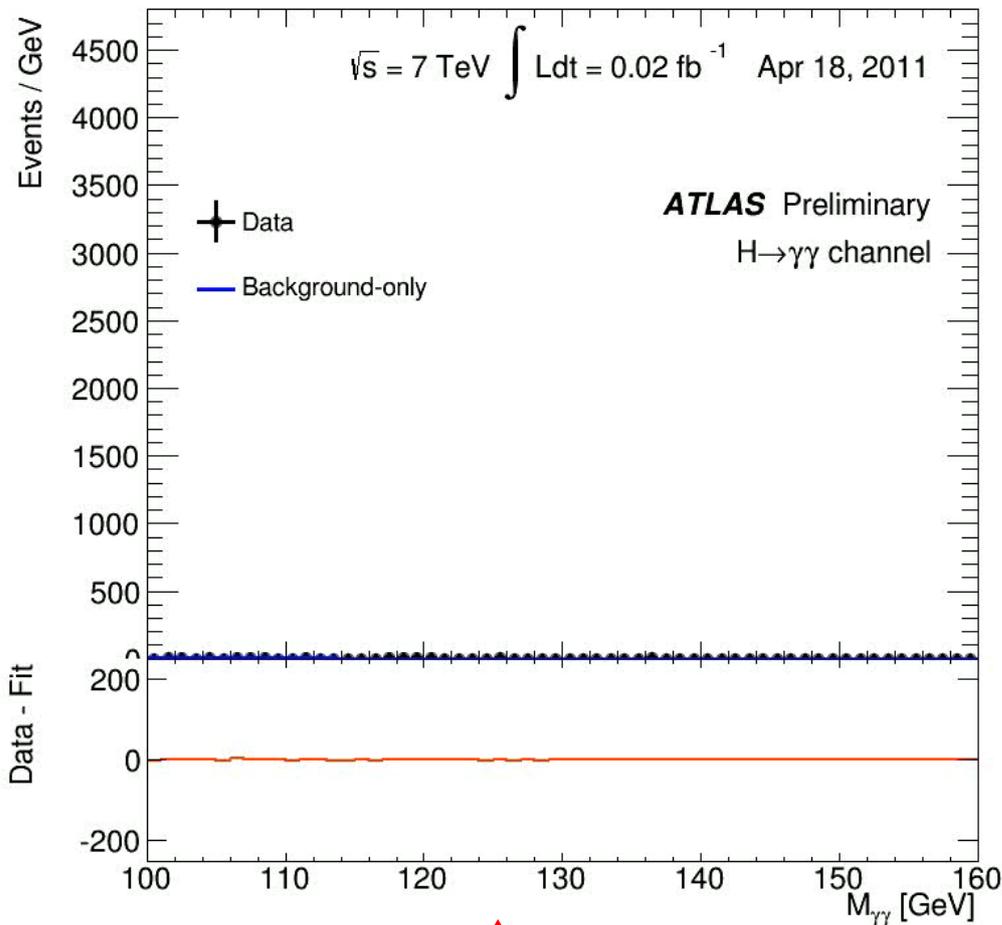
Stand: 16. Juni 2014



Higgs Signifikanz wächst mit der Zeit...

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow 4l$

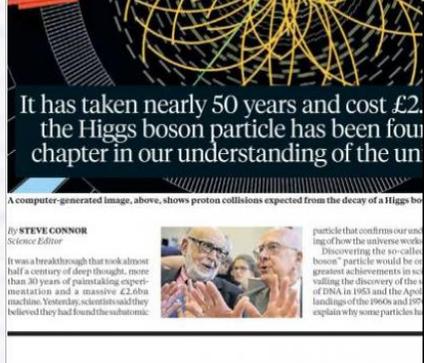


Higgs hier

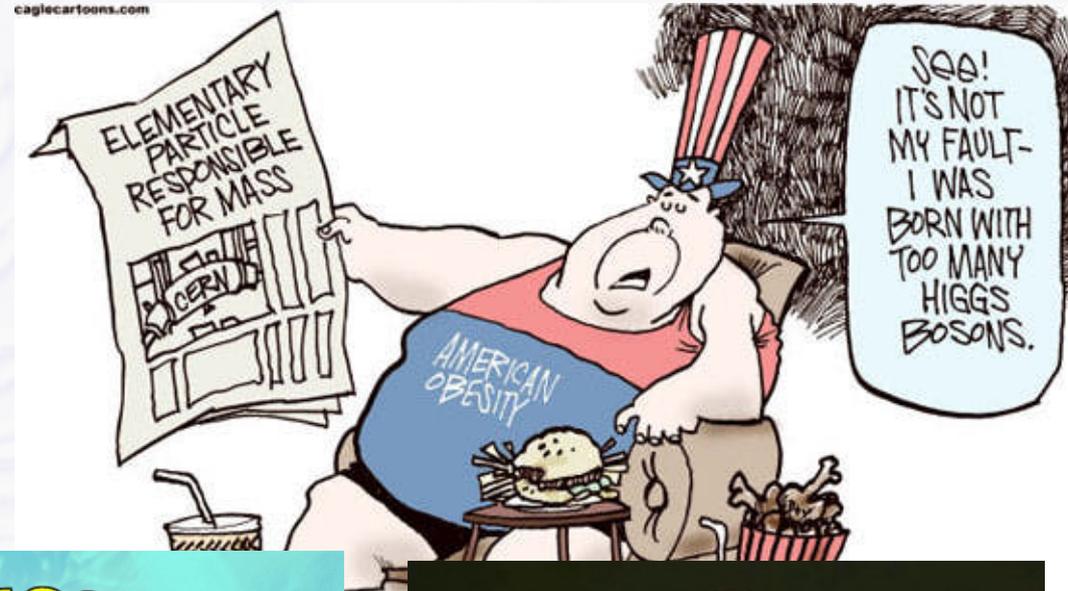
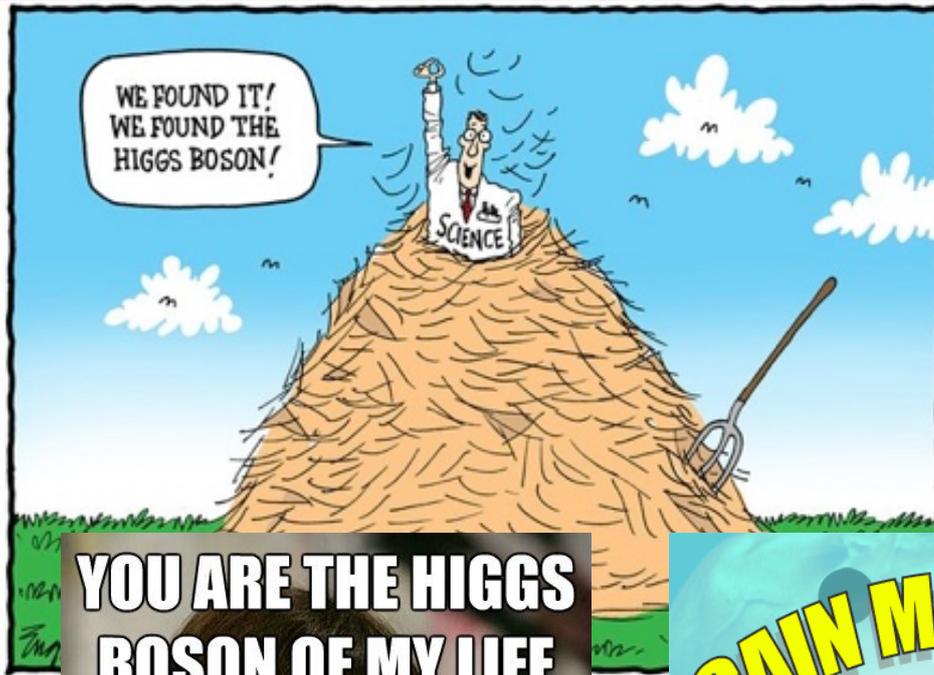
Alle Daten von 2011 + 2012

Higgs hier

Higgs in den Medien



Higgs wird Allgemeingut...



**YOU ARE THE HIGGS
BOSON OF MY LIFE**

**BECAUSE WITHOUT YOU
MY UNIVERSE WOULDN'T
"MATTER"**

GAIN MASS FAST!



HIGGS BOSON PILLS™

CLICK HERE!!1!

WARNING: TAKING TOO MUCH OF THESE PILLS MAY TURN YOU INTO A BLACK HOLE

© FROGSICLE.COM

SAY GOD PARTICLE

**ONE MORE
GODDAMN TIME**

Nach der Entdeckung

- Entdeckung ist nur der Anfang...

- Weitere Messungen nötig

- **Signalstärken** der Zerfälle in Vektorbosonen und Fermionen

- zerfällt das Teilchen wie im Standardmodell vorhergesagt?
- oder gibt es Abweichungen → kein Standardmodell-Higgs?

- **Spin und Parität**

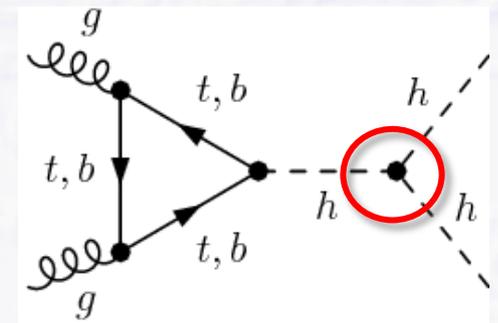
- Higgs-Feld ist ein skalares Feld
- → Higgs-Teilchen muss Spin 0 haben (und positive Parität)

- **Kopplungskonstanten** an Vektorbosonen und Fermionen

- sind die Kopplungen proportional zu den Teilchenmassen?

- der “heilige Gral”: Higgs “**Selbstwechselwirkung**”

- in ferner Zukunft...
- braucht seeeehr veeeele Daten (~2035?)

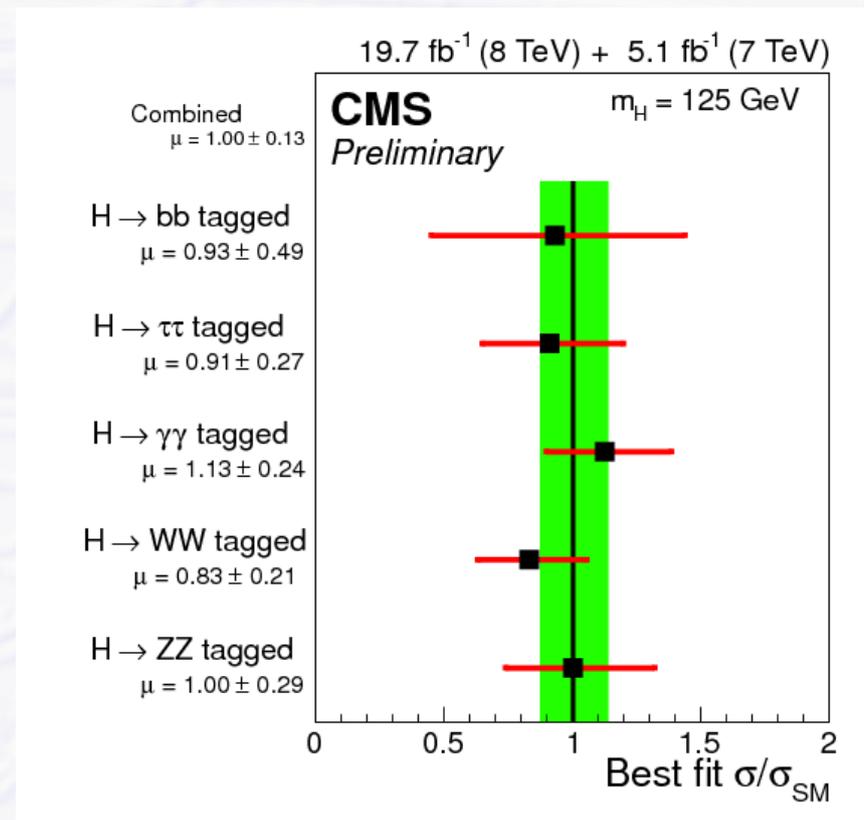
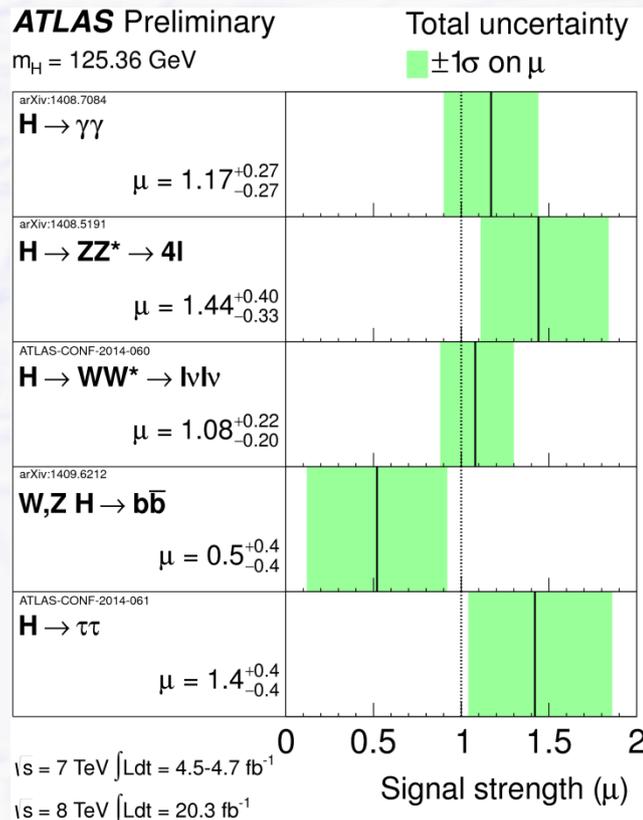


Standardmodell Higgs?

- Signalstärken der gemessenen Zerfallskanäle passen zur Vorhersage für ein **Standardmodell Higgs** (aber noch nicht 100% sicher), Masse ist konsistent zwischen ATLAS und CMS

→ **ATLAS:** $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.23 \pm 0.18$, $m_{\text{H}} = 125.36 \pm 0.37$ (stat.) ± 0.18 (sys.)

→ **CMS:** $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.00 \pm 0.13$, $m_{\text{H}} = 125.03 \pm 0.27$ (stat.) ± 0.15 (sys.)



Spin und Parität?

→ **Spin** = Eigendrehimpuls (in Einheiten von $\hbar = \frac{h}{2\pi}$)

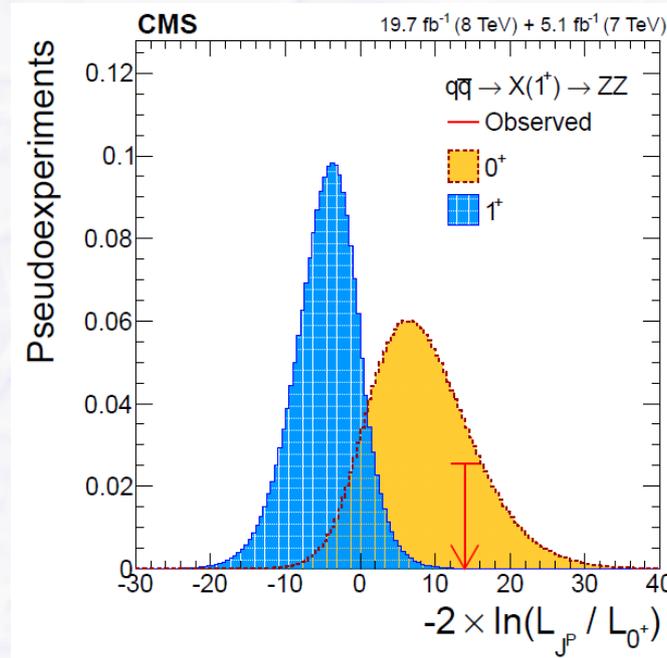
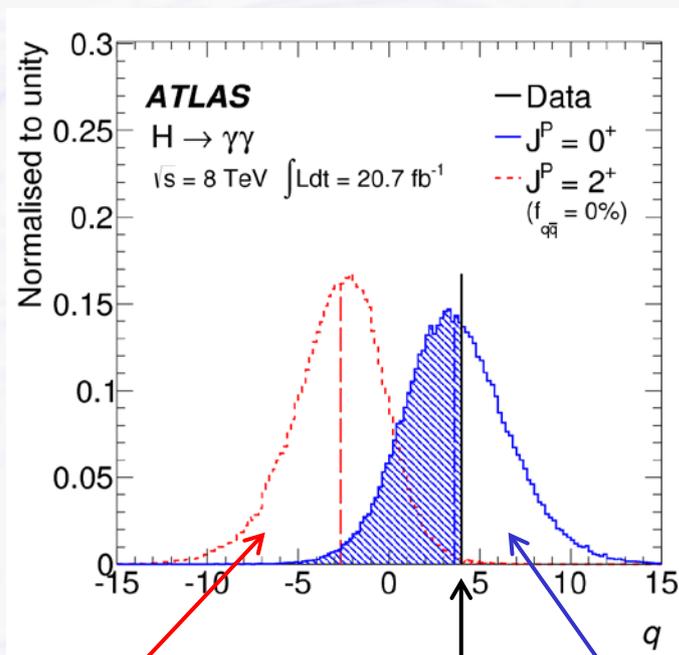
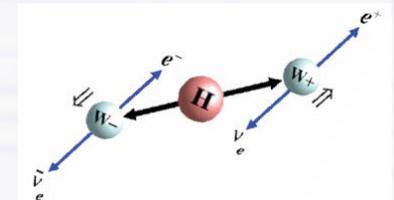
→ **Parität** = Verhalten der Wellenfunktion bei Spiegelung

◦ echter Skalar = "+"; Pseudoskalar = "-", z.B. Skalarprodukt aus 3 Vektoren: $\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c})$

● **Neues Teilchen zerfällt in Photonen → Spin muss 0 oder 2 sein**

→ möglich: $0^-, 0^+, 2^-, 2^+$ (+ oder - entspricht Parität)

→ **Messung aus Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte**



Erwartung für 2^+

Messung

Erwartung für 0^+

Higgs und Massenerzeugung?

Erwartung:

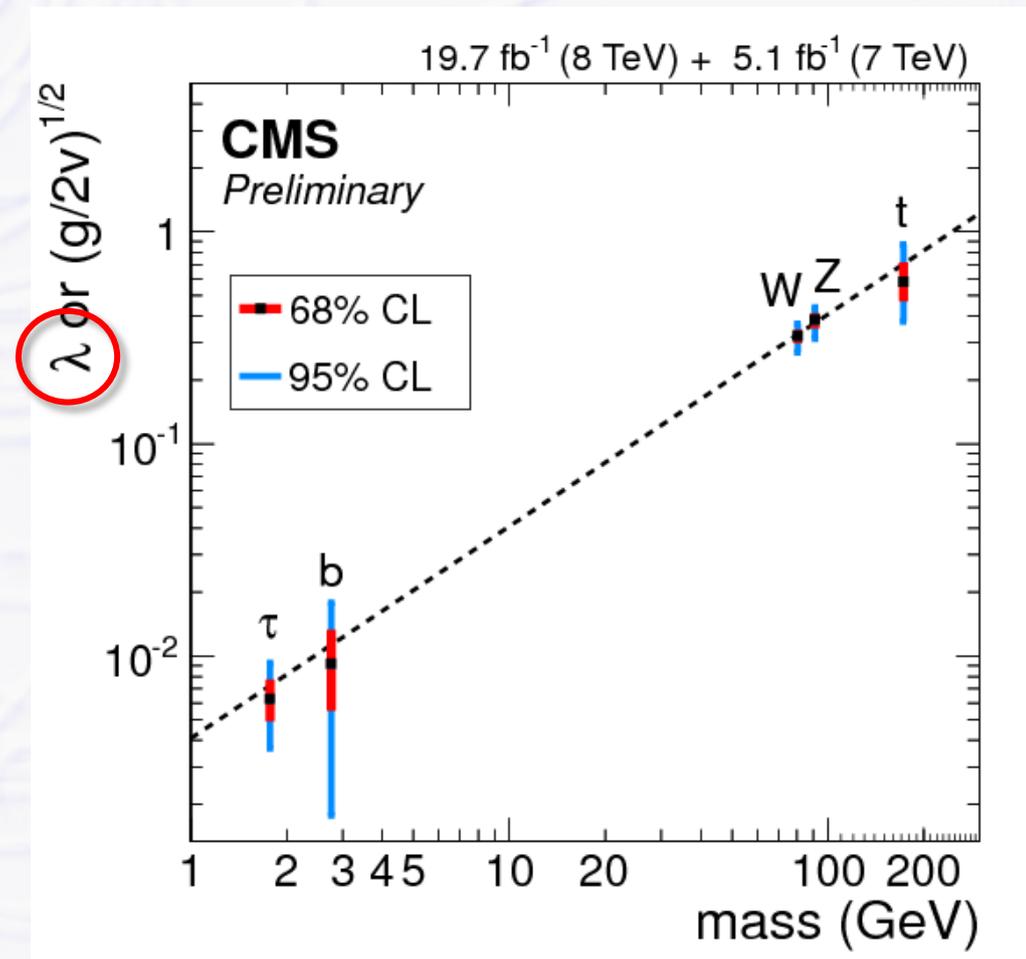
Wenn Higgs-Mechanismus verantwortlich für die Erzeugung der Masse

→ Kopplungsstärke λ des Higgs-Potentials proportional zur entsprechenden Teilchenmasse M

$$V(\Phi) = +\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

→ $\lambda \propto M$

Je größer die Masse, je stärker die Kopplung an das Higgs-Feld ✓



Higgs: Stand der Erkenntnisse (2014)

● Entdeckung eines **neuen Teilchens** im **Juli 2012**

→ Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)

→ Damals nicht klar: ein Higgs?

● Klar seit **März 2013**

→ Ja, es ist **ein Higgs Boson**

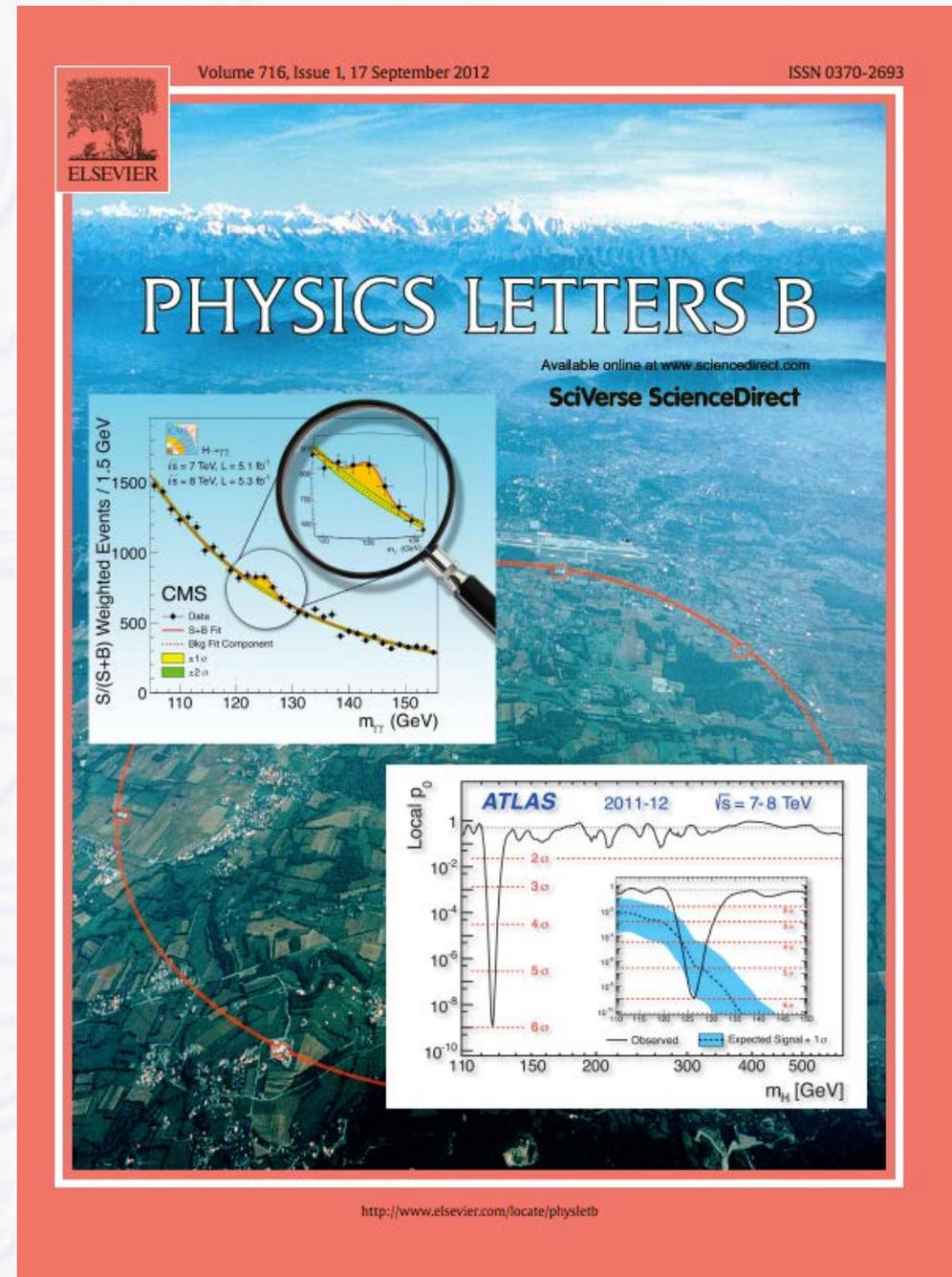
- Spin 0 (konsistent mit Higgs)

● Noch nicht klar (wird noch Jahre dauern...)

→ **Welche Art Higgs Boson?**

- ein **Standardmodell Higgs?**
 - dann gibt es nur ein Higgs Teilchen, **DAS "Peter Higgs" Boson**
- ein **SUSY Higgs?**
 - dann sollte es mindestens 5 verschiedene Higgs Teilchen geben

vielleicht haben wir gerade nur das erste gefunden und es kommen noch mehr...

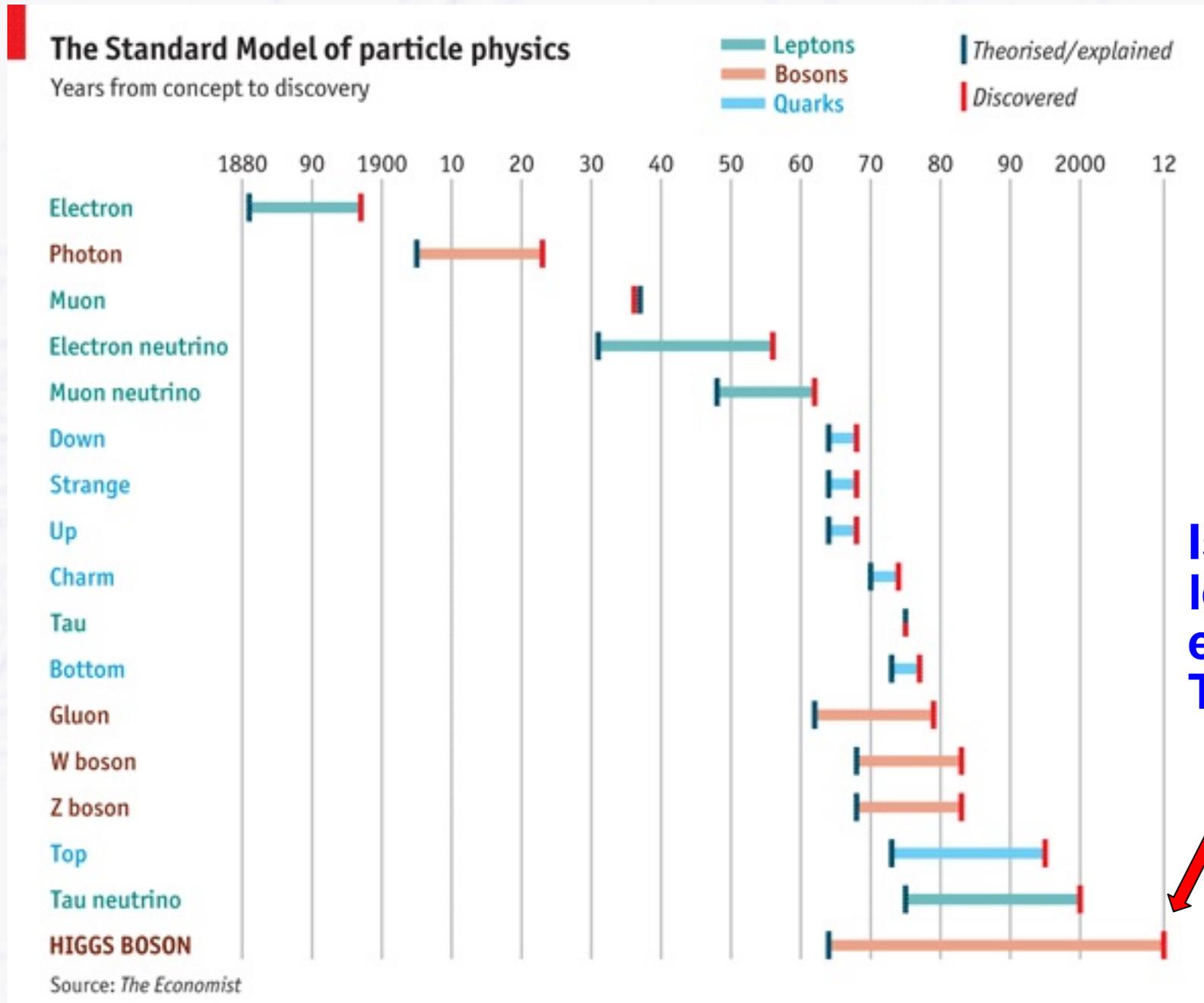


Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

“...for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the **discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.**”



Standardmodell Teilchenentdeckungen



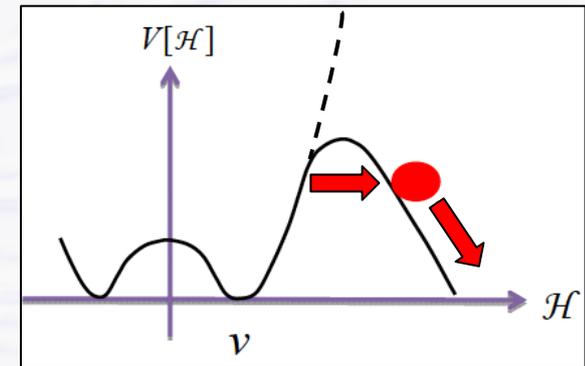
Ist dies das letzte zu entdeckende Teilchen?



Stabilität des Vakuums

Ist das Vakuum (= unser Universum) stabil?

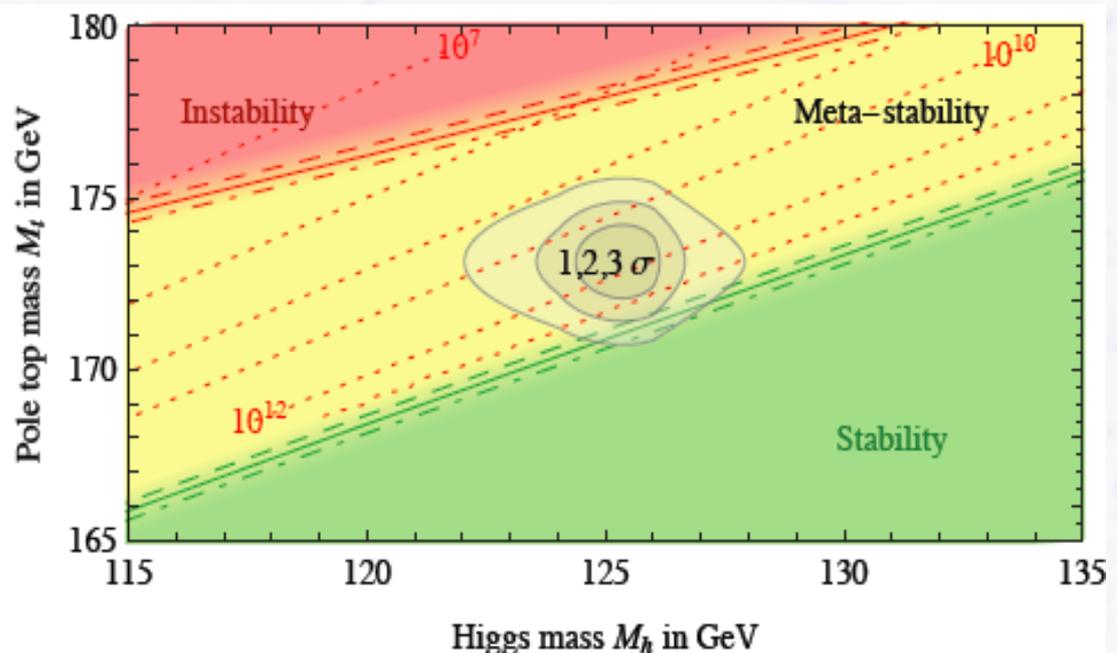
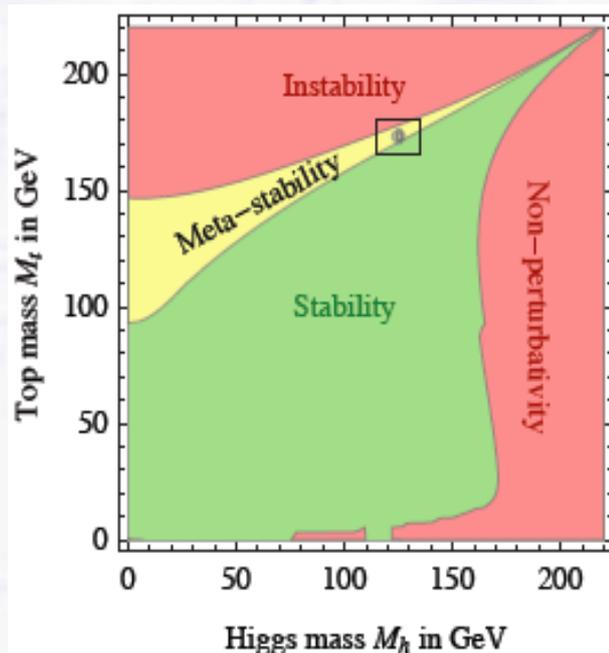
- entspricht die Vakuumenergie (durch das Higgs-Feld) nur einem lokalen Minimum des Higgs-Potentials?
- gibt es evtl. einen Zustand geringerer Energie?
- könnte das Vakuum zu diesem Zustand durchtunneln?



→ hängt ab von Top- und Higgs-Masse

→ Vorläufiges Ergebnis: Das Vakuum ist **meta-stabil**

- Aber: Durchtunnelzeit im Bereich von 10^{100} Jahren...



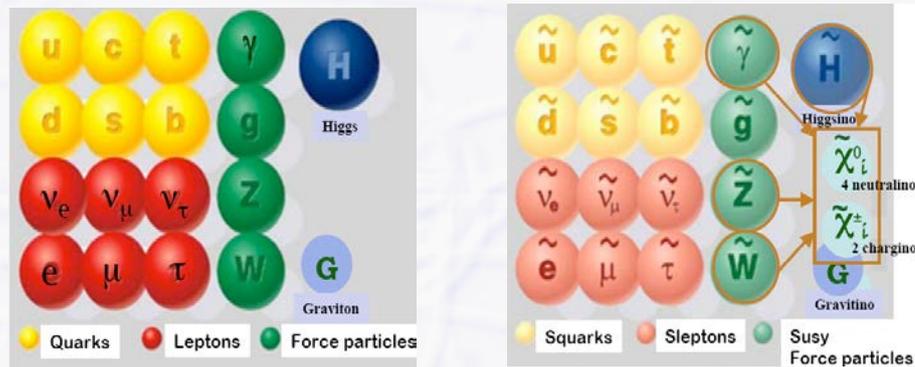
Jenseits des Standardmodells

Im Standardmodell

- Materieteilchen = Fermionen (Spin $\frac{1}{2}$), Kraftteilchen = Bosonen (Spin 1)
- Warum diese Asymmetrie (Fermionen – Bosonen)?

Erweiterung des Standardmodells durch neue Symmetrie: Supersymmetrie (SUSY)

- SUSY Materieteilchen = Bosonen, SUSY Kraftteilchen = Fermionen
- Verdopplung aller bisherigen Elementarteilchen



Neue Quantenzahl R-parity: $R_p = (-1)^{B+L+2s} = +1$ SM Teilchen
 -1 SUSY Teilchen

Wenn R-parity erhalten: Leichtestes SUSY Teilchen (LSP) STABIL(!!!)

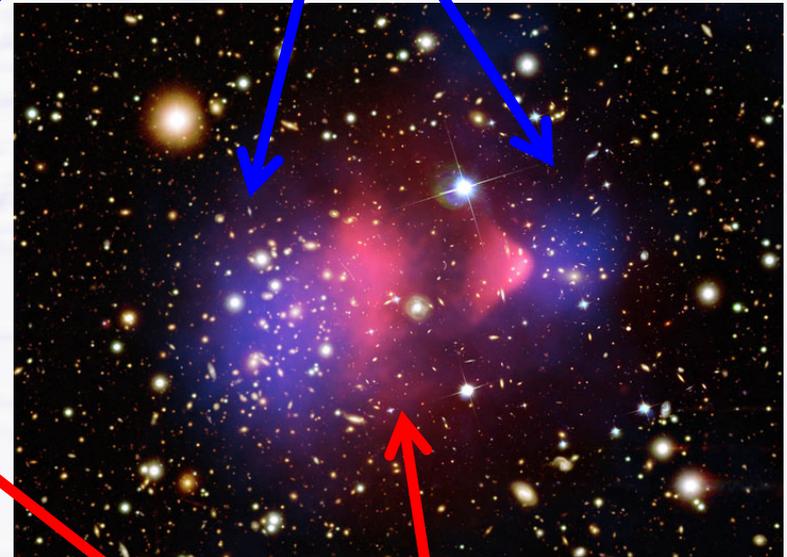
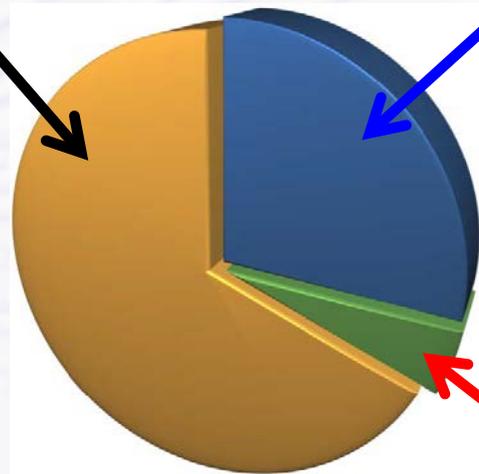
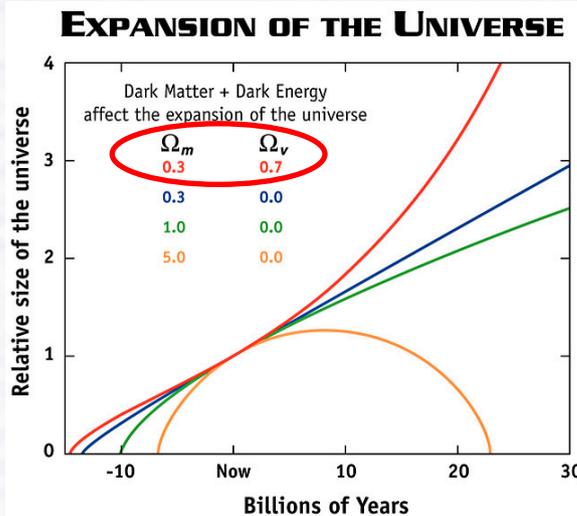
Bestandteile des Universums

- Parameter basierend auf Daten von Planck + WMAP polarisation + highL + BAO

SUSY?
2020s

Dunkle Energie:
 $69.2\% \pm 1.0\%$

Dunkle Materie:
 $25.7\% \pm 0.4\%$



Gewöhnliche Materie:
 $4.82\% \pm 0.05\%$

Abgeleitete Größen

- **Hubble Konstante:** $67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- **Alter des Universums:** 13.798 ± 0.037 Milliarden Jahre

Konsequenzen für Higgs

- Minimal Supersymmetric Model (MSSM) hat 5 Higgs Teilchen

Teilchen	el. Ladung	Spin/Parität	Masse
h^0	0	0^+	leicht (< 133 GeV)
H^0	0	0^+	schwer
H^+	+1	0^+	schwer
H^-	-1	0^+	schwer
A^0	0	0^-	schwer

- Leichtestes MSSM Higgs (h^0) ist sehr ähnlich zum Standardmodell Higgs
- Ist das entdeckte Higgs das leichte h^0 im MSSM Modell?
 - wenn ja → es gibt noch mehr Higgse zu entdecken
 - Zerfälle von h^0 und H_{SM} sind sehr ähnlich, 5-10% Unterschied bei Zerfallswahrscheinlichkeiten
 - Zerfallswahrscheinlichkeiten müssen präzise gemessen werden → mehr Daten

LHC: Wie geht es weiter?

LS2 start 2018 (Juli) => 18 Monate + 3 Monate BC
 LS3 LHC: start 2023 => 30 Monate + 3 Monate BC
 Vorbeschleuniger: 2024 => 13 Monate + 3 Monate BC



(Extended) Year End Technical Stop: (E)YETS

LHC schedule approved by CERN management and LHC experiments spokespersons and technical coordinators (December 2013)

Zukunft 1: e^+e^- @ 3 TeV \rightarrow CLIC

CLIC = Compact Linear Collider

Two Beam Scheme:

Drive Beam supplies RF power

- 12 GHz bunch structure
- low energy (2.4 GeV - 240 MeV)
- high current (100A)

Main beam for physics

- high energy (9 GeV – 1.5 TeV)
- current 1.2 A

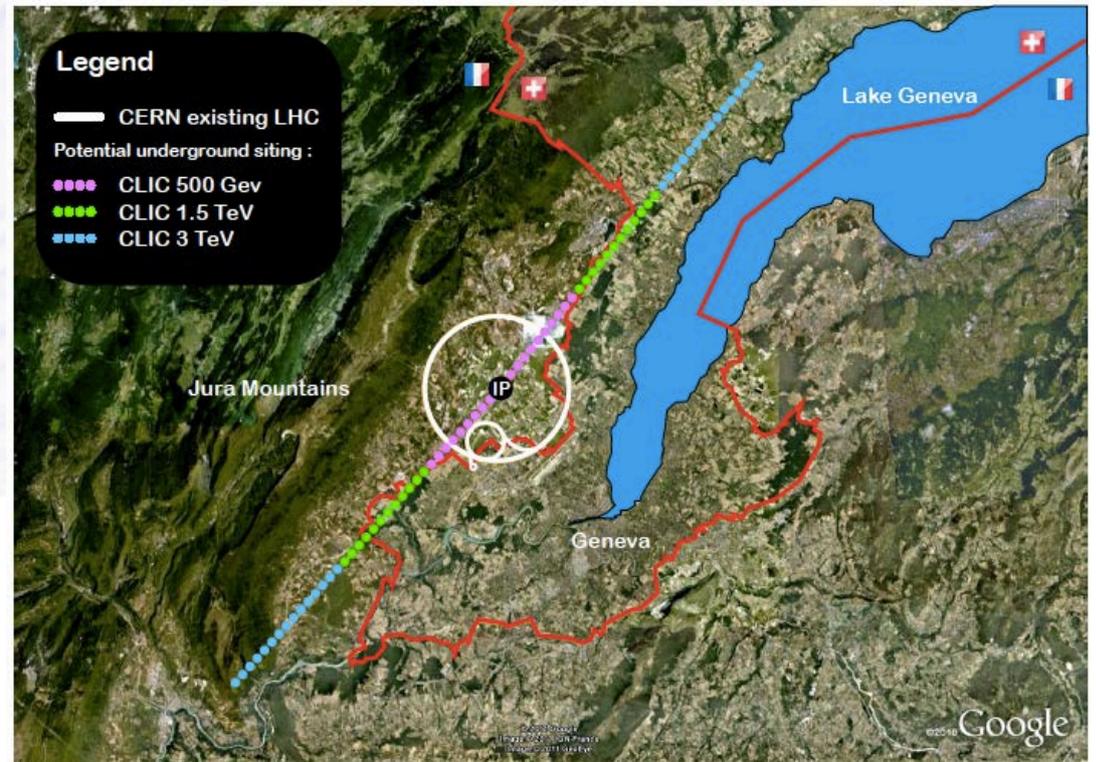
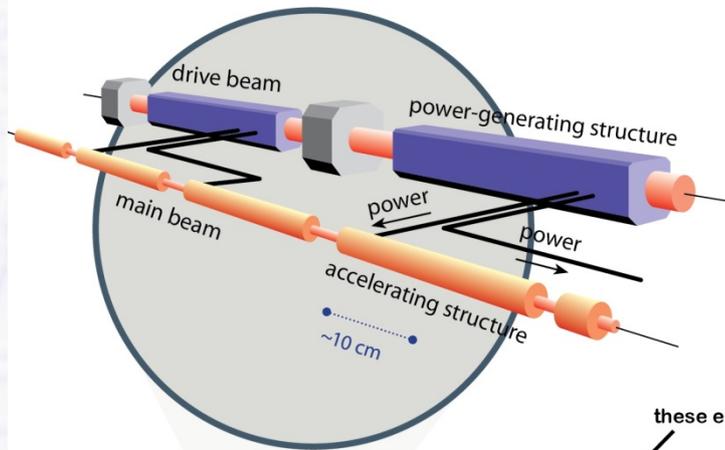
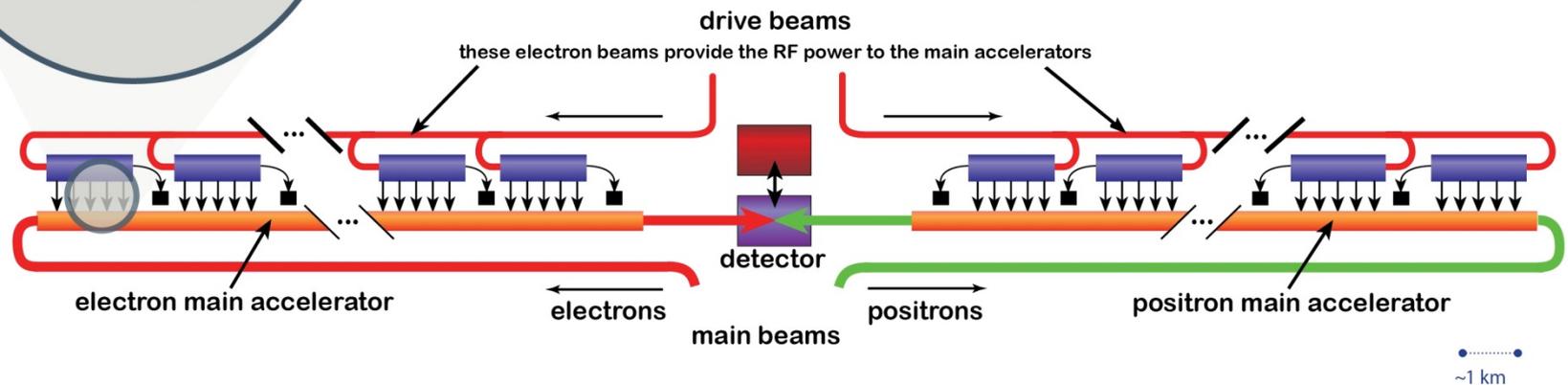


Fig. 7.2: CLIC footprints near CERN, showing various implementation stages [5].



Zukunft 2: neuer pp Collider

FCC = Future Circular Collider

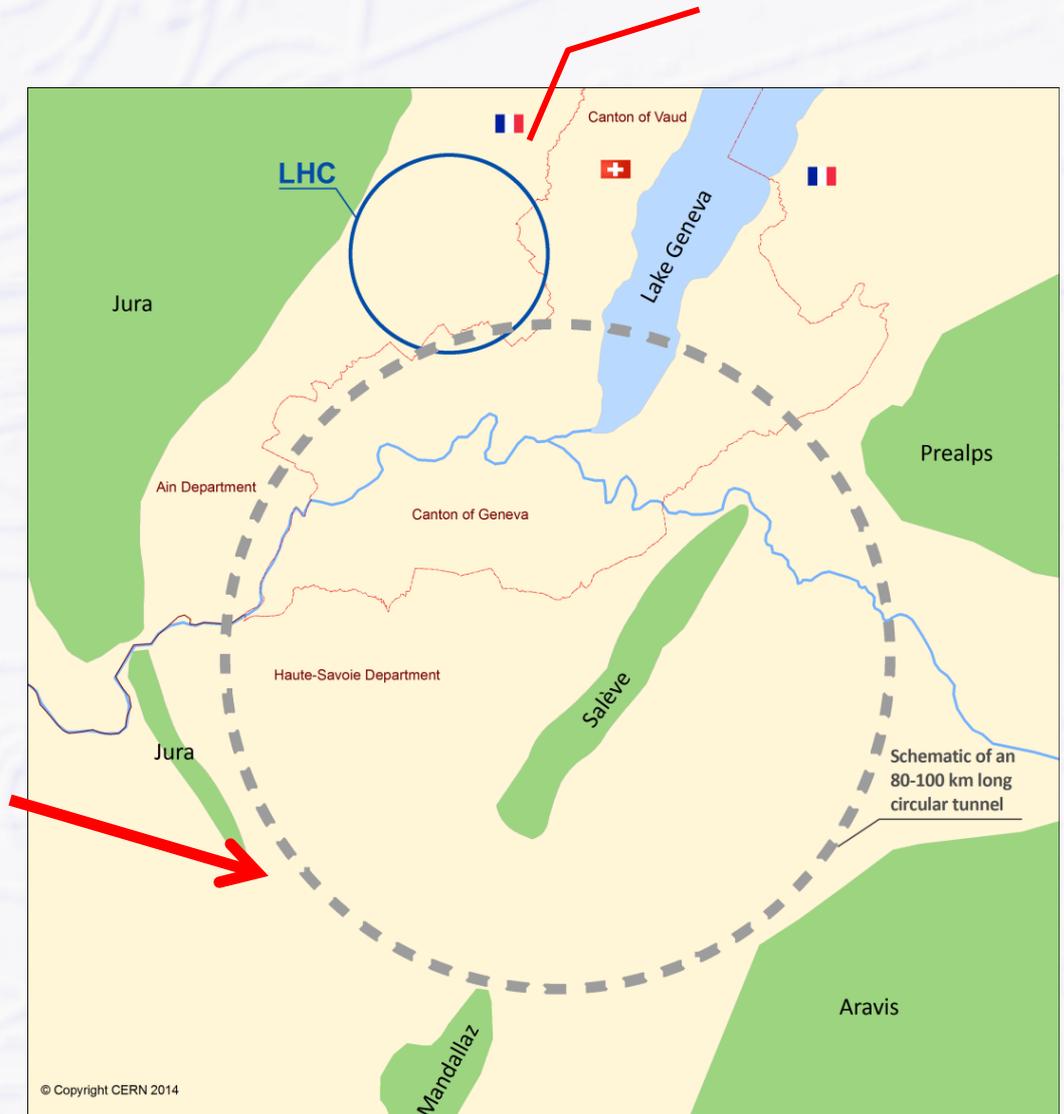
- Konzeptstudie eines 80-100 km Tunnel in der Region Genf

- Design bestimmt durch pp-collider Anforderungen (FCC-hh)
- mit Möglichkeiten für e^+e^- (FCC-ee) und p-e (FCC-he)

- Studie soll bis ~2018 erstellt werden

HE-LHC :33 TeV
mit 20T Magneten

16 T \Rightarrow 100 TeV bei 100 km
20 T \Rightarrow 100 TeV bei 80 km



Was sollte man wissen?

● Das Standardmodell

- Materieteilchen: Quarks und Leptonen in 3 Generationen
- Kraftteilchen: Vermitteln die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Materieteilchen

● Higgs-Mechanismus

- allumfassendes Higgs-Feld im Universum, verleiht Teilchen Masse
- Analogien zur Veranschaulichung: Partymodell, zähe Flüssigkeit
- Entdeckung eines neuen Teilchens im Juli 2012
- Messung des Spin 0^+ → passend zum Standard Modell Higgs-Teilchen, damit auch (indirekter) Nachweis des Higgs-Feldes

● Kosmologie

- Urknall, Expansion des Universums
- Bestandteile des Universums: Gewöhnliche Materie – dunkle Materie – dunkle Energie

● Supersymmetrie und Dunkle Materie

- Mögliche Erweiterung des Standardmodells → mehr Higgs-Teilchen
- Dunkle Materie könnte aus den leichtesten SUSY Teilchen bestehen