

Teilchenphysik

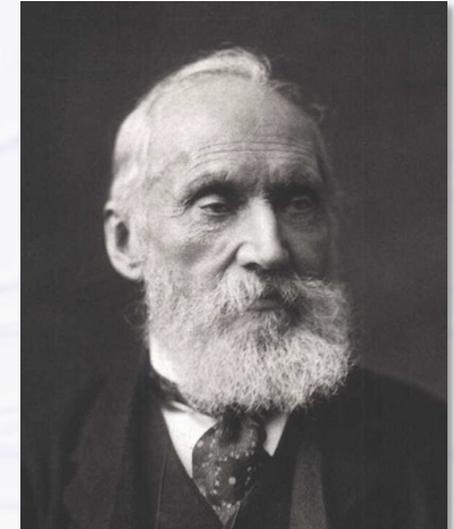
- **Der Beginn der Teilchenphysik: Quanten und Relativität**
- **Wellen und (Anti-)Teilchen, Vakuum-Fluktuationen**
- **Quarks, Leptonen, Generationen und mehr**
- **Wechselwirkungen, das Standardmodell**
- **Higgs-Mechanismus: Analogien, Entdeckung**
- **Und wie geht es weiter...**

Ein Blick zurück in die Geschichte der Teilchenphysik

Relativität, Quanten, Wellen

Stand der Dinge Ende 19. Jahrhundert

- Die gesamte Physik schien erforscht
- “Vollständig“ beschrieben durch
 - (Newtonsche) Mechanik
 - Thermodynamik
 - Maxwell'sche Theorie des Elektro-Magnetismus
- “Kleinere“ noch unverstandene Probleme
 - Atomistik der Materie?
 - Atomstruktur, Atomkerne + deren Bestandteile
 - Spektrum der Hohlraumstrahlung?
 - Quantenphysik, Wahrscheinlichkeiten, das Ende der klassischen (exakten) Physik
 - Michelson-Morley Experiment?
 - Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen, Relativitätstheorie



William Thomson
(Lord Kelvin, 1824 – 1907)

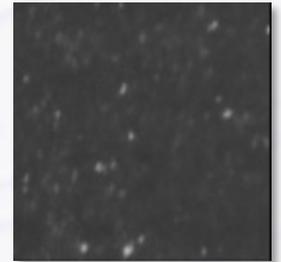
*Da es nun nichts mehr Neues
in der Physik zu entdecken gibt,
verbleibt uns nur die Aufgabe,
alles noch präziser zu messen*

Lord Kelvin, 1900

Atome

- **Brownsche Bewegung**

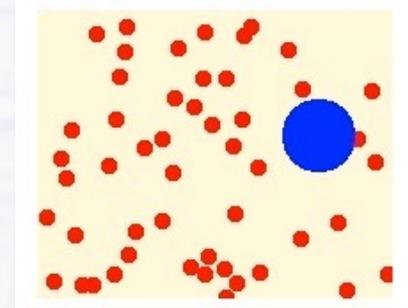
- Robert Brown beobachtet 1827 die (damals unerklärbare) Zitterbewegung von Pollen und Staubteilchen in Wasser



Latexkugeln mit 20 nm Durchmesser in Wasser

- **Albert Einstein erklärt 1905 die Zitterbewegung mit Hilfe der kinetischen Atomtheorie**

- **Francois Perrin bestätigt 1907 Einsteins Formel mittels präziser Messungen**



Die Existenz von Atomen als physikalische Realität war bewiesen!

Der Beginn der Teilchenphysik

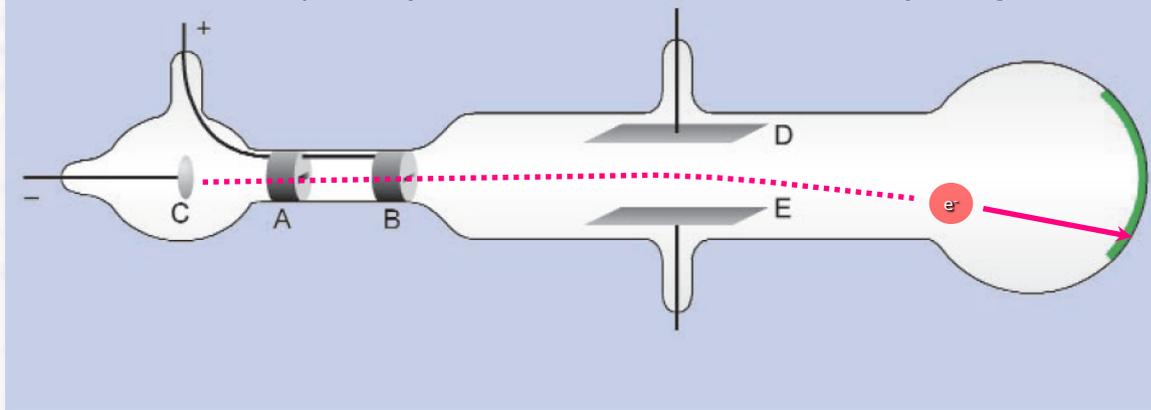
- Entdeckung des **Elektrons** 1897
- **Kathodenstrahlen*** sind Teilchen mit spezifischem Ladungs-Massen-Verhältnis e/m

→ *später "**Elektronen**" genannt



J. J. Thomson (1856 – 1940)
Nobelpreis 1906

Elektroden D+E: Elektrisches Feld
Spulen (senkrecht dazu, nicht sichtbar): Magnetfeld

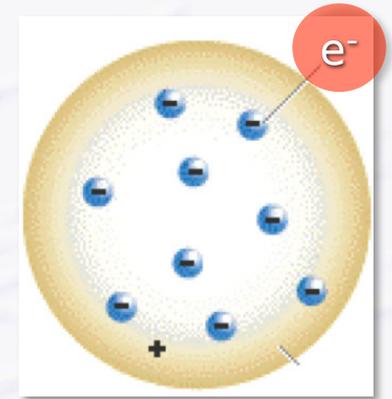


Original Kathodenstrahlröhre

Die Entdeckung des Atomkerns

- J. J. Thomson postulierte 1904 auch das **“Rosinenkuchen-Modell”** des Atoms

→ Elektronen (-) im Atom wie Rosinen im Kuchenteig (+)



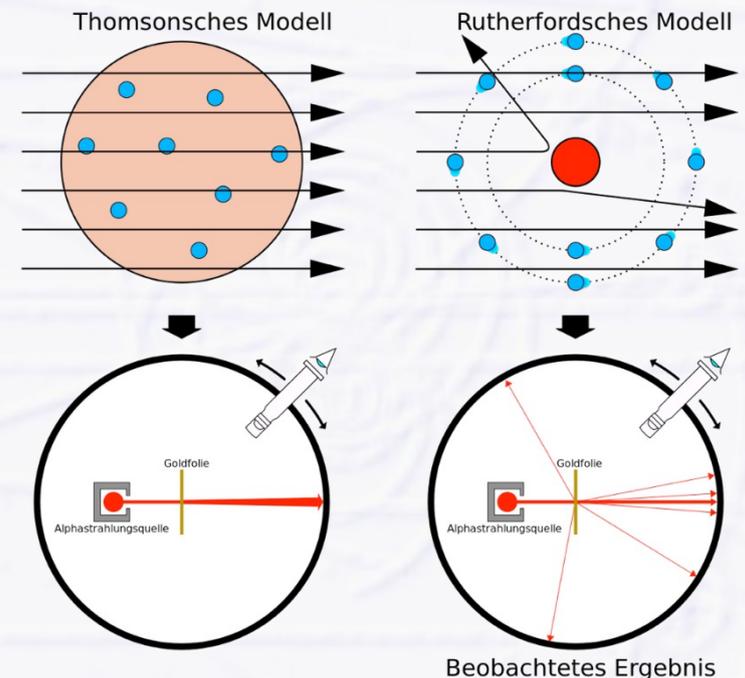
'Rosinenkuchen' Modell des Atoms (1904)

- **Widerlegt 1911**

→ Geiger und Marsden schießen **“Alpha”-Teilchen** auf Goldfolien

→ Einige wenige (**1 von 8000**) Alpha-Teilchen werden **rückwärts** gestreut ($> 90^\circ$)

nicht vereinbar mit dem **“Rosinenkuchen-Modell”**



Die gesamte Masse des Atoms ist in einem winzigen Atomkern konzentriert!

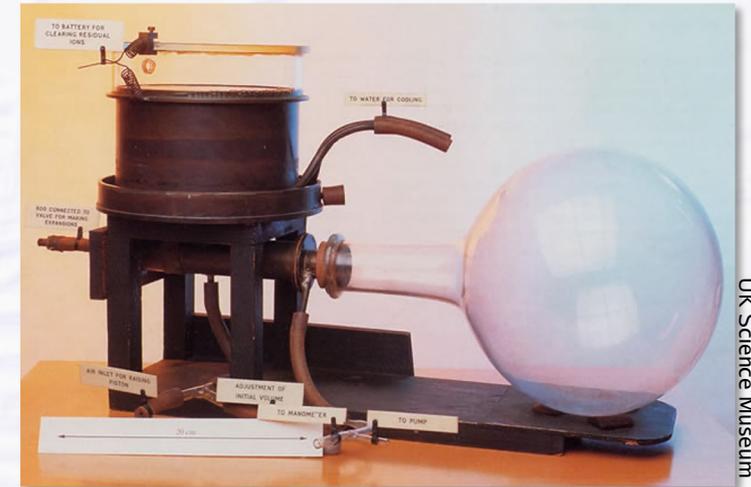
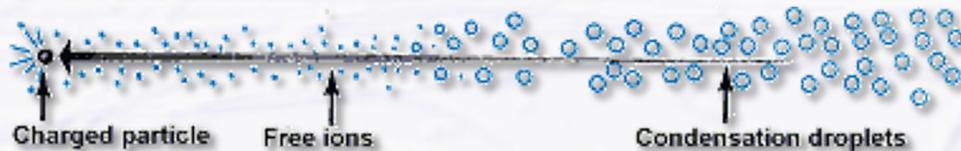
Damalgiges Ergebnis: Größe $< 2.7 \times 10^{-14}$ m (heutiger Wert: 10^{-14} m)

Sichtbare Teilchen: Die Nebelkammer

- Erfunden 1911 von Charles T. R. Wilson (Nobelpreis 1927)

- Kammer mit gesättigtem Wasserdampf
- geladene Teilchen hinterlassen Ionenspuren
 - Ionen dienen als Kondensationskerne

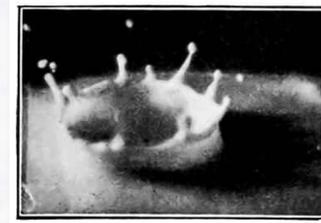
- Sichtbare Spur aus Wassertröpfchen



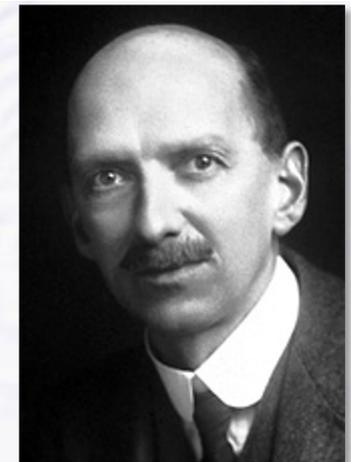
UK Science Museum

- Ebenfalls nötig

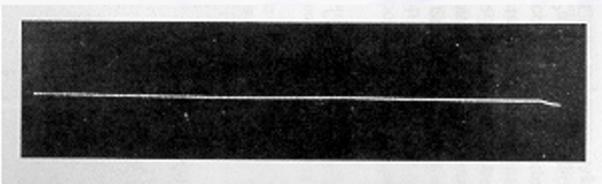
- Hochgeschwindigkeitsphotographie
 - erfunden von Arthur M. Worthington 1908 zur Untersuchung von Wassertropfen
 - Erzeugung von Ultrakurzzeitblitzen durch Funken



Charles T. R. Wilson

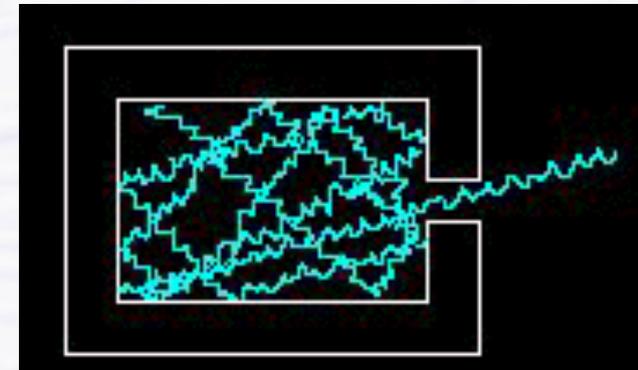


- Erste Photographien von α -Strahlen 1912



Problem um 1900: Hohlraumstrahlung

- Ein “Hohlraum” absorbiert die einfallende Strahlung völlig und sendet diese Energie als thermische Strahlung wieder aus
 - Strahlung eines schwarzen Ofens (Schwarzkörper- oder Hohlraumstrahlung)
- Bestes klassisches Strahlungsgesetz (Wiensches Strahlungsgesetz) beschreibt Energiespektrum nur näherungsweise
 - Gute Übereinstimmung bei kurzen Wellenlängen
 - Lange Wellenlängen zeigen Abweichungen
- Andere Ansätze beschreiben nur lange Wellenlängen gut
 - Rayleigh-Jeans-Gesetz
 - divergiert bei kurzen Wellenlängen (“Ultraviolett Katastrophe“)

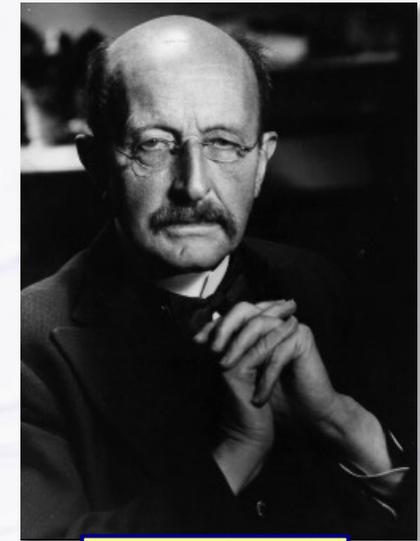


Quanten

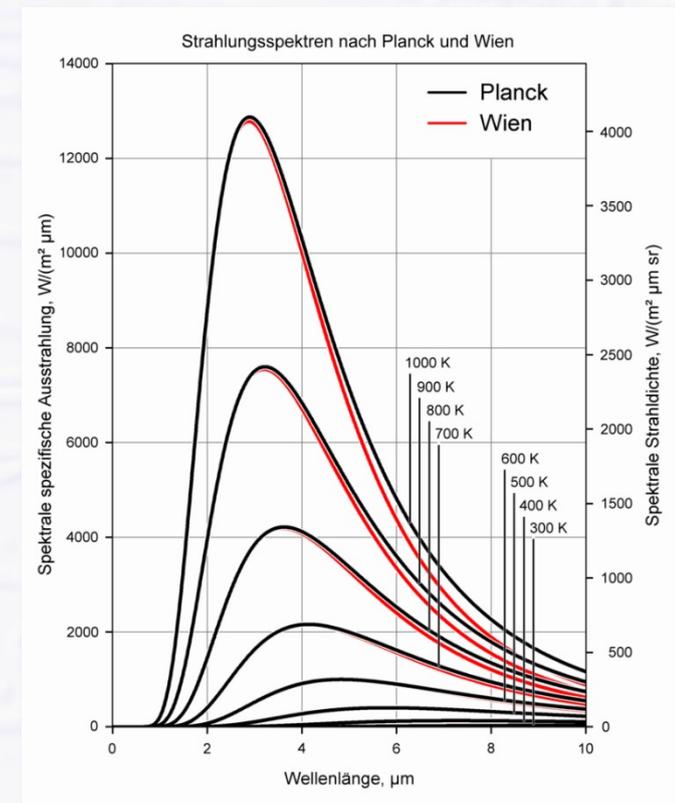
- Max Planck löst das Problem im Dezember 1900, aber...
 - ...nur durch einen “Akt der Verzweiflung”
- Die Oszillatoren (in der Wand des Hohlraums) können nur “Energiepakete“ (Quanten) aussenden: $\varepsilon = h\nu$
 - höhere Frequenzen entsprechen größeren Energiepaketen die bei ‘niedrigen’ Temperaturen nicht wahrscheinlich sind
- Das Plancksche Strahlungsgesetz führt eine neue fundamentale Konstante ein

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

h = Plancksches Wirkungsquantum



Max Planck
(1858-1947)



Der Äther

● Klassische Annahme im 19. Jahrhundert

→ Licht(wellen) breiten sich in einem Medium aus → der “Äther“

→ analog zu Schallwellen in Luft

● Michelson – Morley versuchen den “Ätherwind” zu messen

- die Erde sollte sich gegenüber dem Äther bewegen
- die Lichtgeschwindigkeit sollte richtungsabhängig sein

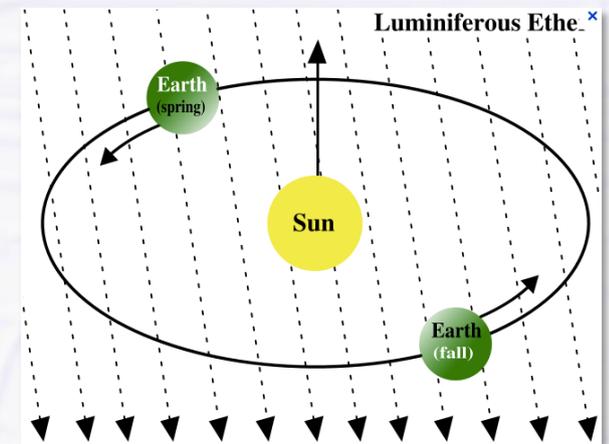
● ABER

→ **keine Änderung der Lichtgeschwindigkeit**

● Einsteins Postulate

→ die **Lichtgeschwindigkeit ist konstant** in allen Bezugssystemen!

→ alle (unbeschleunigten) **Bezugssysteme sind äquivalent!**



Spezielle Relativität

- Wie können 2 gegeneinander bewegte Beobachter immer dieselbe Lichtgeschwindigkeit messen?

→ $c = (\text{Raumintervall} / \text{Zeitintervall}) = \text{constant}$

→ **Raum und Zeit können keine absoluten Größen sein**

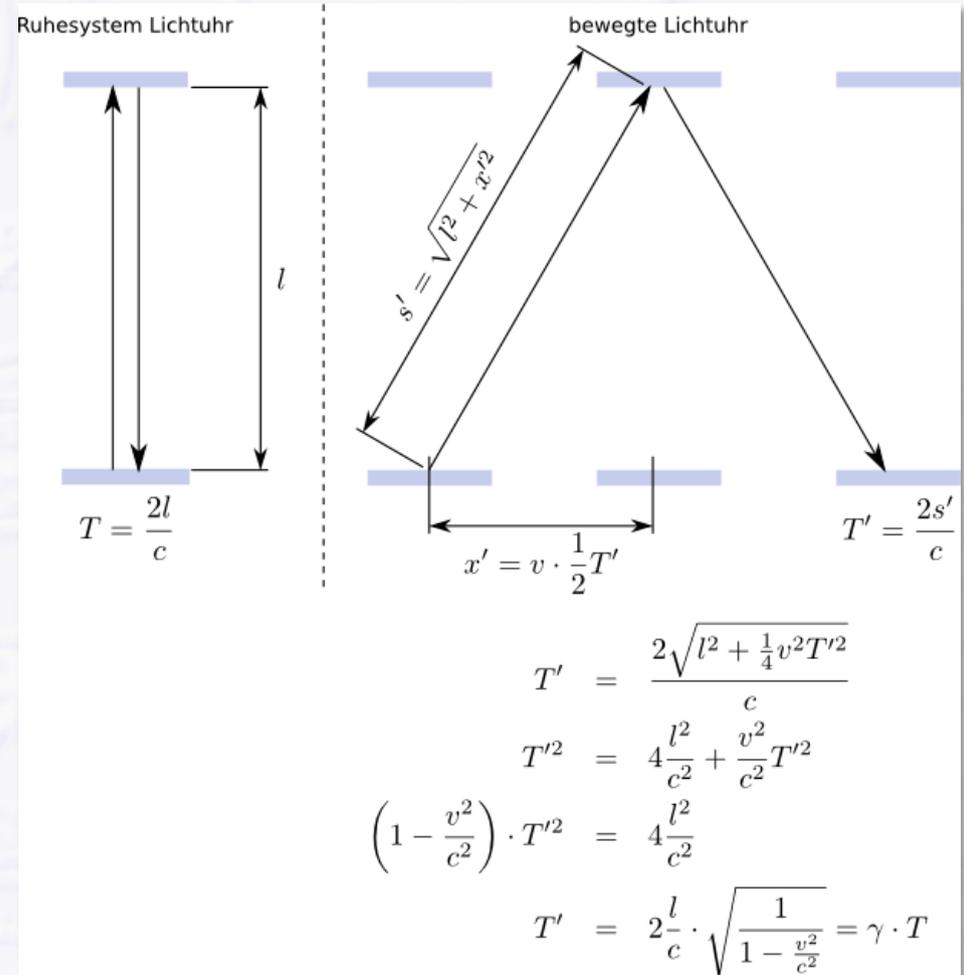
- Verkürzung des Raumes
- Verlangsamung der Zeit

- Newton

→ $E = p^2 / 2m$

- Einstein

→ $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$

Der Photoeffekt

Der photoelektrische Effekt (1900)

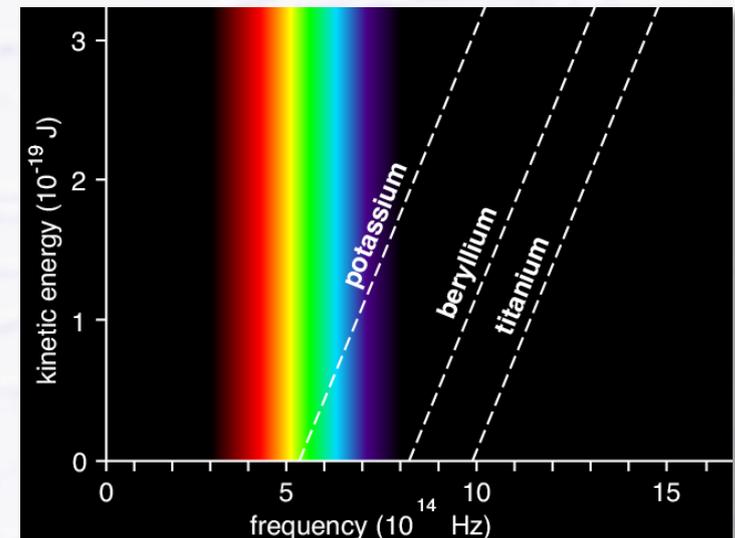
- Kathodenstrahlen (= Elektronen) werden durch Einstrahlung von Licht auf Metalloberflächen erzeugt
- **Klassische Erwartung:** Da die Energie des Lichts proportional zum Quadrat der Amplitude ist, sollte die Energie der Elektronen der Intensität des Lichts proportional sein.



Philipp Lenard
(1862-1947)

ABER

- **“Die Energie der Elektronen zeigt nicht die geringste Abhängigkeit von der Lichtintensität”**
- Stattdessen: Die Energie der Elektronen ist proportional der Frequenz des Lichts (Steigung = h)



Welle und Teilchen

- Einstein erklärt den Photoeffekt 1905

- Licht wird quantenweise emittiert und absorbiert
- “Ein Lichtquant gibt alle seine Energie an ein einzelnes Elektron ab”
 - experimentell gezeigt durch Compton 1917

- Licht kann sowohl Welle als auch Teilchen sein mit Impuls p

ABER AUCH UMGEKEHRT...

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

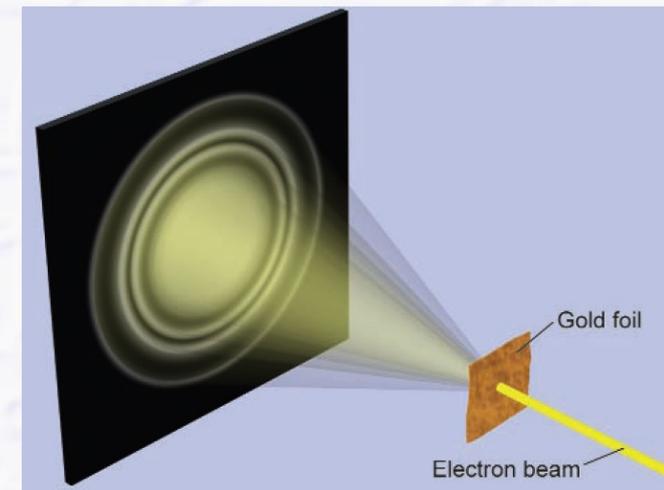
- Louis de Broglie postuliert 1924 dass Teilchen sich wie Wellen verhalten können mit Wellenlänge λ

- experimentell gezeigt durch Elektronenbeugung von durch Davisson & Germer 1927

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



Louis de Broglie
(1892-1987)

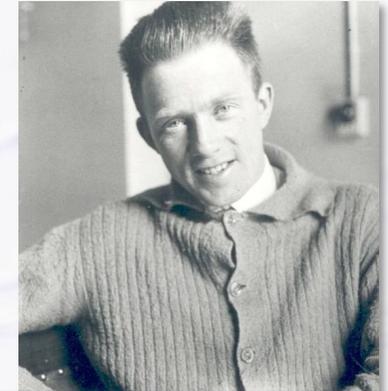


Die Unschärferelation

● Heisenberg 1927:

→ Wenn Teilchen auch Welleneigenschaften haben, dann können **Ort und Impuls nicht gleichzeitig präzise messbar** sein

• Orts-Impuls Unschärfe $\Delta x \cdot \Delta p \gtrsim h$



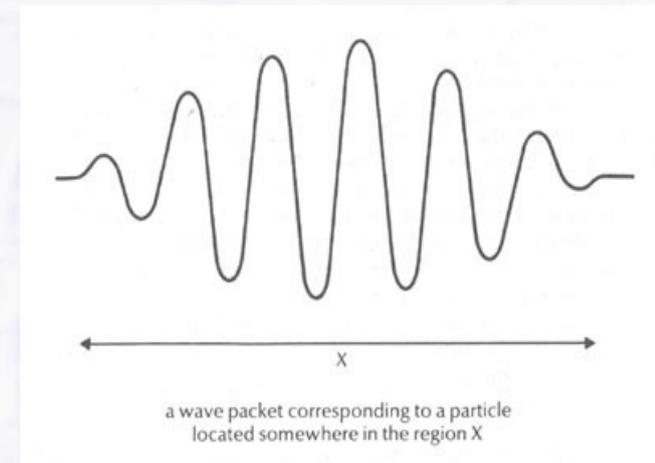
Werner Heisenberg
(1901-1976)

● Nicht nur Ort + Impuls sind unscharf

→ Ein 'reiner' Ton der Frequenz f bekommt eine 'Unschärfe' Δf , wenn er nur über das Zeitintervall Δt erklingt (Fourier-Transformation)

• (Kreis-)frequenz-Zeit Unschärfe $\Delta \omega \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}$
oder mit $E = \hbar \cdot \omega$

• Energie-Zeit Unschärfe $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$



Alles wird Welle

- Beschreibe das Verhalten von Teilchen durch ihre **Wellenfunktion**

→ Wellenfunktionen können auch interferieren

- mathematische Beschreibung durch **komplexe Funktion mit Phase** $\psi = \psi(\mathbf{r}, t)$

- **Klassische Energie eines Teilchens mit Impuls p in einem Potential V**

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}, t)$$

- **Beschreibung durch die Quantenmechanik**

→ ersetze die klassischen Größen durch Operatoren

$$\begin{aligned} E &\rightarrow \hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \\ p &\rightarrow \hat{p} = -i\hbar \nabla \\ r &\rightarrow \hat{r} = r \end{aligned}$$

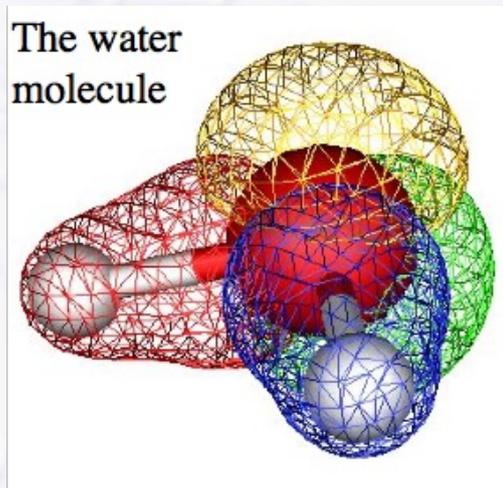
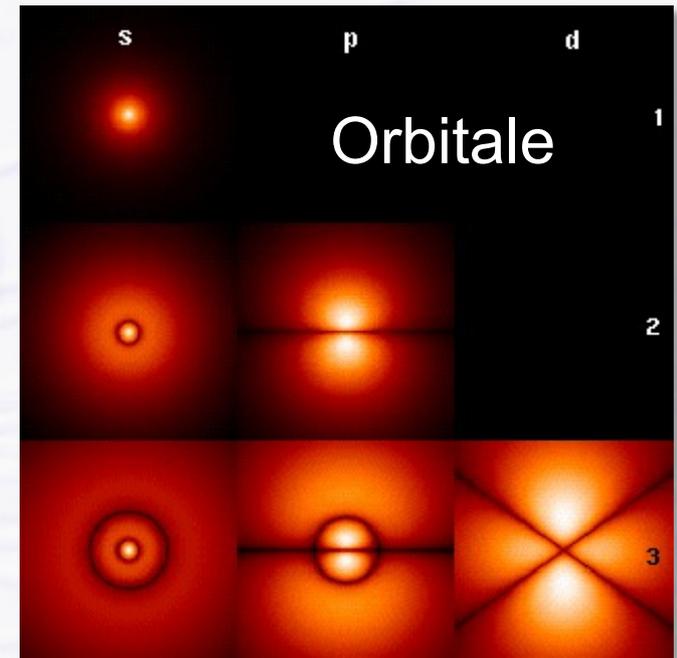
→ Ergebnis: **Schrödingergleichung** $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V\psi$



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

Alles nur Wahrscheinlich

- Interpretation durch Max Born 1928
 - ψ = Wahrscheinlichkeitsamplitude
 - $|\psi|^2$ = Wahrscheinlichkeit
- Elektronen bilden stehende Wellen im Atom → Orbitale (Aufenthaltswahrscheinlichkeiten)
 - Chemische Bindungen entsprechen der Struktur der Orbitale (Linus Pauling 1928)
 - und erklären die makroskopische Struktur der Materie



Antiteilchen

Das Positron, Antimaterie

Quanten- & Relativitätstheorie

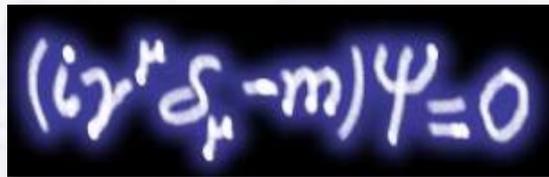
- Für die relativistische Energie-Impuls Beziehung eines freien Teilchens gibt es **mehr als eine**

Lösung: $-m, +m, -p, +p$

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

- Dirac kombinierte 1928 die **nicht-relativistische Wellengleichung mit der Relativitätstheorie**

→ **Diracgleichung** zur Beschreibung eines Elektrons mit 4(!) Komponenten für Ψ


$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \text{Elektron - Spin up} \\ \text{Elektron - Spin down} \\ \text{Positron - Spin up} \\ \text{Positron - Spin down} \end{bmatrix}$$



Paul Dirac
(1902-1984)

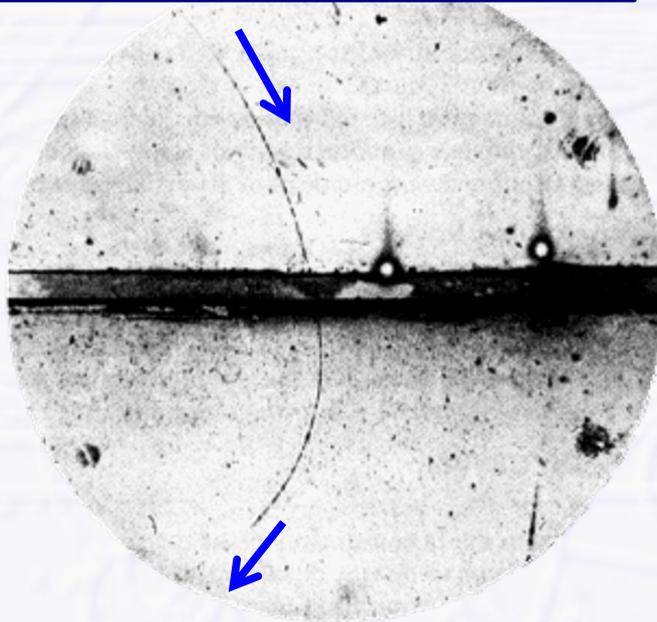
- Theoretische Vorhersage von **ANTITEILCHEN**
- Erklärung des Spin $\frac{1}{2}$

- Spin = quantenmechanische Eigenschaft interpretiert als **Eigendrehimpuls**

Entdeckung des Positrons

- Dirac hatte recht!
- Positronnachweis durch Nebelkammer
 - gefunden von Carl D. Anderson 1932

von oben einlaufendes Positron, 63 MeV



Positron verliert 23 MeV Energie im Blei →
kleinerer Radius, dies definiert die Flugrichtung!

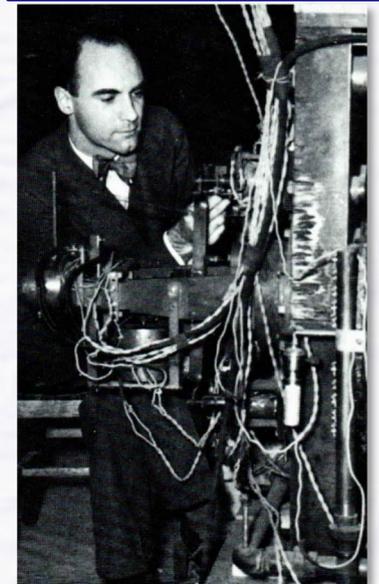
Anderson fand 1936 auch das **Myon**,
erstes Teilchen der 2. Generation
im Standardmodell

Isidor Rabi meinte:
“Who ordered that?”

6 mm Bleiplatte

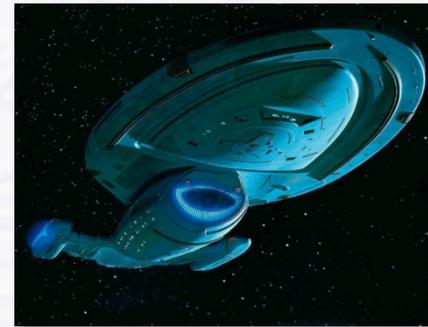
1.5 T Magnetfeld

Carl D. Anderson



Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- **Antiteilchen** verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



| Name | Elektrische Ladung [e] | Masse [GeV/c ²] | Elektrische Ladung [e] | (Anti-) Name |
|-----------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| Elektron | - 1 | 0.0005 | + 1 | Positron |
| Proton | + 1 | 0.938 | - 1 | Antiproton |
| Neutron | 0 | 0.941 | 0 | Antineutron |

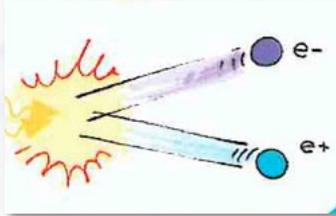
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Wasserstoff

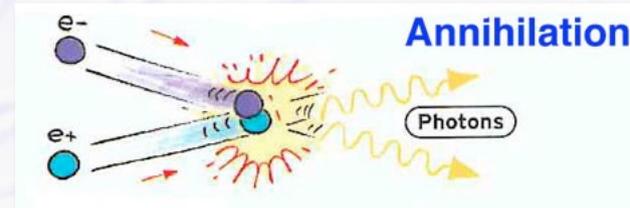
Anti-Wasserstoff

Antimaterie

- Erzeugung von Antiteilchen zusammen mit normalen Materieteilchen aus **Umwandlung von Energie in Masse**



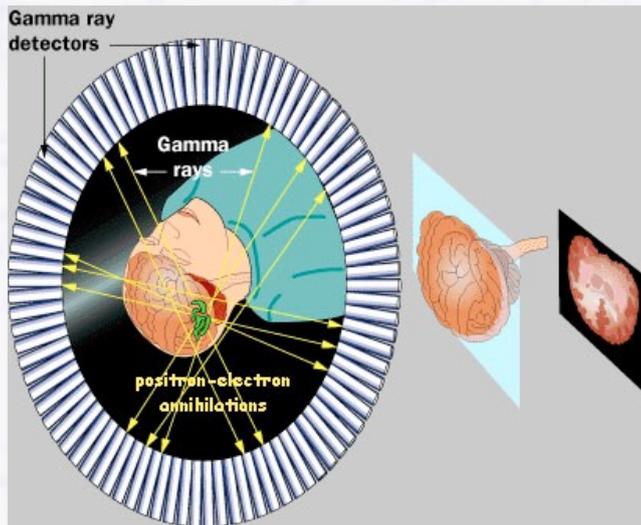
$$E \rightarrow mc^2$$



$$mc^2 \rightarrow E$$

- **Antiteilchen sind Alltag**

→ **Beispiel: Positronen Emissions Tomographie (PET)**



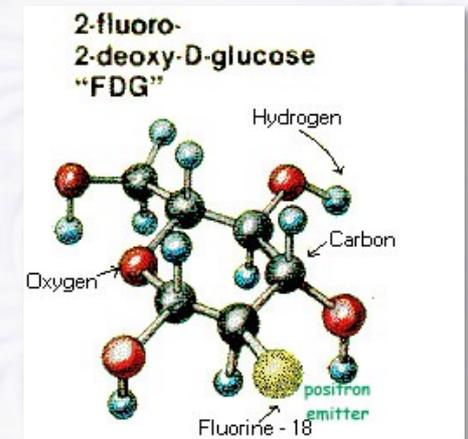
Verwendung von **radioaktiv markiertem Zucker**

Zucker ist bevorzugt an Stellen hohen Energiebedarfs vorhanden

F₁₈ zerfällt unter Aussendung eines Positrons (Antimaterie)

Annihilation mit Elektron unter Aussendung zweier Photonen

Nachweis der Photonen durch Detektor, damit **Rekonstruktion der Orte hohen Energiebedarfs im Körper**

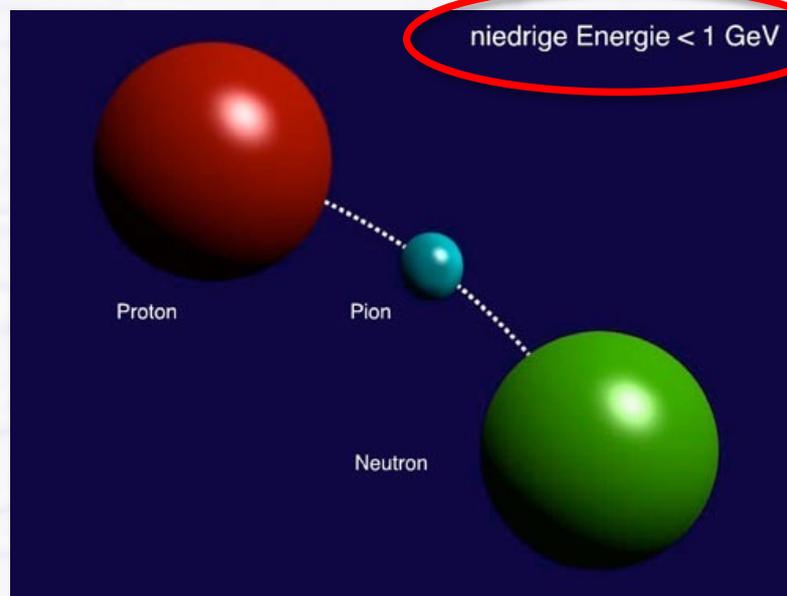


Wechselwirkungen

**Elektro-magnetische Wechselwirkung,
Starke Wechselwirkung, Vakuumfluktuationen,
Quarks und Gluonen**

Starke Kräfte

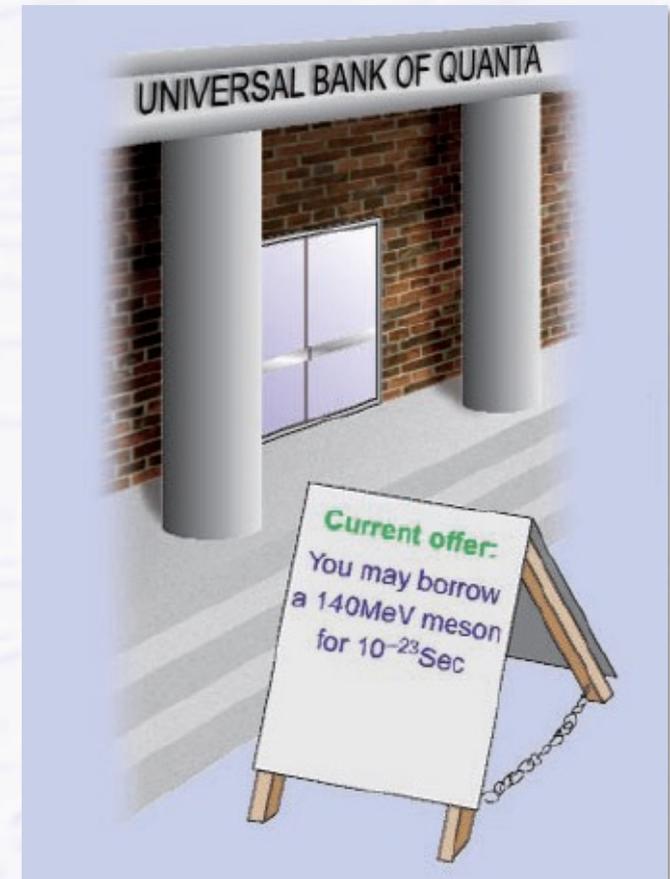
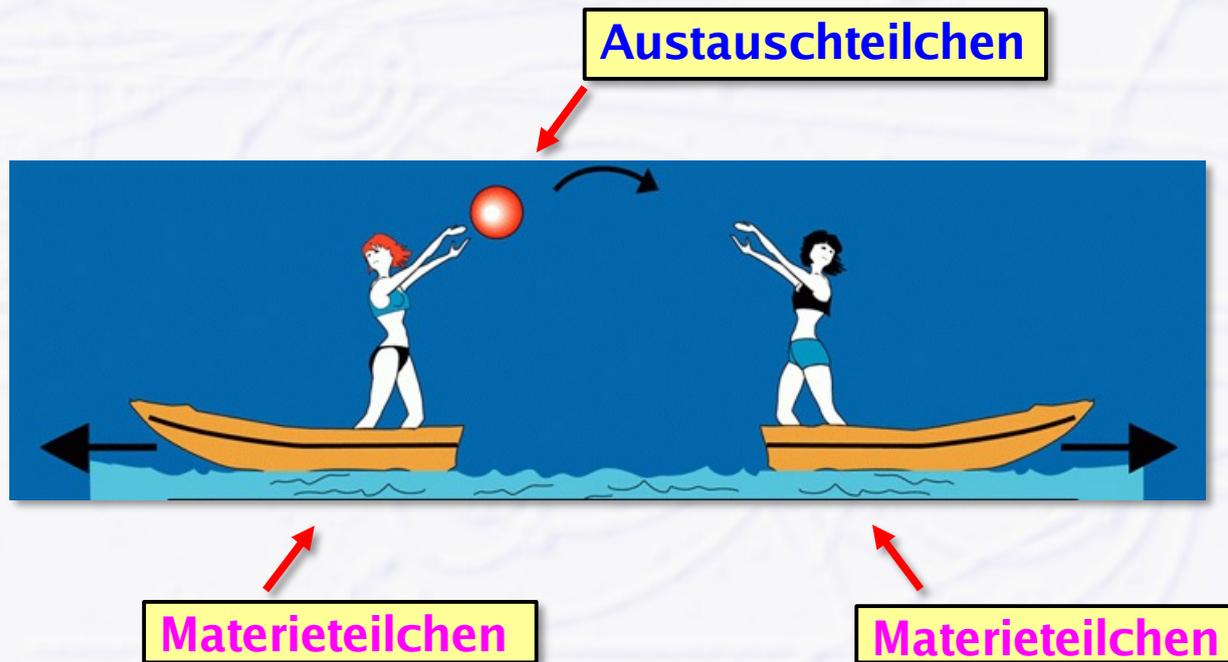
- Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen?
 - Kraft muss stärker sein als die (abstoßende) elektro-magnetische Kraft
 - Neue **“Starke“ Kraft** als neue Wechselwirkung
 - Kurze Reichweite ($\sim 1\text{-}2\text{ fm}$), um die Größe des Atomkerns zu erklären
- Idee von Yukawa 1935
- Ein Teilchen mit einer **‘mittelgrossen’ Masse (Meson)** vermittelt diese ‘starke’ Kraft (das **‘Pion’**)



Hideki Yukawa
(1907-1981)

Austauschteilchen

- **Kräfte können durch Austauschteilchen vermittelt werden**
 - angewandte Unschärferelation $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
 - kurzzeitig kann Energie ΔE “geborgt“ werden und muss nach Zeit Δt wieder verschwinden
- **Die Abstände im Atomkern (1.4 fm) erfordern ein Teilchen mit ca. 140 MeV/c²**



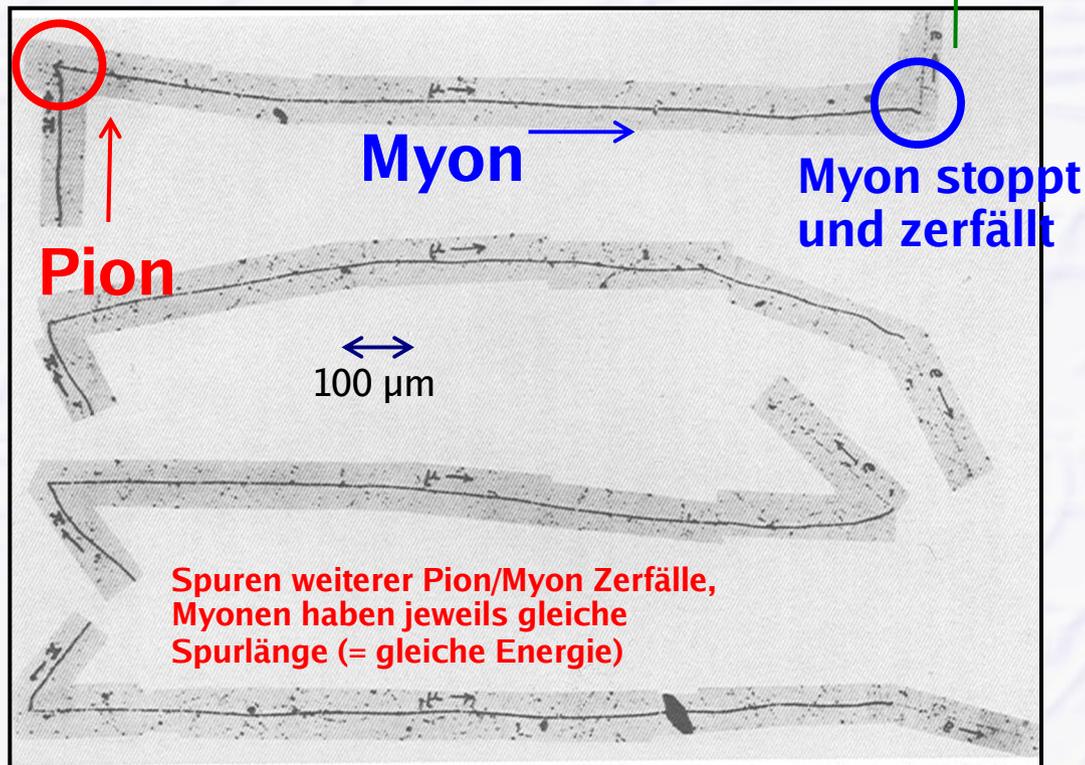
Erste Mesonen

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

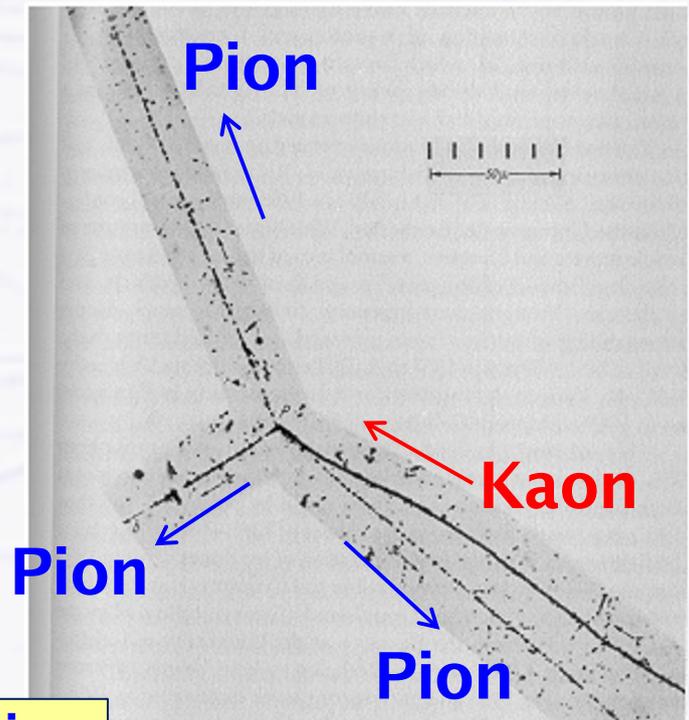
Cecil Powell



Pion stoppt und zerfällt



Photoemulsion

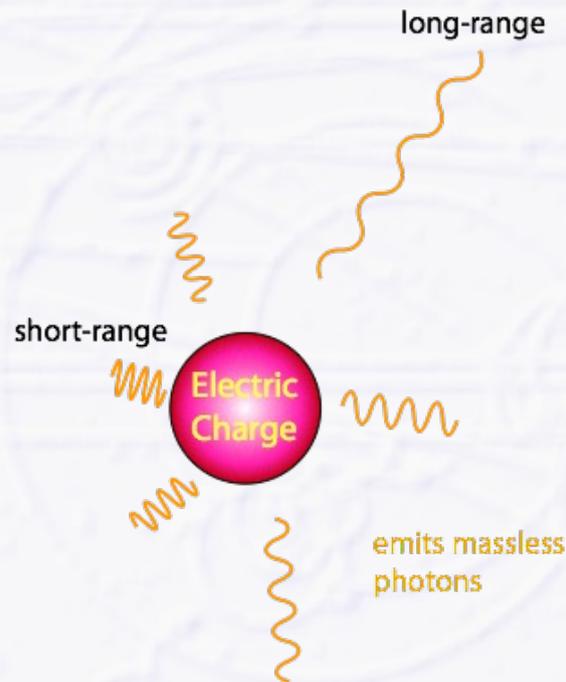


Elektro-magnetische und Starke WW

● Elektro-magnetische WW

→ **Photonen** sind Austauscheteilchen

- masselos
- unendliche Reichweite (ΔE klein $\rightarrow \Delta t$ groß)



● Starke WW (Bild bei niedrigen Energien < 1 GeV)

→ **Pionen** sind Austauscheteilchen

- massiv, ~ 140 MeV/c²
- endliche Reichweite (\sim Größe des Atomkerns, ~ 1.4 fm)



emits massive pions

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (\Delta E \sim m)$$

$$r = c \Delta t = \frac{\hbar c}{m} \sim \frac{200 \text{ MeV fm}}{m}$$

Yukawa-Potential

- **Coulomb-Potential** für masselose Austauschteilchen

$$V_{\text{Coulomb}}(r) = -g^2 \frac{1}{r} \quad \text{mit } g = \text{Kopplungsstärke, z.B. } g = e = \text{el. Ladung}$$

- **Yukawa-Potential** für massive Austauschteilchen

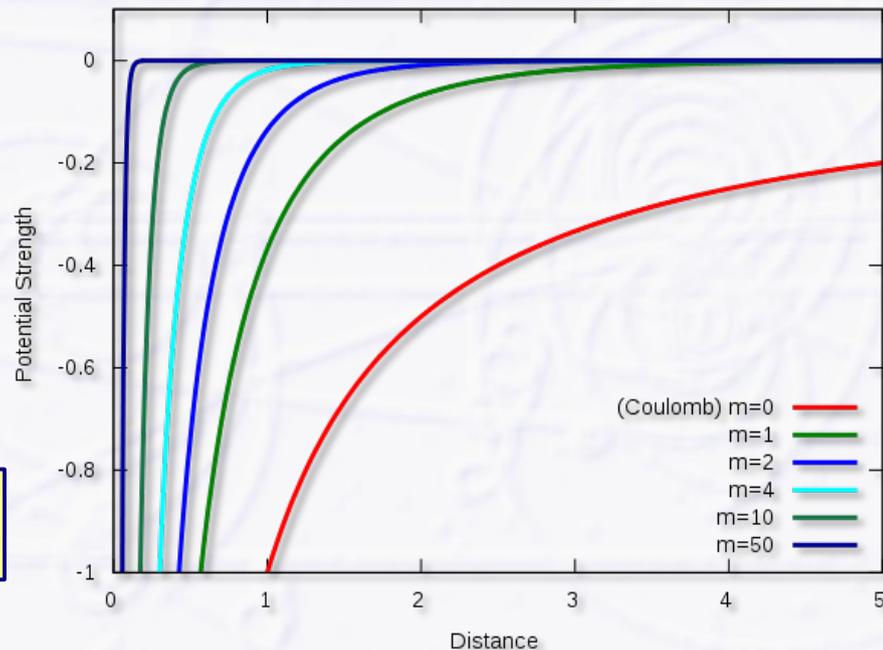
$$V_{\text{Yukawa}}(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r} \quad \text{mit } m = \text{Masse des Austauschteilchens}$$

für $m = 0 \Rightarrow e^{-mr} = e^0 = 1$

Übergang des Yukawa-Potentials
ins Coulomb-Potential

Yukawa-Potential für
verschiedene Massen

A comparison of Yukawa potentials with various values of m

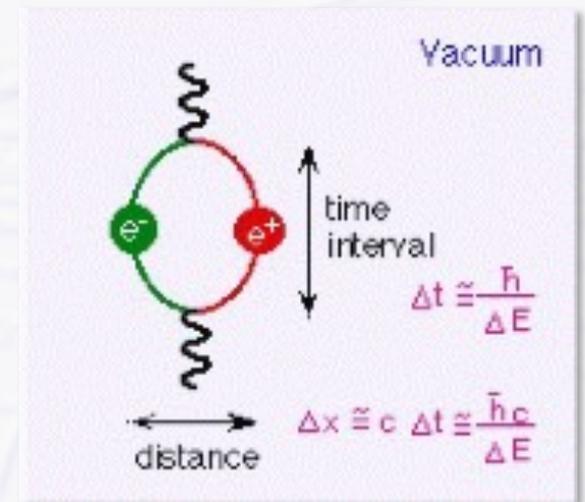
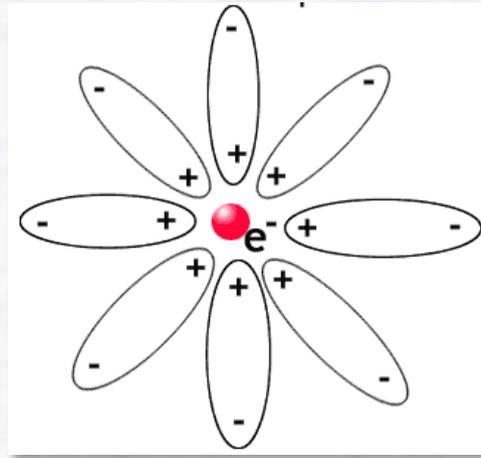
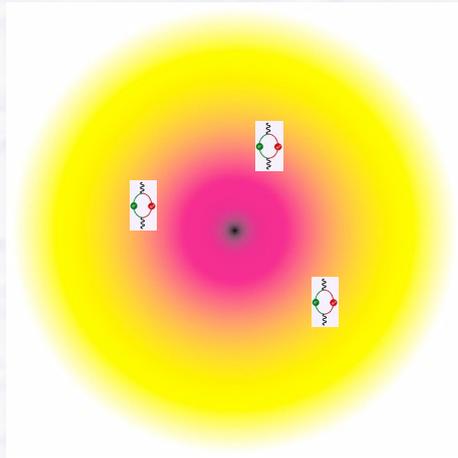


Vakuumfluktuationen

- **Das Vakuum ist nicht leer!**

- Schon wieder: Heisenbergsche Unschärferelation $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Ursache für kurzzeitig auftauchende & verschwindende Teilchen – Antiteilchen Paare aus dem Vakuum

- **z.B. Abschirmung der Elektronladung**



- “nackte” Ladung des Elektrons **polarisiert die Teilchen – Antiteilchen Paare aus Vakuumfluktuationen**

- **gemessene Elektronenladung = “nackte” Ladung + Polarisation**

Quanten-Elektrodynamik QED

- Quantenfeldtheorie QFT

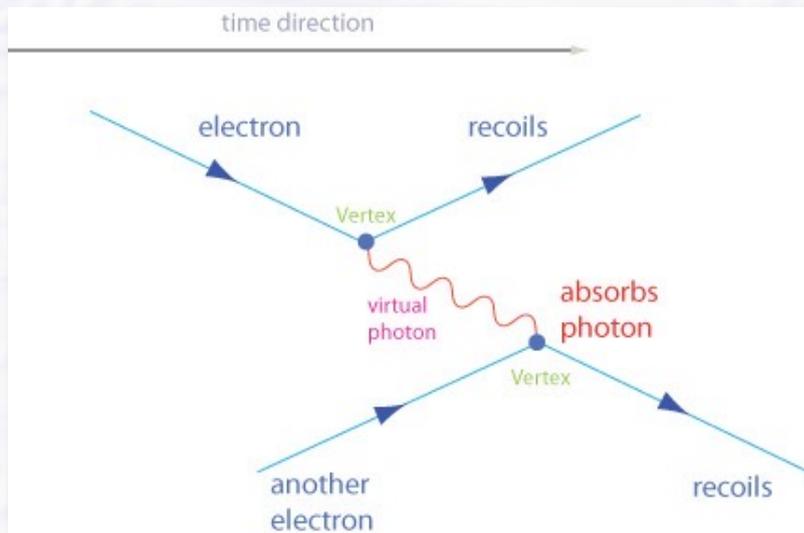
 - **Felder werden quantisiert**, Kraftaustausch über Teilchen

- QED = Quantenfeldtheorie der elektro-magnetischen WW

 - Richard Feynman, Julius Schwinger, Shin'ichirō Tomonaga 1934-1948

 - Beschreibung durch "**Feynman-Diagramme**" = **präzise Berechnungsvorschriften** für jede Linie, Vertex usw.

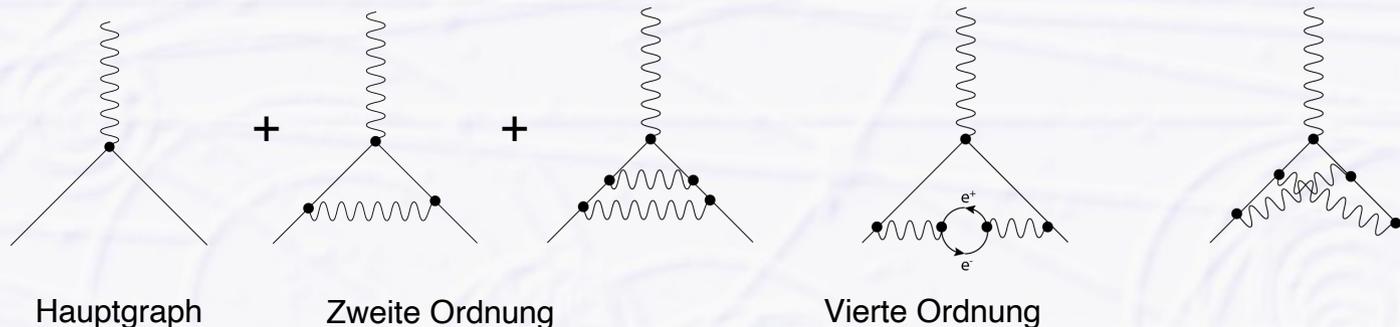
 - sehr anschaulich gemacht durch einfache graphische Darstellung



**Beispiel: elastische
Streuung zweier Elektronen**

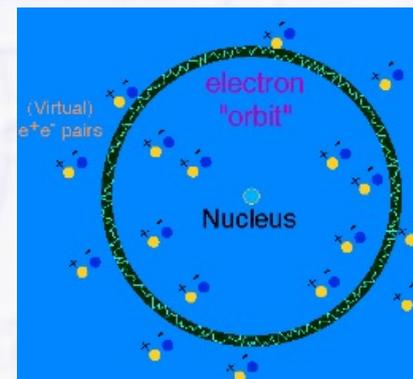
Renormierung

- Ein Hauptproblem: **Seeehr viele (unendlich viele) Graphen**
 - Graphen **divergieren oft gegen unendlich**
 - Lösung: **“Renormierung”** der Graphen auf eine bestimmte Energieskala
 - **“unendlich” – “unendlich” = “endlich”**
 - 1. Beispiel: **anomales magnetische Moment des Elektrons**
 - Übereinstimmung Theorie – Experiment auf $<10^{-10}$ genau



→ 2. Beispiel: **Lambshift (1948)**

- Verschiebung der atomaren Energieniveaus
- durch **Vakuumfluktuationen und Polarisation**



Casimir-Effekt

- Direkte Messung der Vakuum-Fluktuationen
- **Messbarer äußerer Druck** auf 2 Metallplatten mit kleinem Abstand

→ **Ausserhalb der Platten**

- Vakuumfluktuationen mit allen Energien möglich
- alle Wellenlängen der Teilchen-Wellenfunktionen

→ **Innerhalb der Platten**

- nur passende Wellenlängen möglich
- nicht alle Moden passen zwischen die Platten

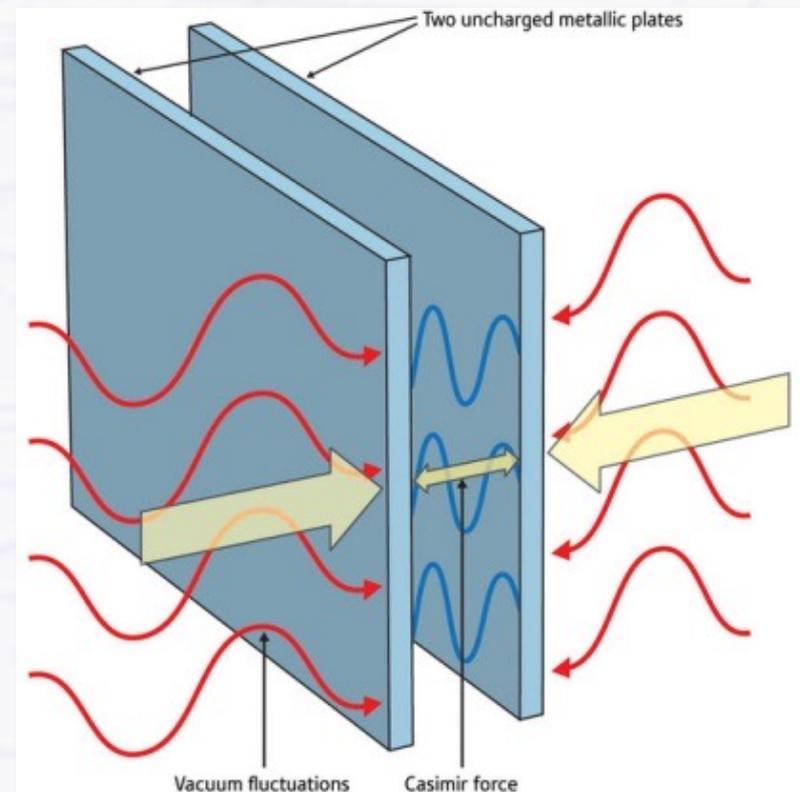
- **Resultierender Effekt**

→ Äußerer Druck abhängig von $1/d^4$

$$p_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\pi^2 \hbar c}{240} \cdot \frac{1}{d^4}$$

Bei **11 nm Plattenabstand** (~100x Atomdurchmesser)

→ **100 kPa = 1 bar**



Die Teilchenwelt 1948

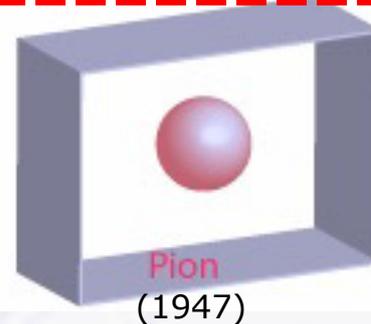
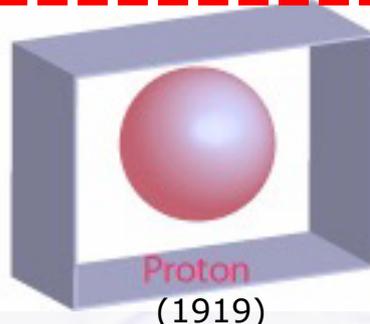
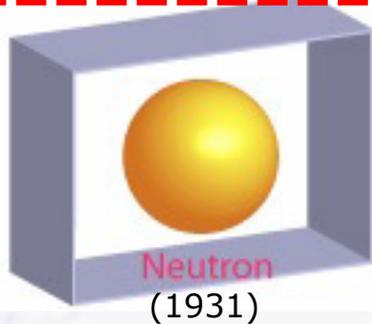
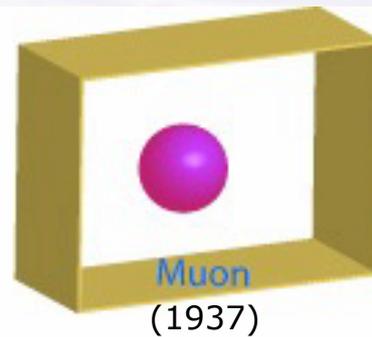
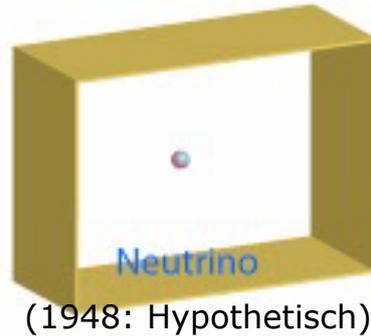
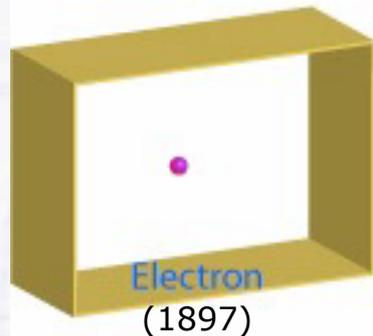
● Einige wenige “Elementarteilchen”

→ Bestandteile des Atoms

- **Elektron** = Hülle
- **Proton, Neutron** = Kern mit **Pion** als Austauscheteilchen

→ **Neutrino** (hypothetisch) zur Erklärung des Betazerfalls der Neutronen

→ **Myon** in der Höhenstrahlung gefunden, aber unklare “Funktion”



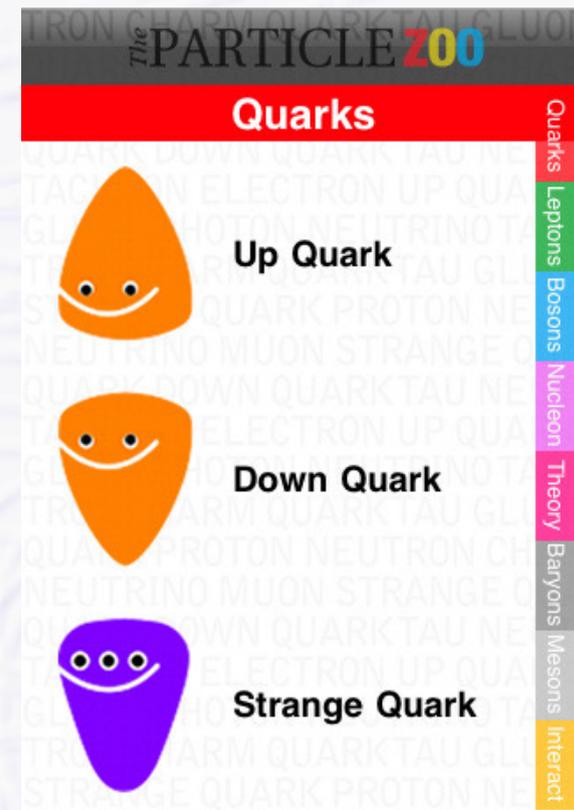
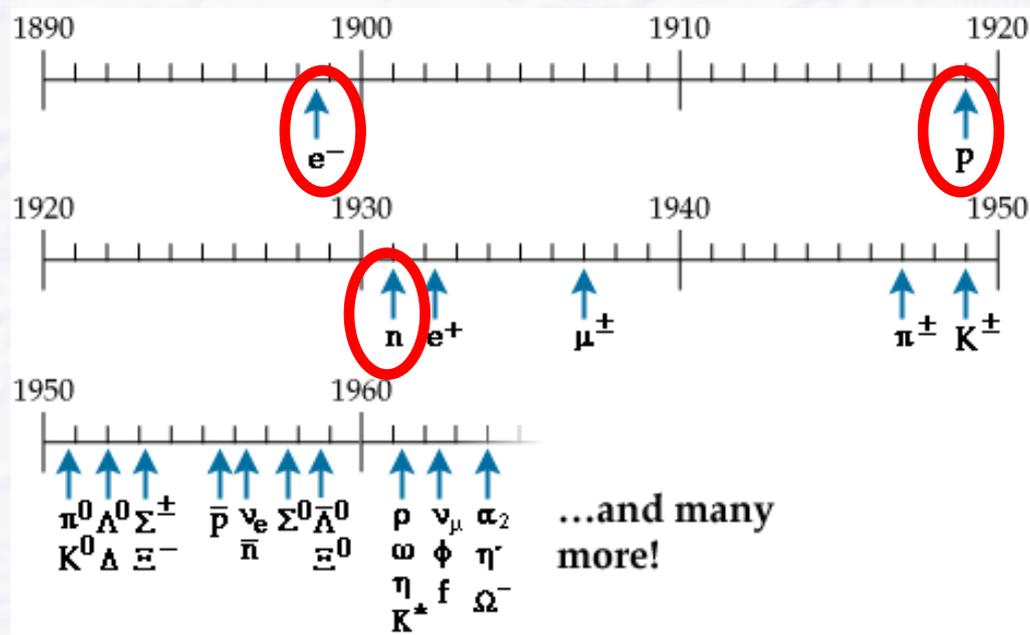
später als zusammen-
gesetzte Teilchen
erkannt = keine
“Elementar”-Teilchen

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)

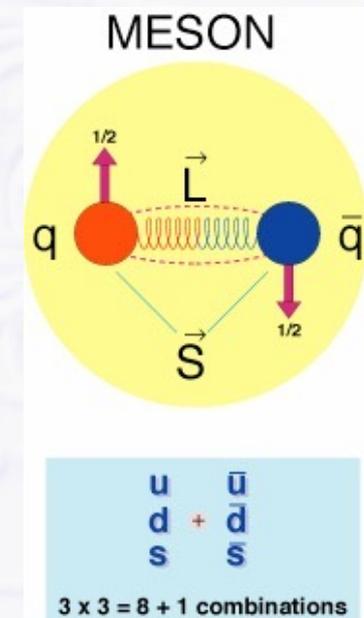
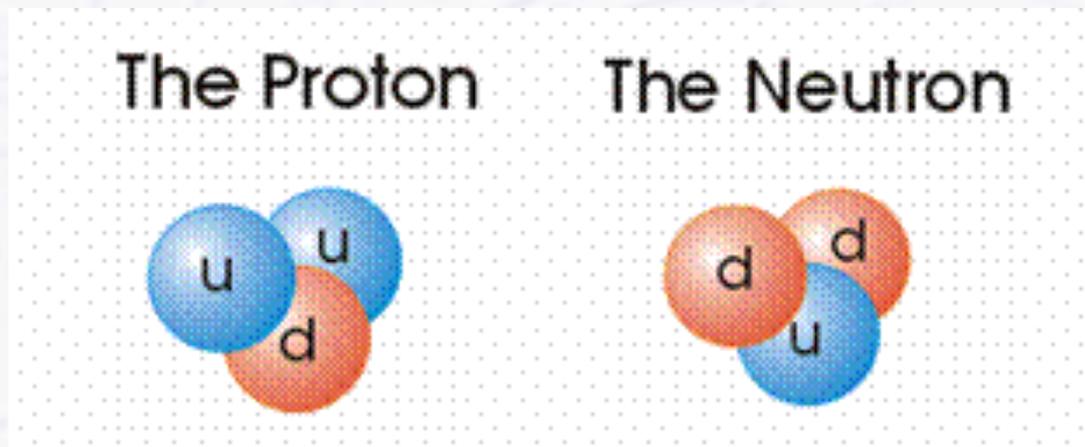
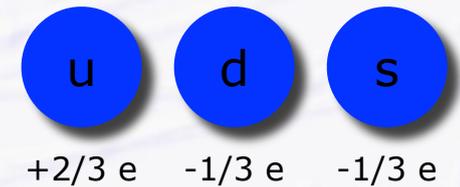
→ Welche Kräfte wirken zwischen den Materieteilchen? → **Standardmodell**

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

Quantenchromodynamik QCD

Ein Klassifizierungsschema mit "Quarks" als Bestandteilen

- Murray Gell-Mann und George Zweig 1963
- Es gibt 3 Arten von Quarks (1963): up, down, strange
- Elektrische Ladung: $+2/3$, $-1/3$, $-1/3$
- Träger der "Farbladung" der starken Wechselwirkung
 - 3 Farbladungen: rot, grün, blau
- Nur bestimmte "farbneutrale" (weiße) Kombinationen sind möglich
 - Meson = Quark + Antiquark
 - Baryon (Proton, Neutron, etc.) = 3 Quarks oder 3 Antiquarks



Gluonen

- **Niederenergievorstellung:** Pionen als Austauscheteilchen vermitteln Kräfte zwischen Protonen und Neutronen im Kern
- **Mikroskopisch im Rahmen der Quantenchromodynamik**
 - **Gluonen sind Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung**
 - verändern die **Farbladung** der Quarks und sind selbst Träger von **Farbladung**
- **insgesamt 8 Gluonen mit Farbladung**

$$G_1 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{b} + b\bar{r})$$

$$G_4 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (b\bar{g} + g\bar{b})$$

$$G_6 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (g\bar{r} + r\bar{g})$$

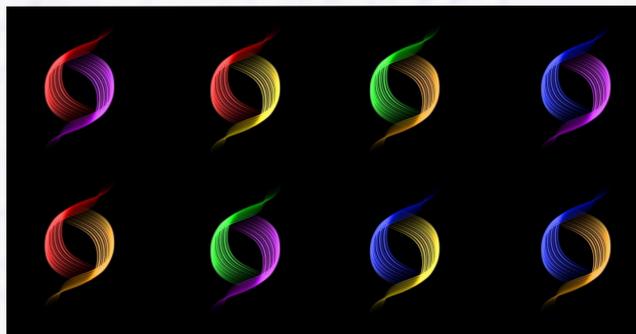
$$G_2 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{b} - b\bar{r})$$

$$G_5 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (b\bar{g} - g\bar{b})$$

$$G_7 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (g\bar{r} - r\bar{g})$$

$$G_3 \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{r} - b\bar{b})$$

$$G_8 \sim \frac{1}{\sqrt{6}} (r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})$$



Selbstwechselwirkung

● Konsequenz der Farbladung der Gluonen

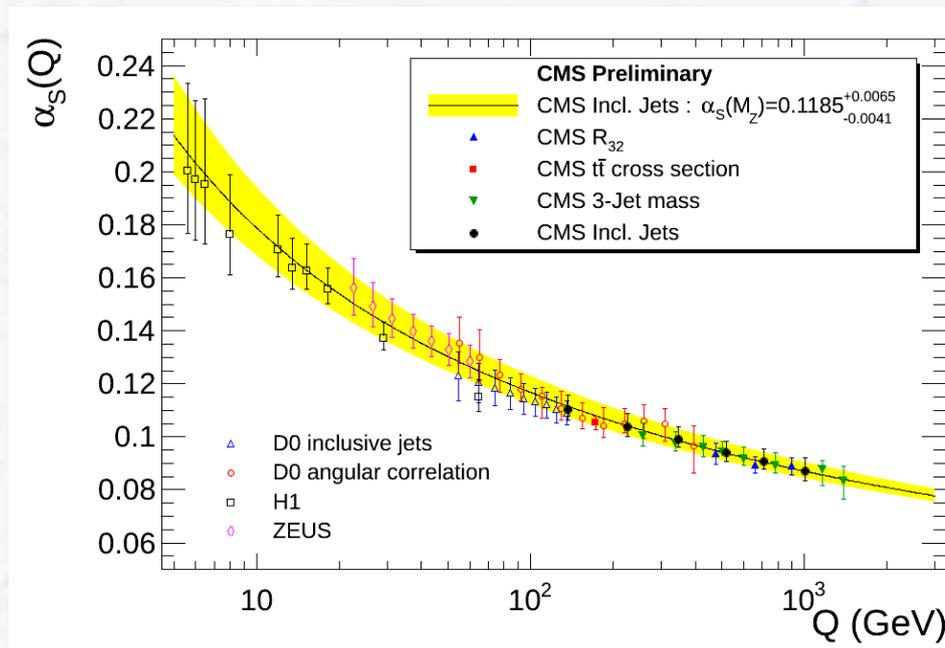
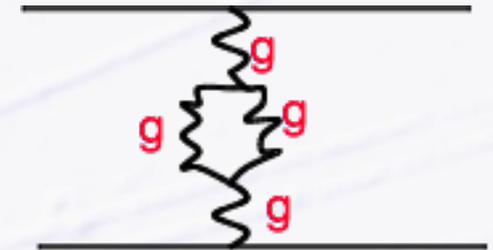
→ Gluon – Gluon Selbstwechselwirkung

→ Anwachsen des Potentials bei großen Abständen

○ Quarks lassen sich nicht voneinander trennen, es gibt keine freien Quarks

→ Stärke der Wechselwirkung nimmt ab bei kleinen Abständen (= hohen Energien), Kopplungsstärken sind energieabhängig

○ gemessenes „running“ α_s der starken Wechselwirkung



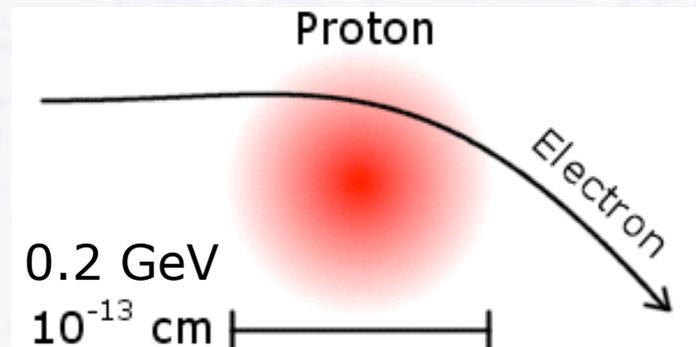
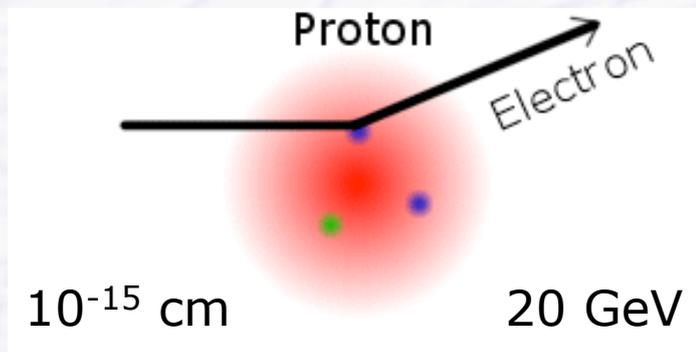
Entdeckung der Quarks 1968

● Streuung von Elektronen an Protonen

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

hoher Impuls → Materiewellenlänge (de Broglie) klein!

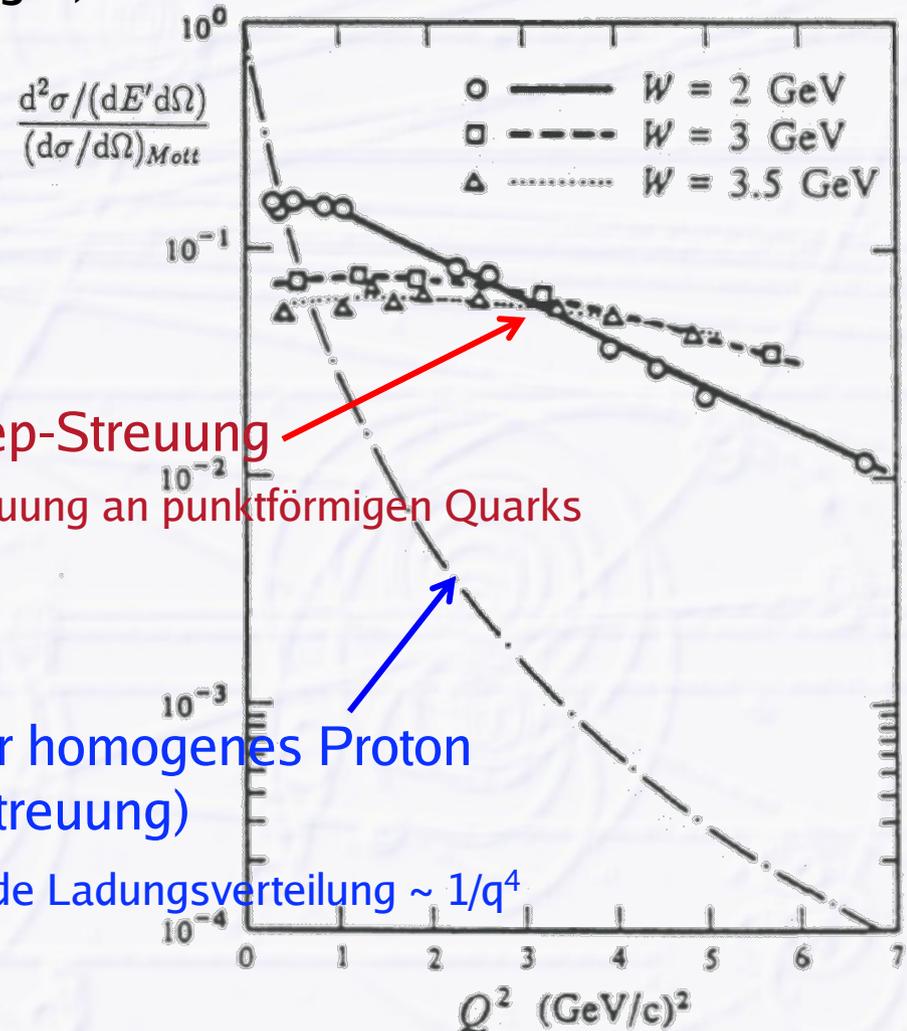
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Gemessen:
Inelastische ep-Streuung
elastische Streuung an punktförmigen Quarks

Erwartung für homogenes Proton
(elastische Streuung)

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

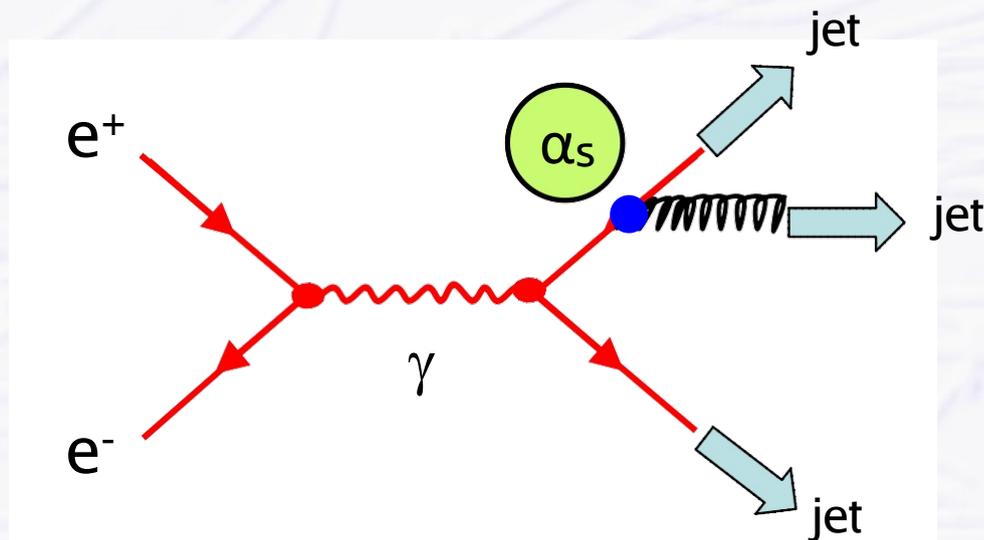


Nachweis des Gluons 1979

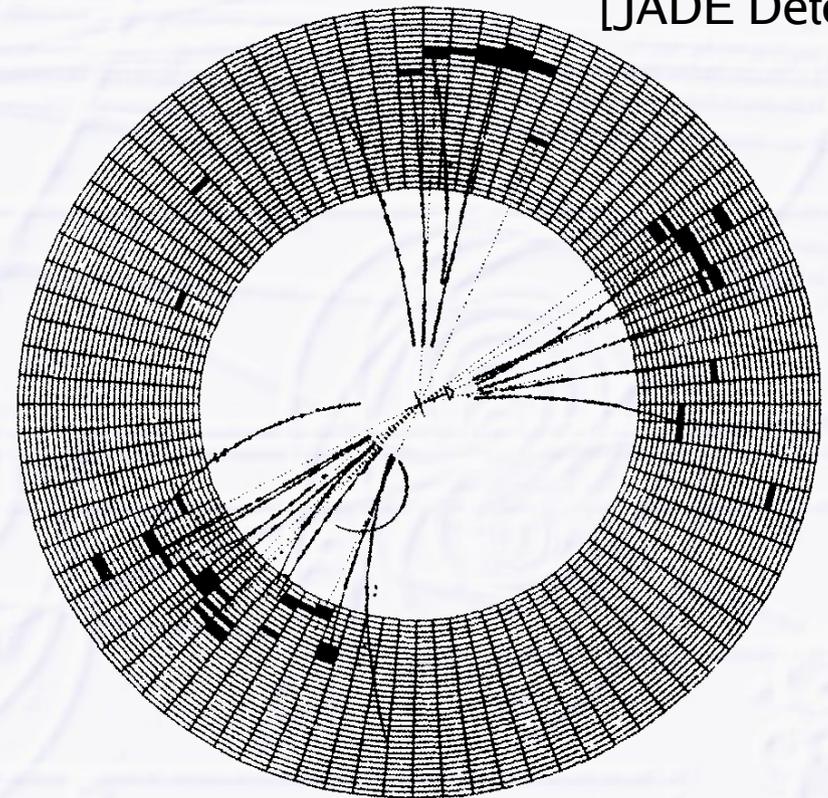
- **PETRA e^+e^- collider am DESY/Hamburg**

→ Erzeugung von Quark – Antiquark Paaren (2 Jets)

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



3-jet event
[JADE Detektor]

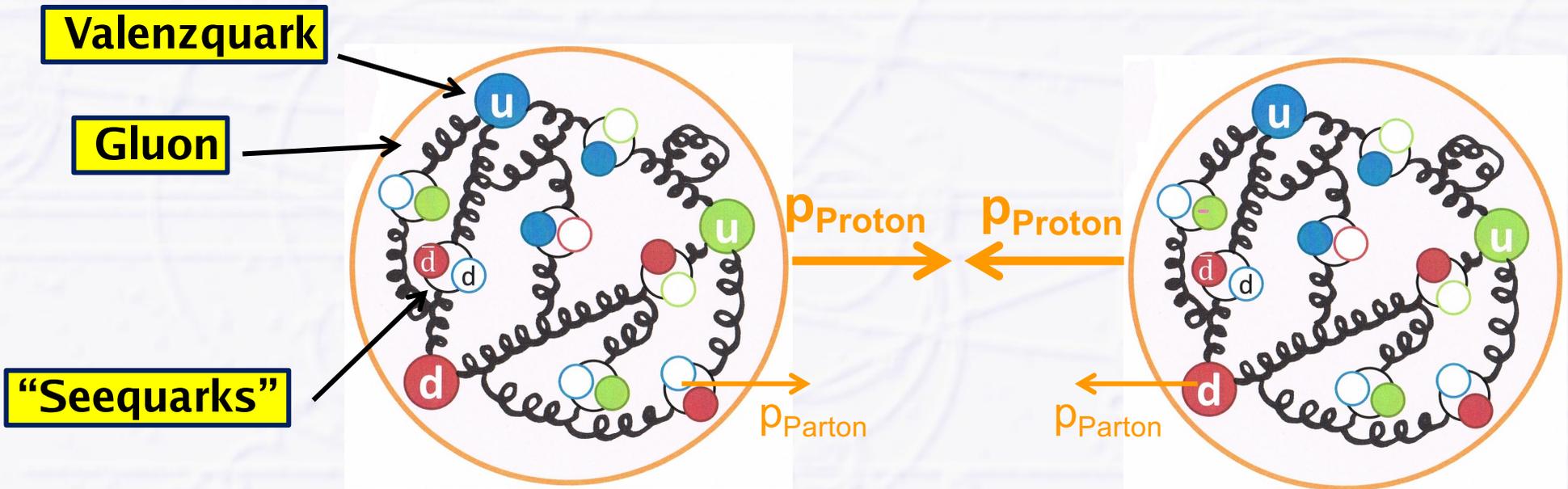


$$\frac{\# \text{ 3-jet events}}{\# \text{ 2-jet events}} \sim \alpha_s(s)$$

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 im LHC

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



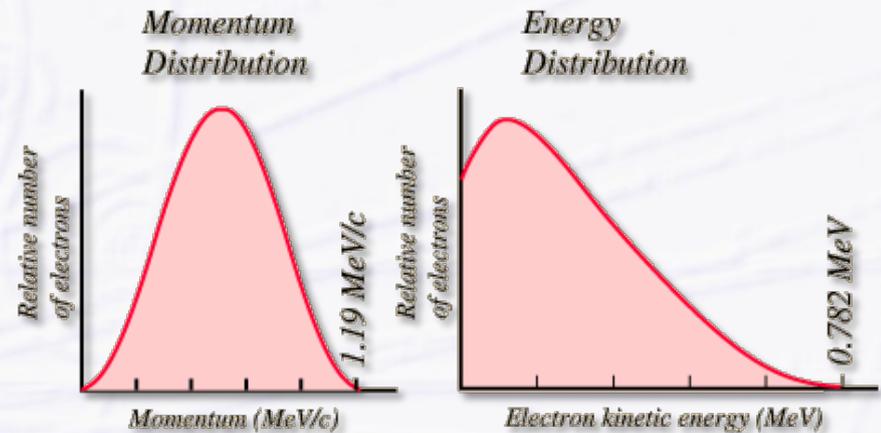
Vervollständigung des Standard Modells

**Neutrinos,
Schwache + Elektro-schwache Wechselwirkung,
die Z^0 Resonanz, das Standardmodell**

Schwache Wechselwirkung

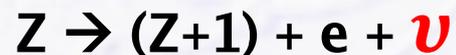
● Beta-Zerfall von Atomkernen

- $Z \rightarrow (Z+1) + e + ???$
- warum werden **Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum** emittiert?
- **Verletzung der Energieerhaltung??**
 - würde eine **Revolution** der Physik bedeuten!



● Wolfgang Pauli postuliert 1930

- “an *extremely light neutral particle** is emitted in beta decay”
- zunächst **Neutron** genannt, dann **Neutrino ν** (= kleines Neutron, Enrico Fermi 1931)



Wolfgang Pauli
(1900-1958)

Neutrinos

- **Extrem geringe Wahrscheinlichkeit mit Materie zu reagieren**

→ 2 MeV Neutrino kann **1600 Lichtjahre Wasser** durchdringen

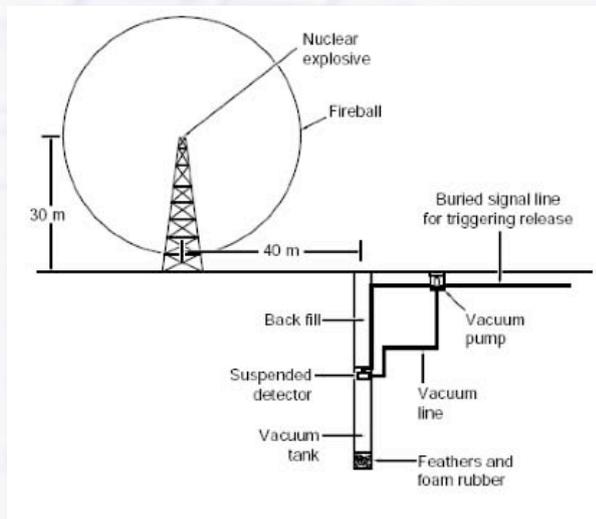
- Pauli: "I have done a terrible thing. I have postulated a particle that cannot be detected"

- **Wurde trotzdem 1956 entdeckt durch Clyde L. Cowan und Frederick Reines (Nobelpreis 1995)**

→ **Nötig: Sehr hoher Neutrino Fluss + große Detektormasse + Zeit**

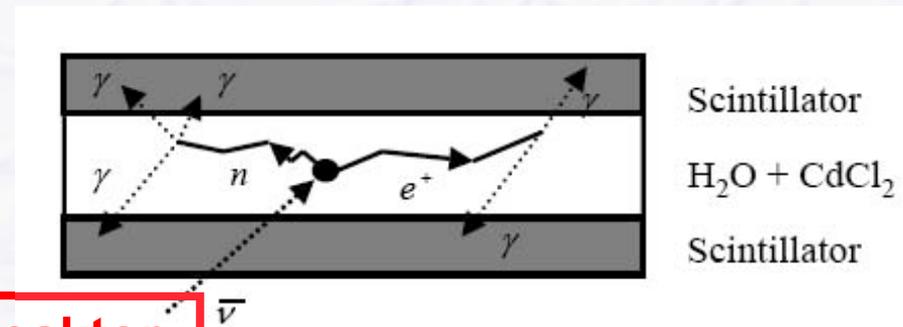
- **Allererste Idee: Setze Detektor nahe einer Nuklearexplosion**

→ **"Poltergeist" Projekt**



- **Letztlich entdeckt durch Detektor am Savannah River Kernreaktor**

→ **"Goldenes Signal"** $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$



Reaktor

Neutrino Arten (“flavours”)

- **Es gibt mehr als eine Neutrino Art**

- Leon Lederman, Melvin Schwartz und Jack Steinberger (Nobelpreis 1988) entdeckten **eine zweite Neutrino Art** 1962

- Nutzten AGS Beschleuniger in Brookhaven (USA) um **Myon Neutrinos zu erzeugen**

- **Myon Neutrinos** reagieren mit Detektor und erzeugen **Myonen**

- **29 Ereignisse mit Myonen** beobachtet, **0 Ereignisse mit Elektronen**

- **Elektron Neutrinos** \neq **Myon Neutrinos**

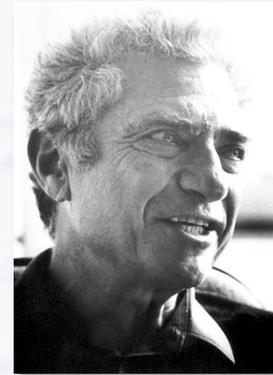
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$



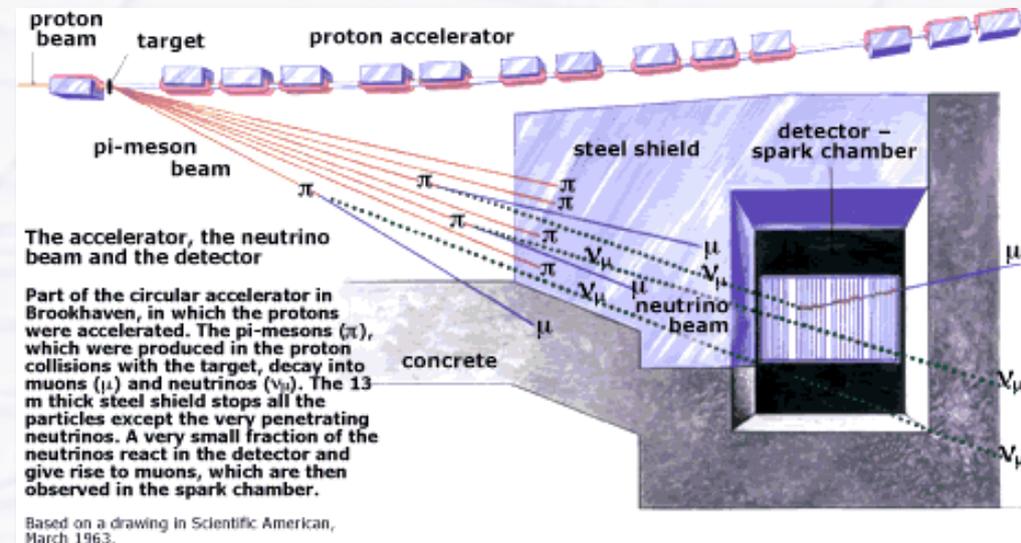
Leon Lederman (1922-2018)



Melvin Schwartz (1932-2006)



Jack Steinberger (1921-2020)



Das solare Neutrino Rätsel



Ray Davis
(1914-2006)

- Sonne "scheint" (Elektron) Neutrinos
- Ray Davis (Nobelpreis 2002) will Neutrinos in 1960er Jahren messen

→ Tank mit 380 m³ Perchlorethylen in Homestake Goldmine (Tiefe 1478 m)

- Abschirmung kosmischer Strahlung



- Argon wird chemisch extrahiert und durch radioaktiven Zerfall nachgewiesen

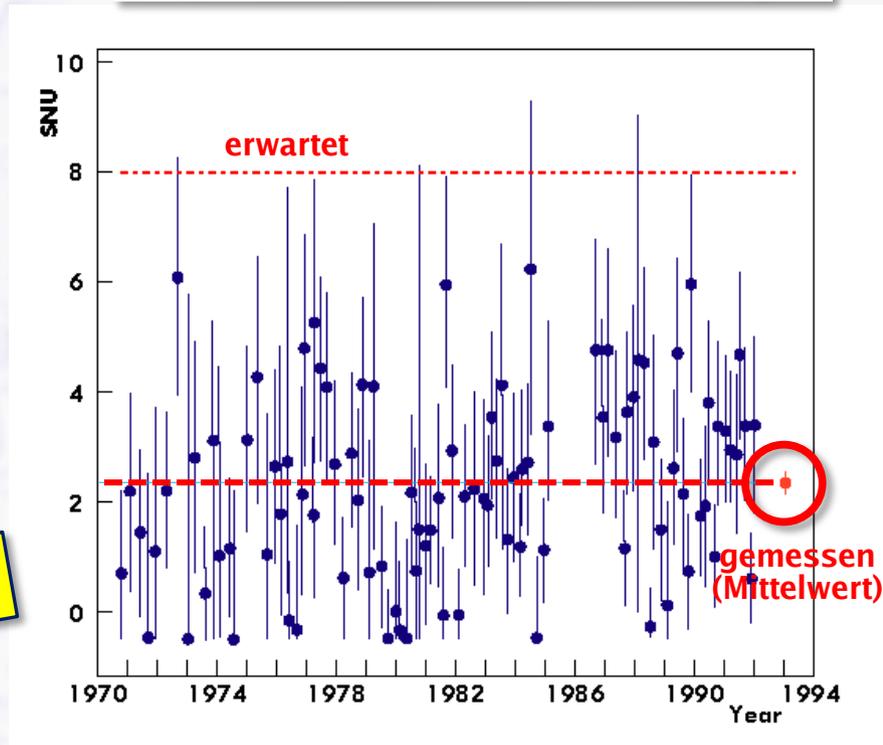
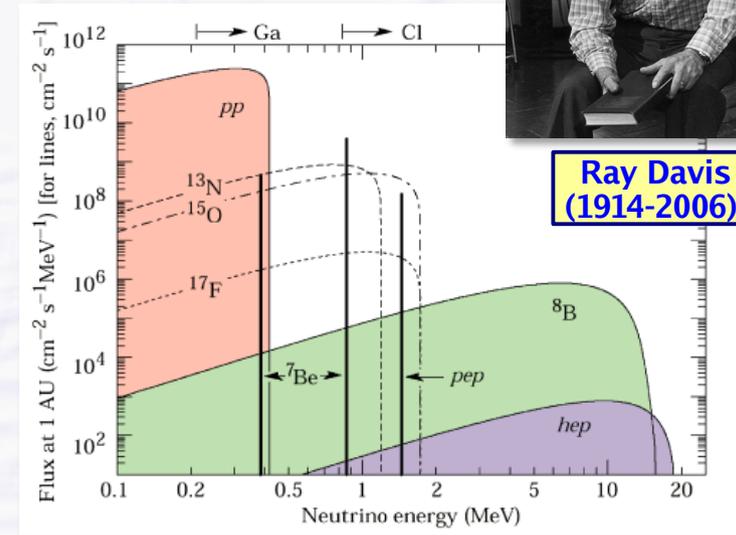
- Fand nur 34 ± 6% des erwarteten Neutrinoflusses

→ **Messung falsch?**

→ **Solarmodell falsch (Neutrinofluss)?**

→ **beides falsch???**

beides RICHTIG!

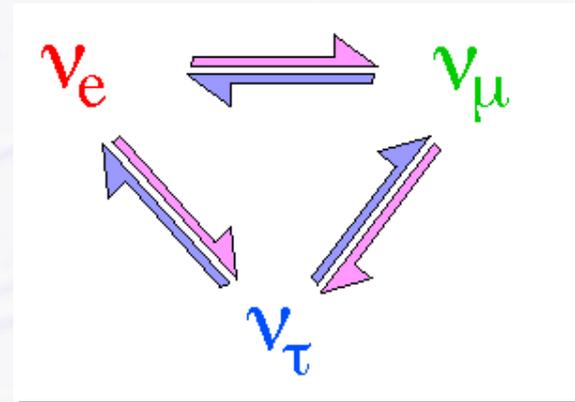


Lösung: Neutrino Oszillationen

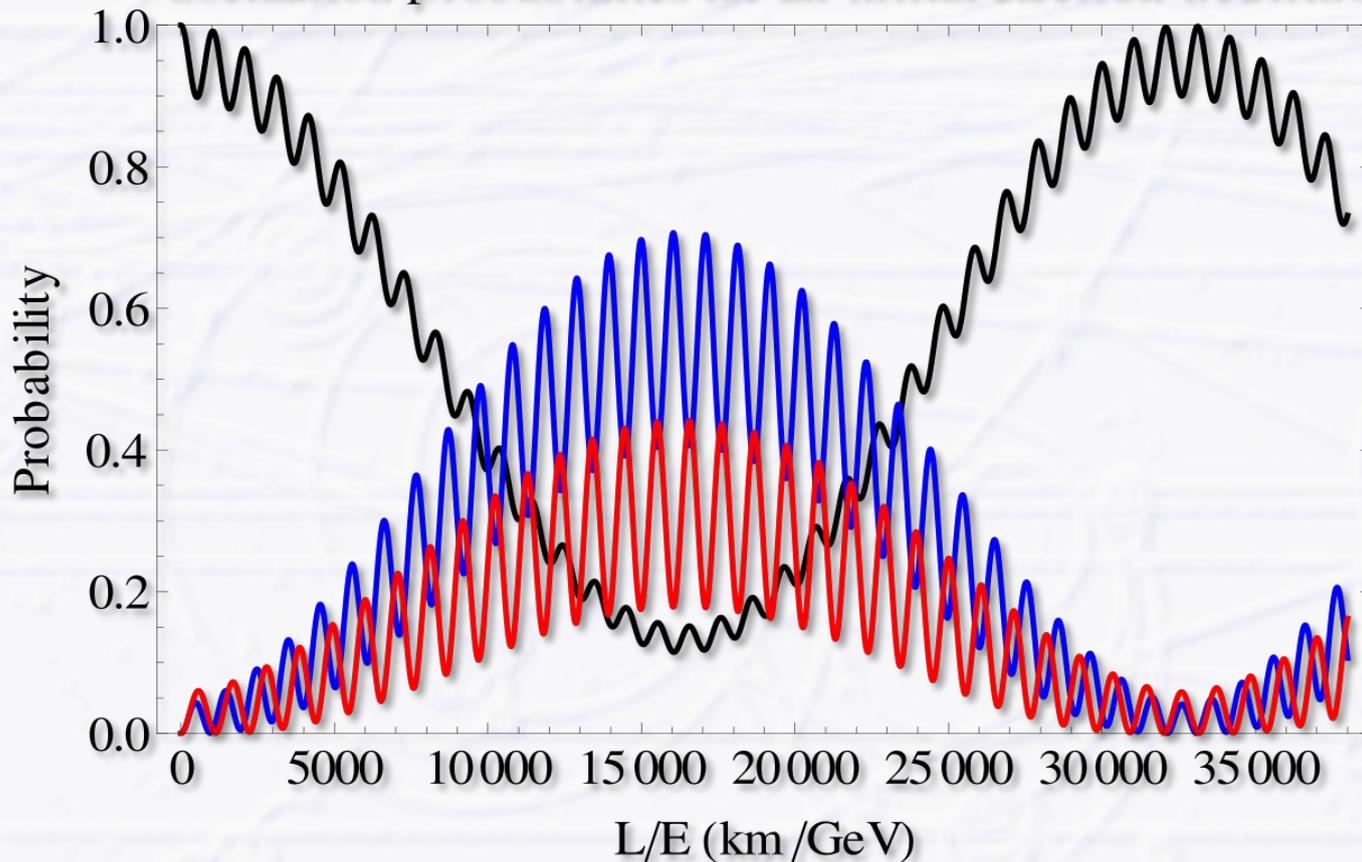
● Neutrinos verändern ihre Art mit der Zeit

→ 3 bekannte Neutrino Arten

$$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$$



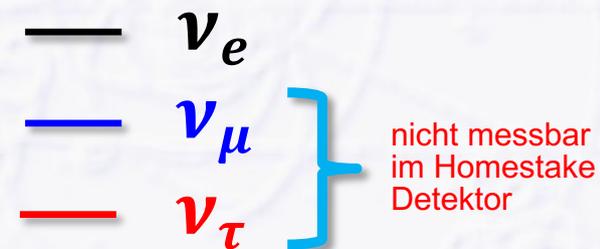
Oscillation probabilities for an initial electron neutrino



Reine Elektron Neutrinos werden durch die Sonne emittiert



Erreichen die Erde jedoch als Mischung von Elektron, Myon und Tau Neutrinos



Neutrino Mischung

Warum können sich Neutrinos umwandeln?

- Neutrino Arten sind nicht masselos + haben (kleine) Massendifferenzen
 - Wellenfunktionen sind **Superpositionen von 3 Neutrino Zuständen**
 - Auftreten von Phasenverschiebungen mit der Zeit, **Zusammensetzung variiert zeitlich**
- Mischung wird durch Matrix beschrieben
 - Neutrinoart Eigenzustand (Wechselwirkung) \neq Neutrinomasse Eigenzustand (Ausbreitung)

Wie Neutrinos
wechselwirken

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha,i} |\nu_i\rangle$$

$e \ \mu \ \tau$

3 Neutrinoarten

Wie Neutrinos
sich ausbreiten

1 2 3

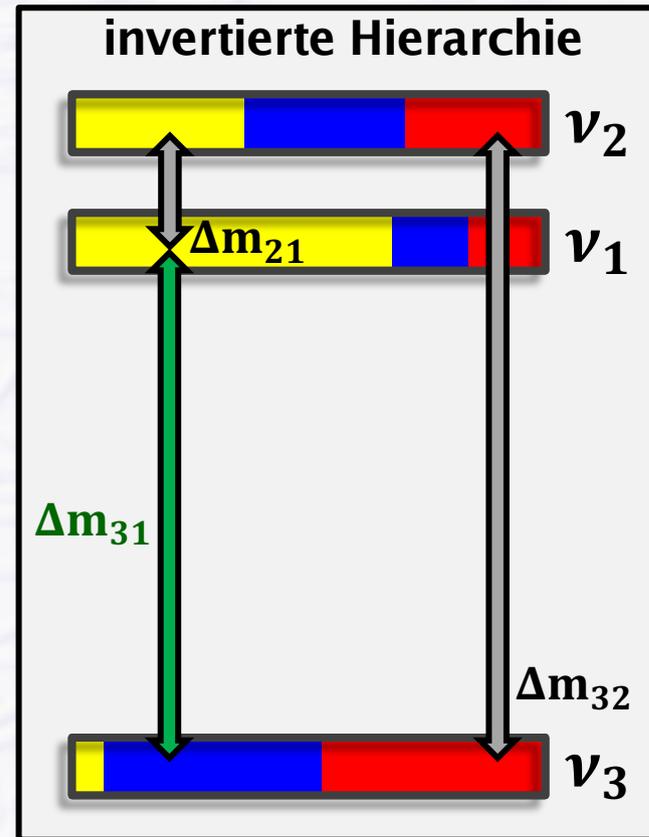
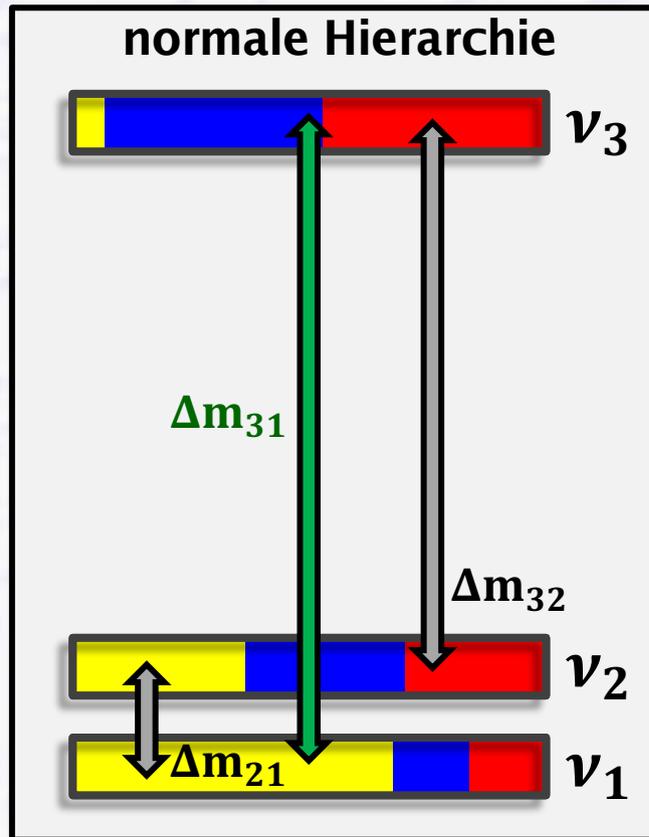
3 Neutrinomassen

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pontecorvo Maki Nakagawa Sakata - Matrix

Neutrino Massen Hierarchie

- Neutrino Massen sind klein und (immer noch) unbekannt
 - obere Grenze von direkten Messungen $m(\nu_e) < 1.1 \text{ eV}$ (KATRIN 2019)
 - von Messungen des kosmischen Mikrowellen Hintergrunds $\Sigma(m_\nu) < 0.12 \text{ eV}$ (2021)
- Hierarchie ebenfalls unbekannt, 2 Möglichkeiten

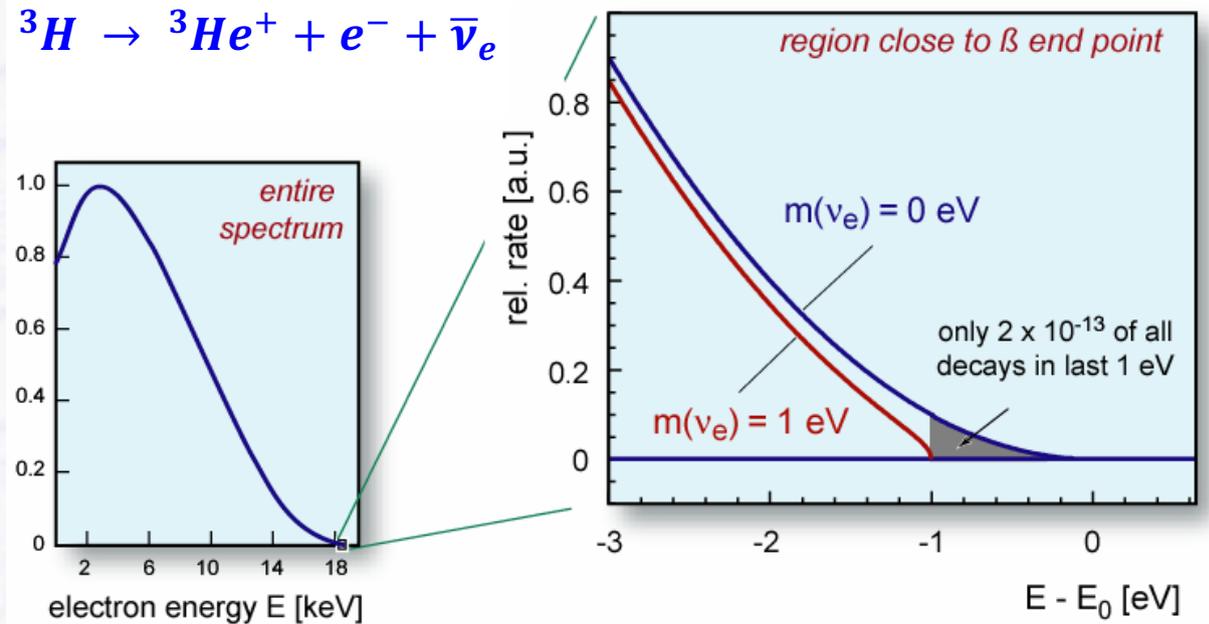


$$\Delta m_{31,\text{normal}} > \Delta m_{31,\text{inverted}}$$

Elektron Neutrino Masse

- **Direkte Massenmessung von ν_e extrem schwierig**

- Vermessung des radioaktiven Zerfalls von Tritium (β -Zerfall)



- KATRIN Detektor (Karlsruhe) versucht $m(\nu_e) < 0.2 \text{ eV}$ innerhalb von 5 Jahren zu messen

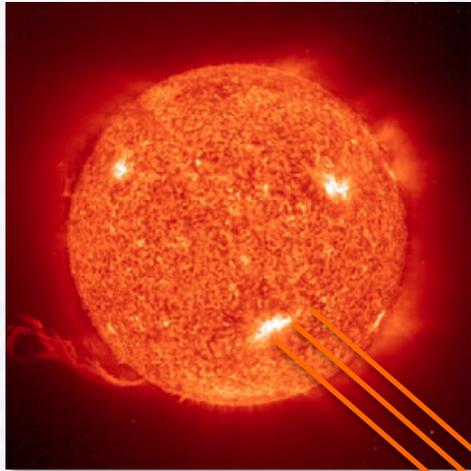
- **Viele andere Experimente fokussiert auf Messung von**

- Mischungswinkeln $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ und Massendifferenzen $\Delta m_{12}, \Delta m_{23}, \Delta m_{13}$

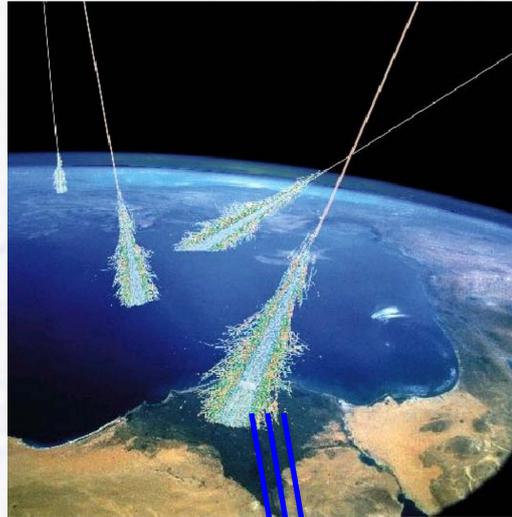
Natürliche Neutrino Quellen

(mit jeweiliger Anzahl von Neutrinos, die unsere Hand pro Sekunde durchdringen)

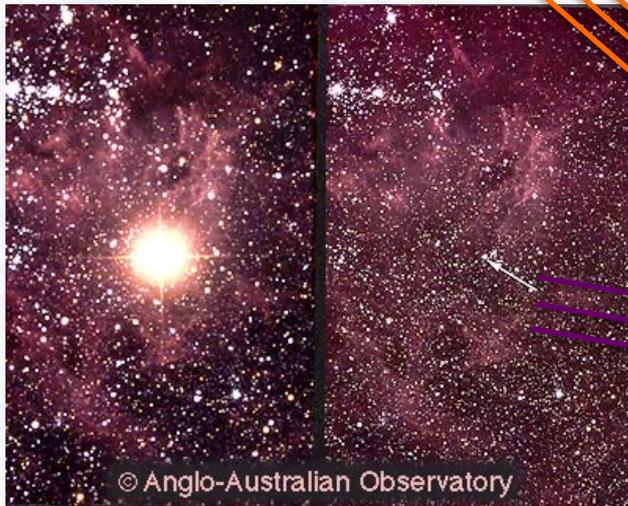
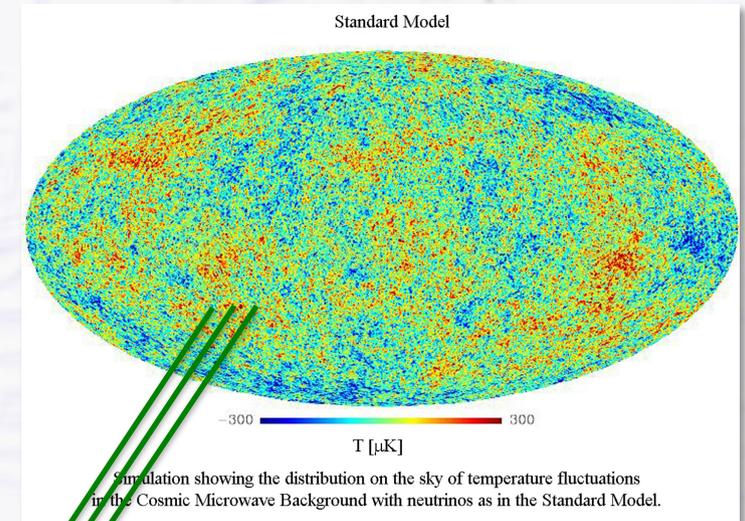
Sonne: $5 \times 10^{12}/s$



Atmosphäre: $\sim 20/s$

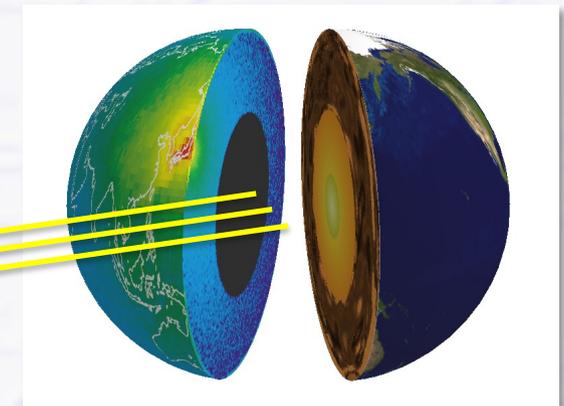


Urknall: $\sim 2 \times 10^{12}/s$



© Anglo-Australian Observatory

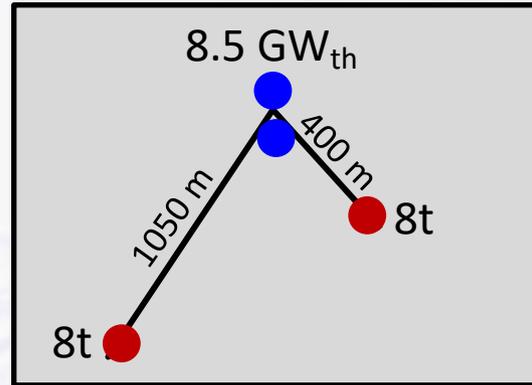
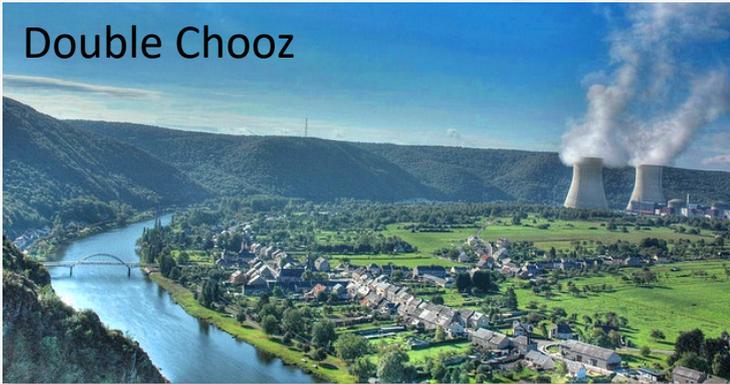
Supernova 1987: $\sim 10^{12}/s$



Erde: $\sim 10^9/s$

Neutrinos aus Kernreaktoren

Double Chooz

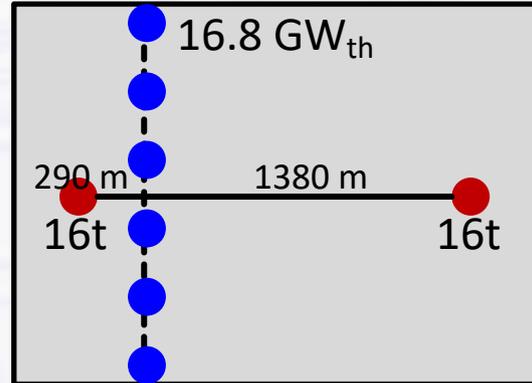


- reactor cores
- detectors

energy res. 6% (1 MeV)
 overburden: 300m
 statistics: 18 000 IBD

far detector

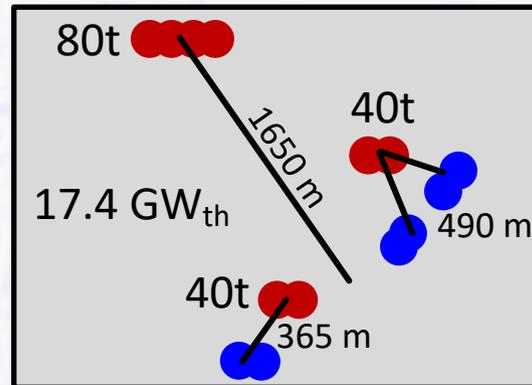
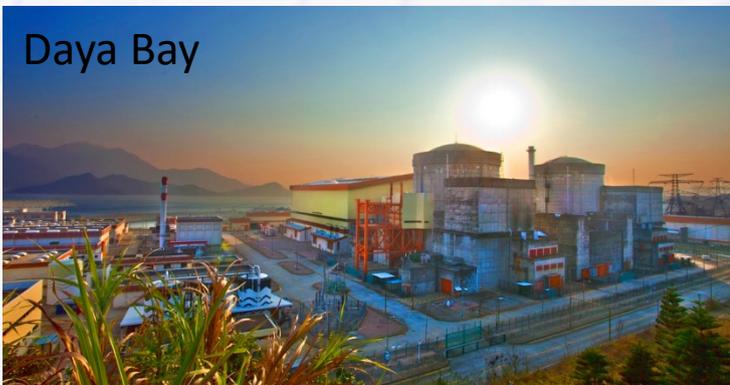
Reno



energy res. 7% (1 MeV)
 overburden: 450m
 statistics: 52 000 IBD

far detector

Daya Bay

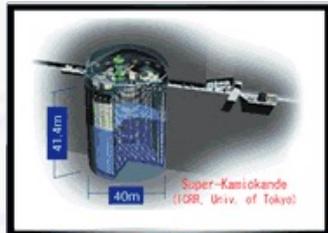


energy res. 8% (1 MeV)
 overburden: 860m
 statistics: 150 000 IBD

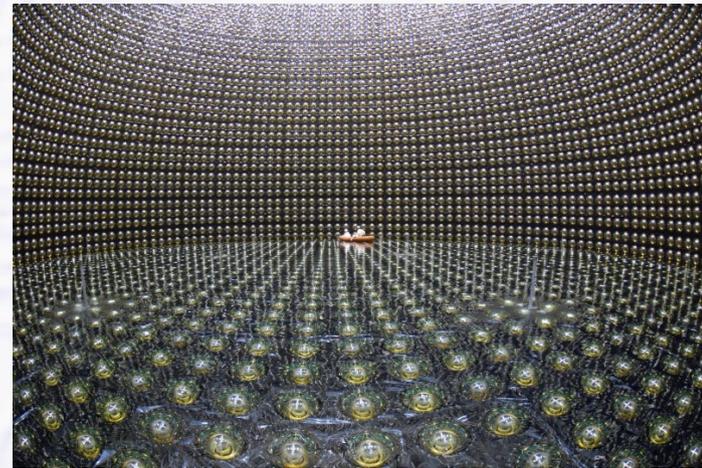
far detector

Neutrinos aus Beschleunigern

- Erzeugung von Neutrinos durch Zerfälle von Pionen/Myonen aus intensiven Protonenstrahlen auf Target



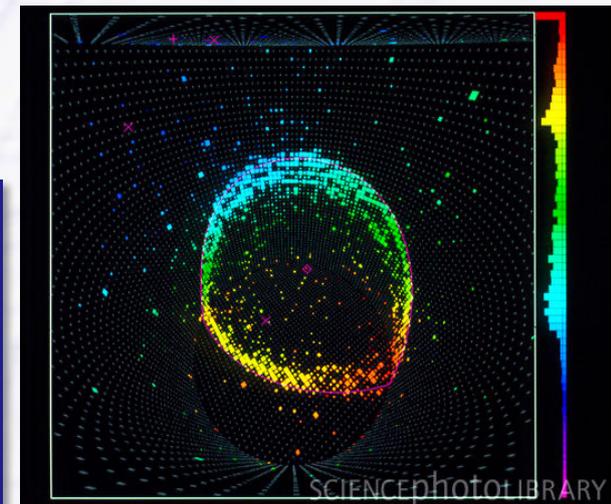
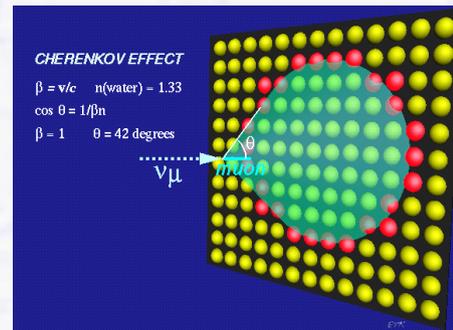
T2K (Tokai nach Kamioka, Japan)



Sehr großer unterirdischer Wasser Cherenkov Detektor

Elektronen oder Myonen von wechselwirkenden Neutrinos emittieren Cherenkov Licht

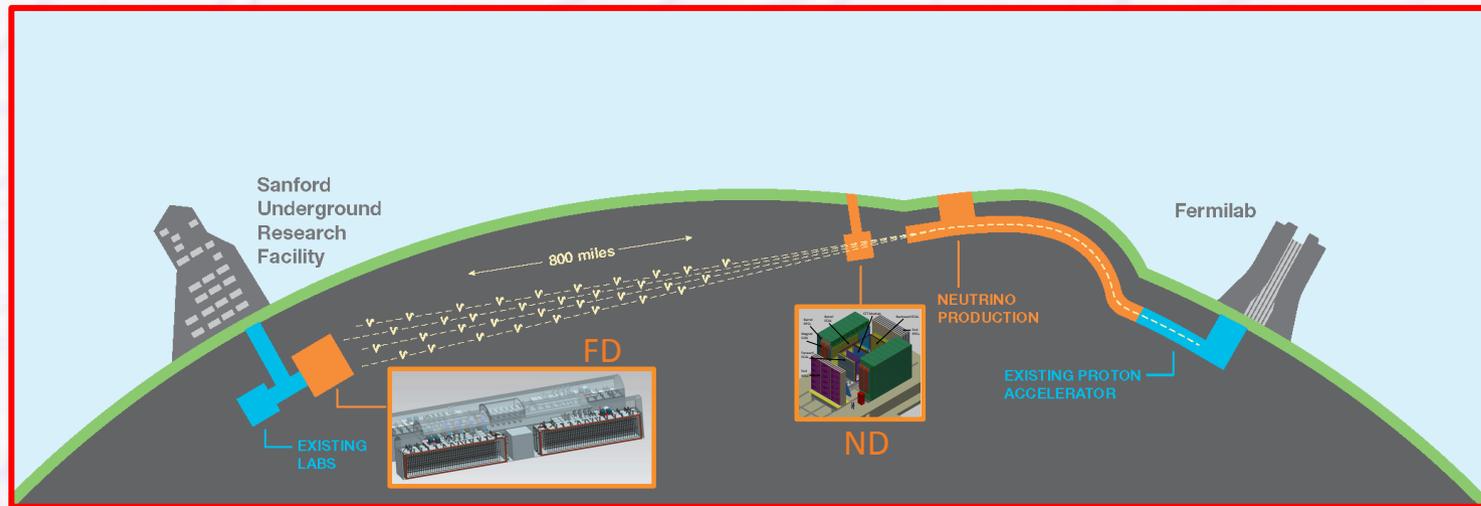
Ermöglicht Rekonstruktion von Impuls und Richtung, sowie e/ μ Teilchenidentifizierung



Zukünftiges Neutrinostrahl Projekt

● Long Baseline Neutrinostrahl

- Fermilab zur Sanford Mine (1300 km)
- “Near Detector” + “Far Detector” (DUNE), fertig ca. ~2032



● Plan

- Vervollständigung des “Standard Neutrino Modells”
 - Mischungswinkel, Massenhierarchie
- Suche nach Abweichungen von Standardmodell
 - z.B. ”sterile” Neutrinos (ohne ”flavour”), ungewöhnliche Wechselwirkungen, usw.

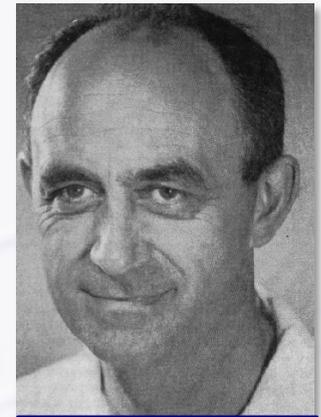
Fermi Theorie

- “Phänomenologische” Beschreibung der schwachen WW durch Enrico Fermi 1934

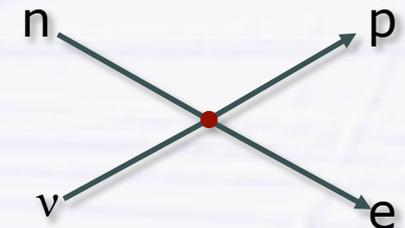
- Wechselwirkung findet punktuell statt

- Stärke $G_F \sim 10^{-5}$ relativ zur elektro-magnetischen WW

- Analogie zu zwei Teilchen”strömen” (Proton-Neutron / Elektron-Neutrino)



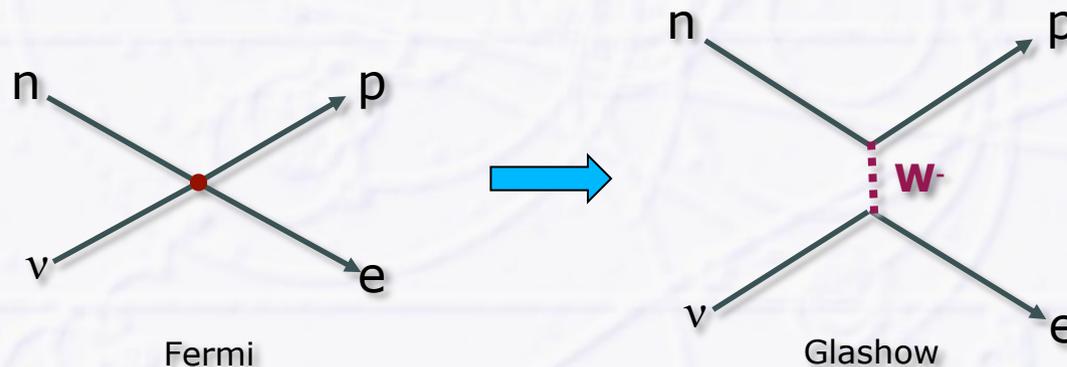
Enrico Fermi
(1901-1954)



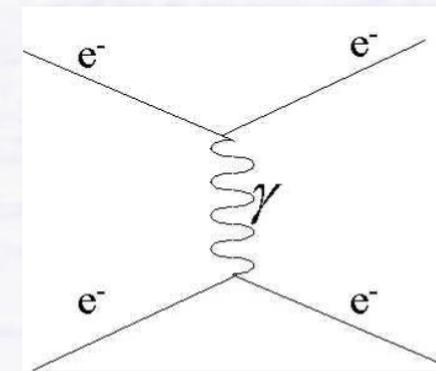
- “Problem” in den 1950er Jahren bei höheren E

- Wahrscheinlichkeit oberhalb 300 GeV > 100% (!)

- Idee von Sheldon Glashow 1958: schwache WW wird durch schwereres Austauschteilchen übertragen



analog zum Photonaustausch der elektro-magnetischen WW

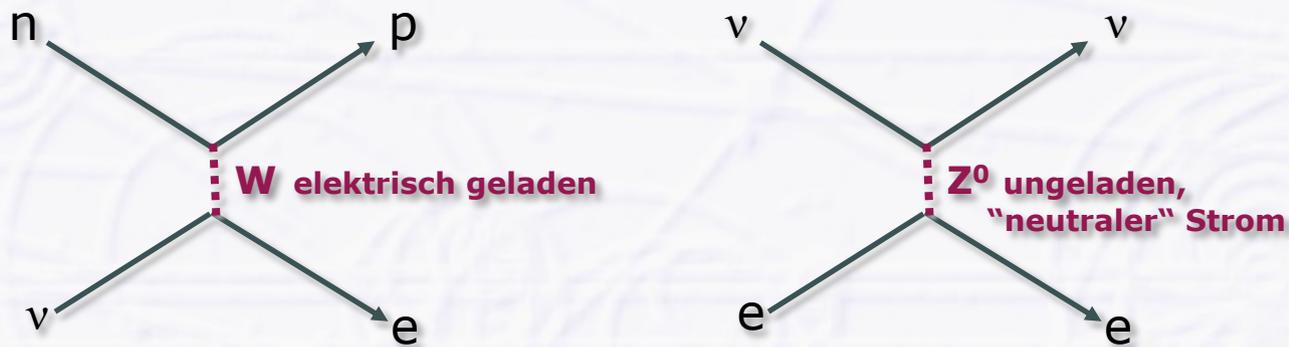


Elektro-schwache Wechselwirkung

● Elektro-magnetische und schwache Wechselwirkung zeigen viele Ähnlichkeiten

→ Vereinigung der elektro-magnetischen und der schwachen Wechselwirkung durch Glashow, Salam, Weinberg 1968

- Elektro-magnetische und schwache WW sind zwei Aspekte der gleichen “elektro-schwachen” Wechselwirkung
- Sowohl Quarks als auch Leptonen besitzen eine “schwache” Ladung



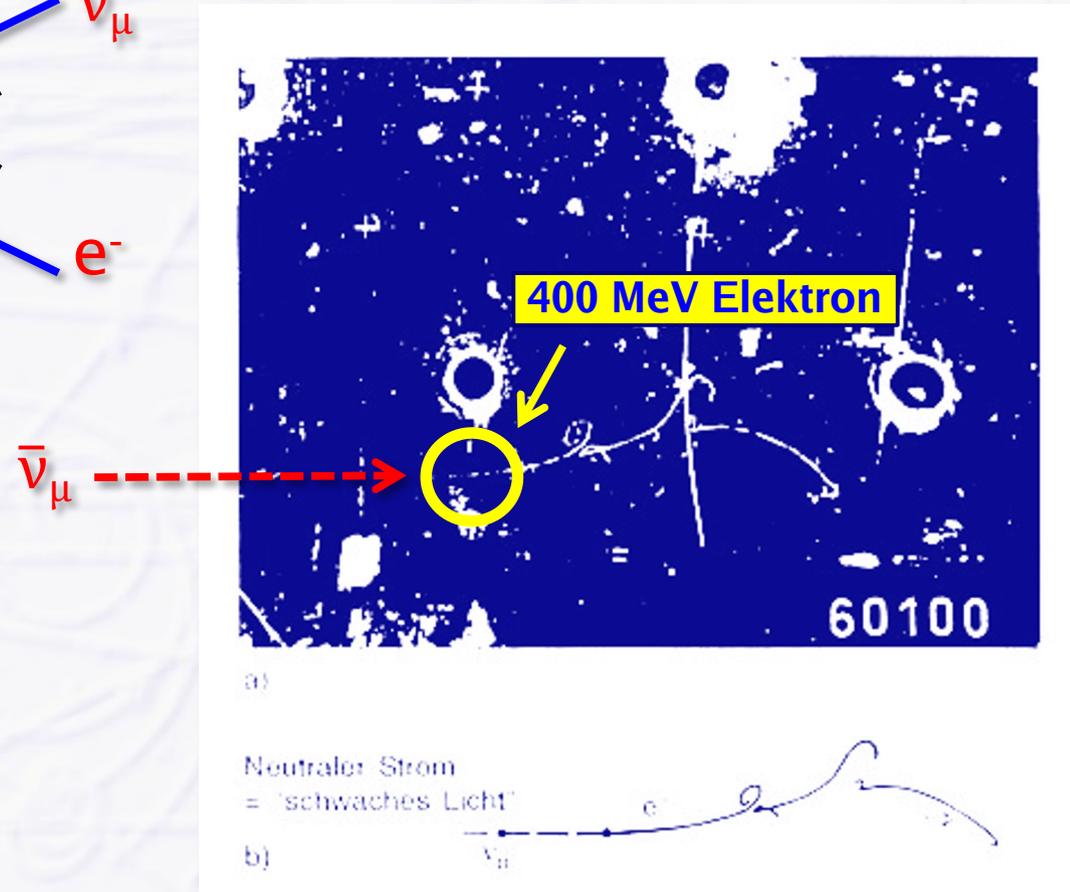
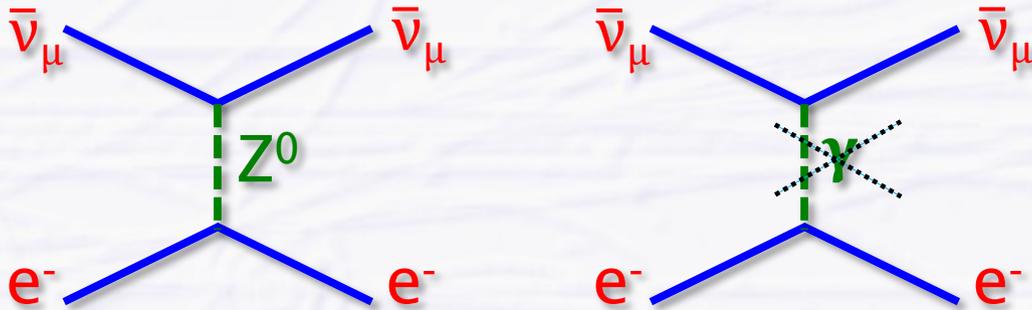
- 2 geladene schwere Austauschteilchen: W^+ , W^-
 - 2 neutrale Austauschteilchen: γ (masselos), Z^0 (schwer)
- W und Z erhalten ihre Masse durch permanente Wechselwirkung mit Higgs-Feld

“Neutrale Ströme”

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

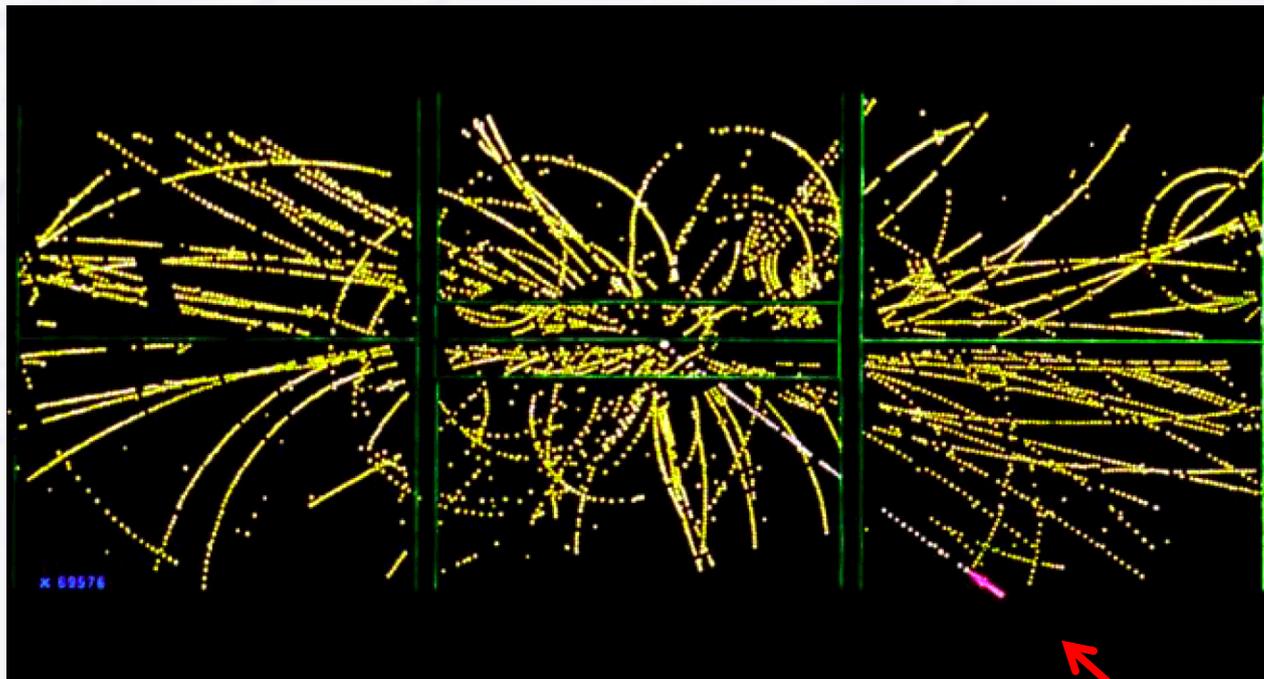
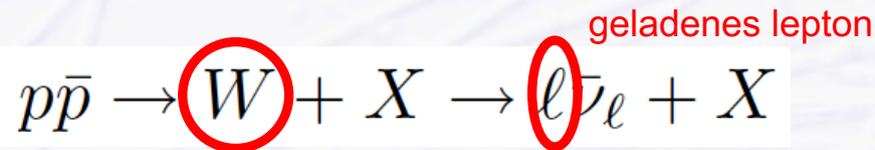
→ elastischer Stoß eines Neutrinos mit einem Elektron der Atomhülle

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



Direkte Entdeckung des W und Z^0

- Sp \bar{p} S 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)

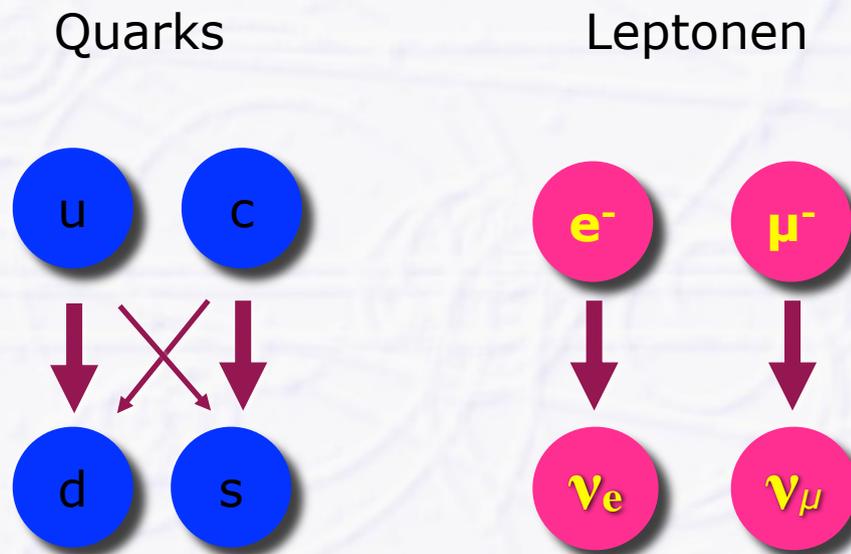


Kollision im
UA1 Spurdetektor

hochenergetisches Elektron

Quarks, Leptonen, Generationen

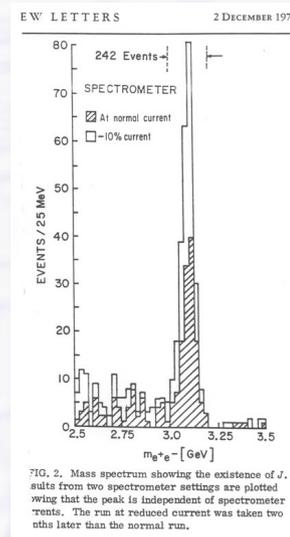
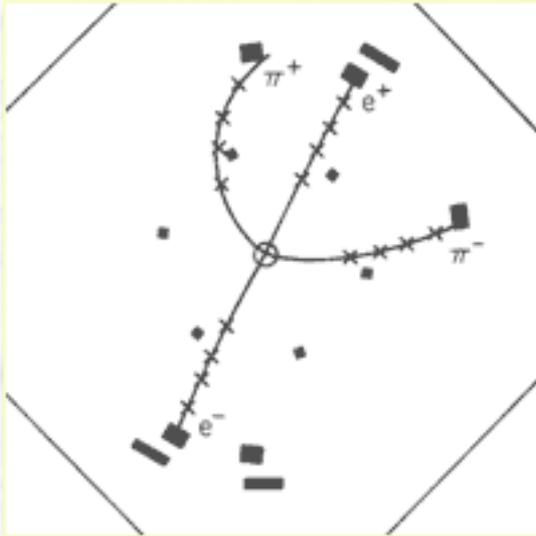
- Bis in die 1960er Jahre waren nur 3 Quarks bekannt
 - Aus Symmetriegründen zwischen Quarks und Leptonen sollte es noch ein **4. Quark** geben!
- Glashow, Iliopoulos, Maiani postulieren 1970 ein **Modell mit 4 Quarks** (3 bekannte + X) und den damals bekannten 4 Leptonen



Charm und mehr...

● November Revolution der Teilchenphysik (11. November 1974)

- **Entdeckung des 4. Quarks** (Charm Quark) gleichzeitig durch 2 unabhängige Gruppen
- Burt Richter (SLAC) → ψ , Sam Ting (Brookhaven) → J



Wegen der gleichzeitigen Entdeckung wurde das Teilchen schliesslich J/ψ genannt

J/ψ = gebundener, langlebiger Zustand eines Charm - Anticharm Quark Paares

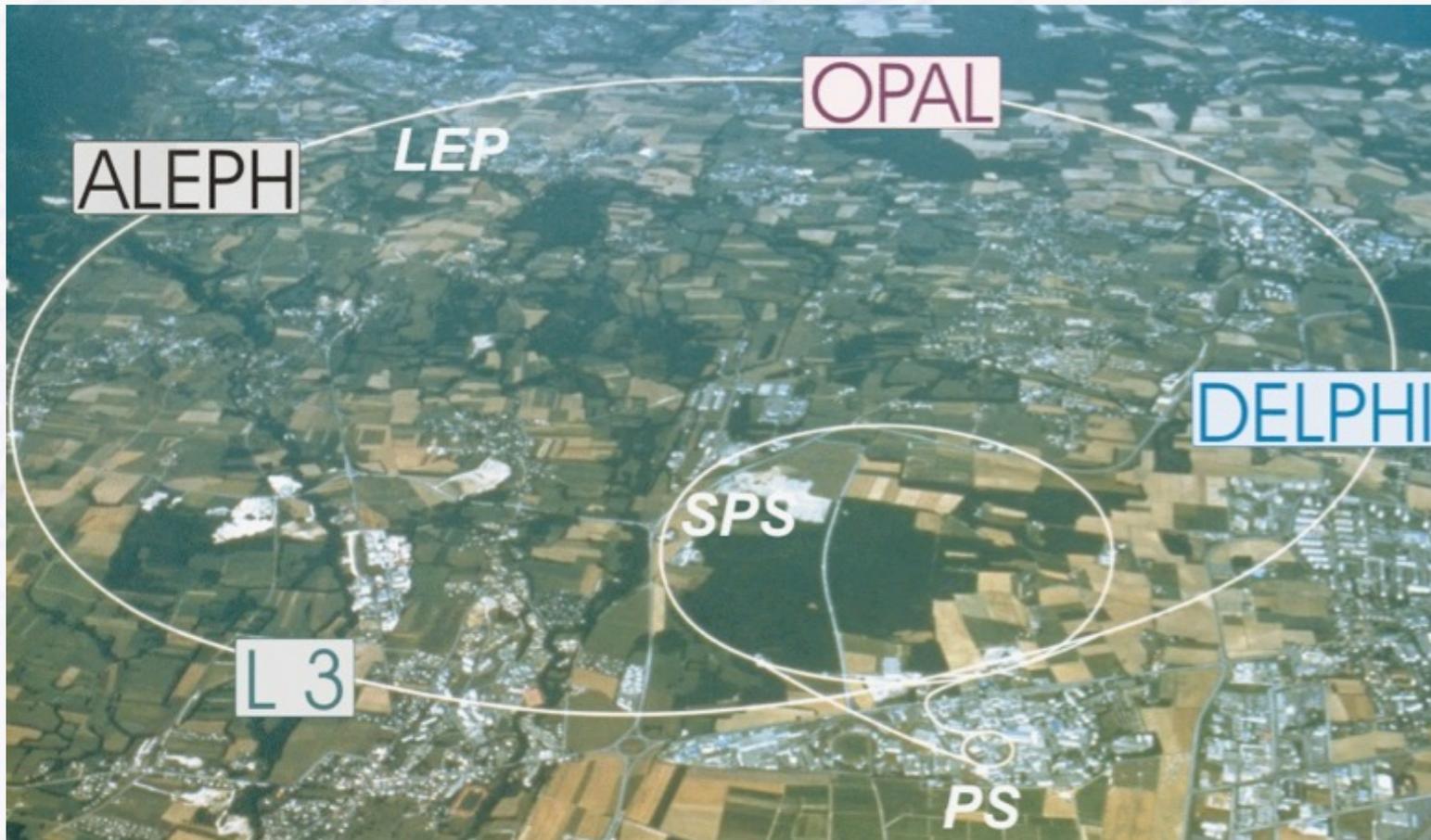
- ...und noch mehr Leptonen und Quarks, **wieviele gibt es noch???**
 - τ Lepton 1975 → es sollte noch ein τ Neutrino und noch 2 weitere Quarks geben
 - b Quark (Bottom oder Beauty Quark) 1977

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 zukünftigen LHC

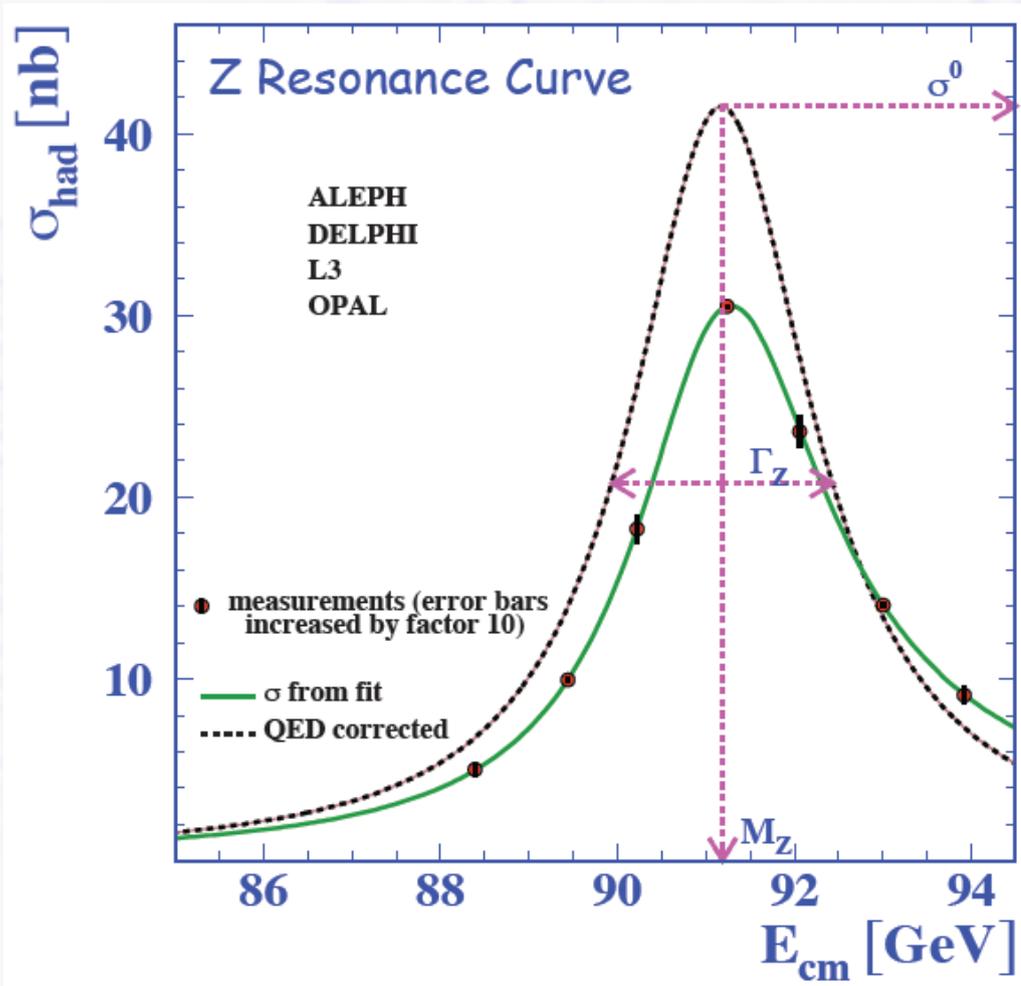


E_{cm} von 90 GeV
bis 200 GeV

4 Experimente

Vermessung der Z^0 Resonanzkurve

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



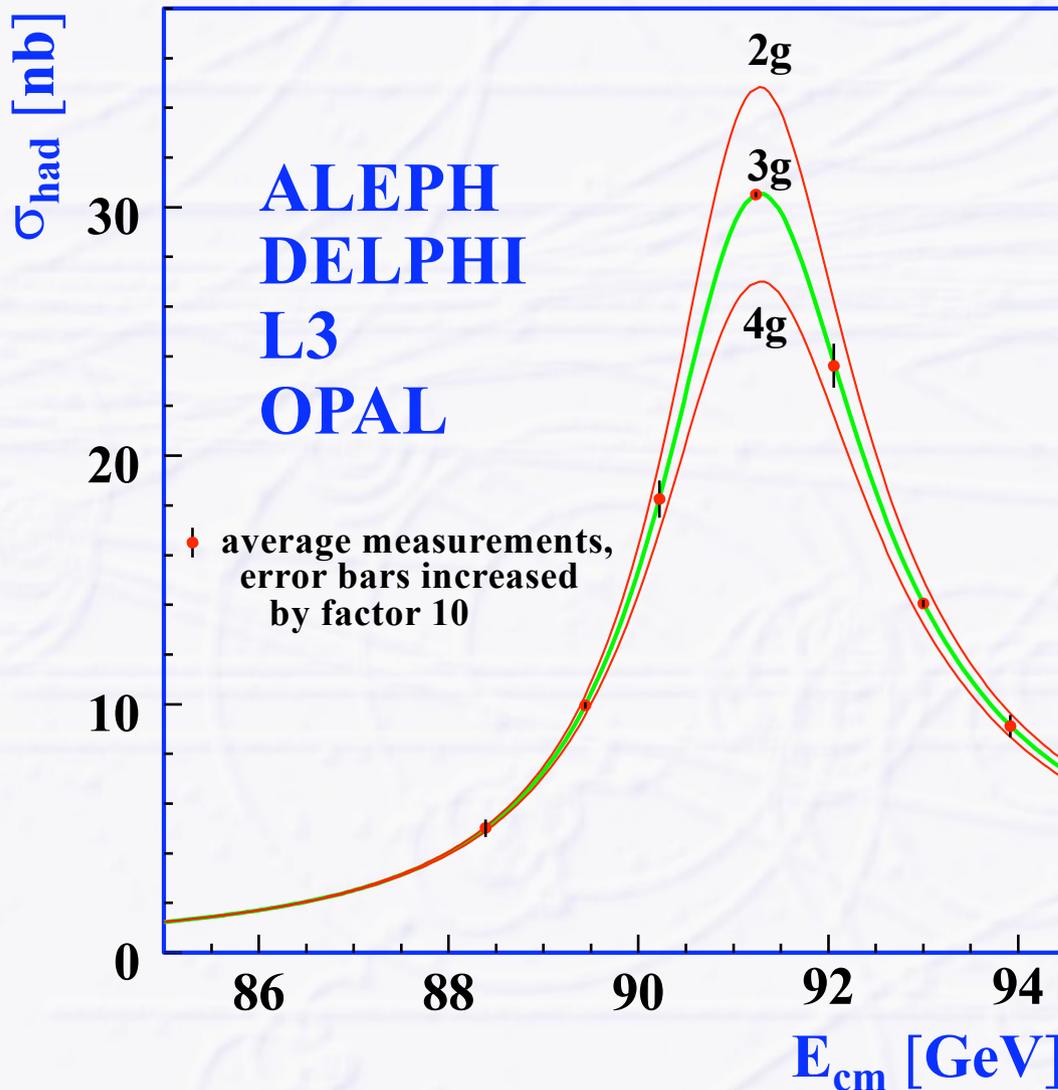
$$\sigma^0(s) \approx 12\pi \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{m_Z^2} \cdot \frac{s}{(s - m_Z^2)^2 + \Gamma_Z^2 m_Z^2}$$

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**



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

Anzahl der leichten(!) neutrino Generationen:

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

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

Übergänge zwischen den Generationen

- Schwache Wechselwirkung erlaubt **Übergänge innerhalb und zwischen den Generationen**

→ **Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix** beschreibt die Übergangsstärken

The diagram illustrates the CKM matrix V_{CKM} with various decay and oscillation examples. The matrix is shown as a 3x3 grid of green squares of varying sizes, representing the magnitudes of the elements. The matrix is defined as:

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

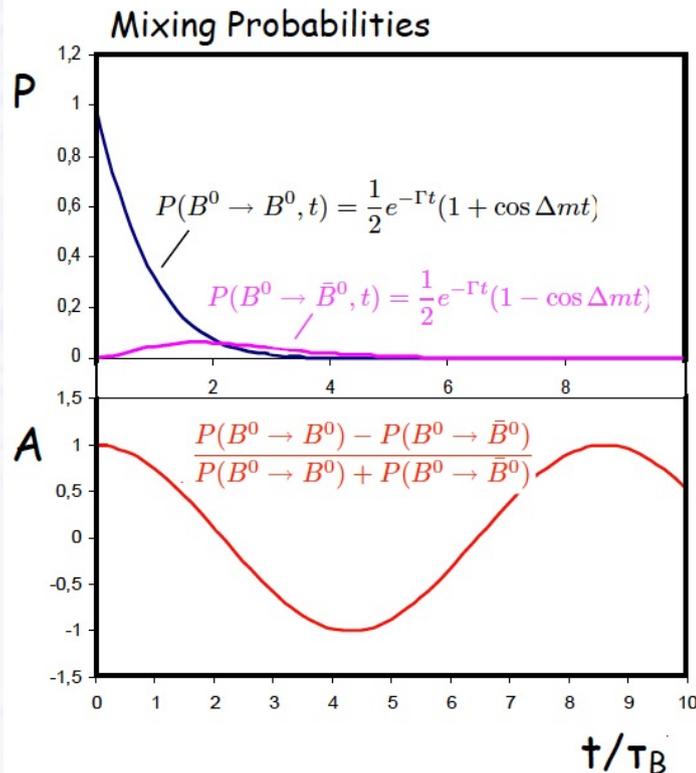
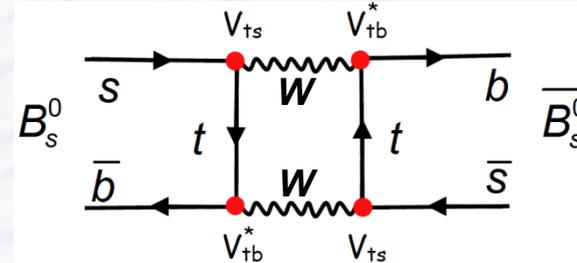
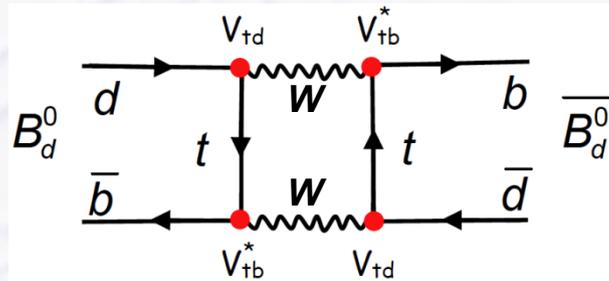
Examples of transitions and processes are indicated by blue arrows and text:

- V_{ud} : e.g. $n \rightarrow p e \nu$
- V_{us} : e.g. $K_L \rightarrow \pi e \nu$
- V_{ub} : e.g. $D \rightarrow K l \nu$
- V_{cb} : e.g. $B \rightarrow \pi l \nu$
- V_{td} : e.g. $D \rightarrow \pi l \nu$
- V_{ts} : e.g. $B \rightarrow D l \nu$
- V_{tb} : e.g. $t \rightarrow W b$
- Bottom elements (V_{td}, V_{ts}, V_{tb}): e.g. BB oscillations

$$\begin{pmatrix} 0.97419 \pm 0.00022 & 0.2257 \pm 0.0010 & 0.00359 \pm 0.00016 \\ 0.2256 \pm 0.0010 & 0.97334 \pm 0.00023 & 0.0415^{+0.0010}_{-0.0011} \\ 0.00874^{+0.00026}_{-0.00037} & 0.0407 \pm 0.0010 & 0.999133^{+0.000044}_{-0.000043} \end{pmatrix}$$

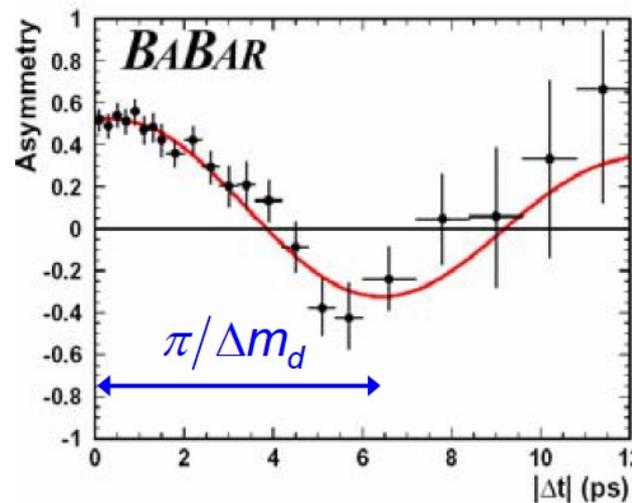
Oszillationen Teilchen/Antiteilchen

- “Box-Diagramme” führen zu zeitlichen Oszillationen von Teilchen zu Antiteilchen und umgekehrt



$$A = \frac{\text{unmixed} - \text{mixed}}{\text{unmixed} + \text{mixed}}$$

$$\Delta m_d = 0.507 \pm 0.005 \text{ ps}^{-1}$$



Randbemerkung:

Aus der Stärke der Oszillation erhielt man vor der Entdeckung des top Quark eine Abschätzung / untere Grenze für die Top Masse

Aufbau der Materie

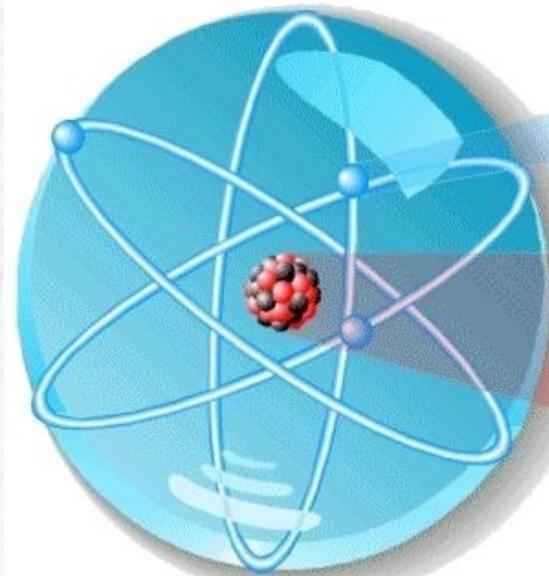
- **Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur**
 - nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

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



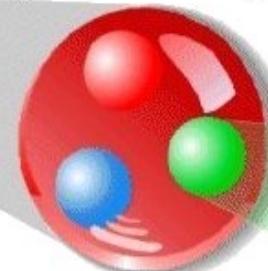
electron
 $< 10^{-16}$ cm



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

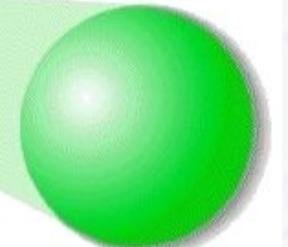
proton
(neutron)

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, 1963

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

Quarks

Leptonen

Überschwere, sehr instabile Materie

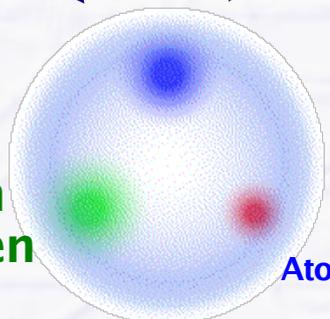
Schwere, instabile Materie

Normale, stabile Materie

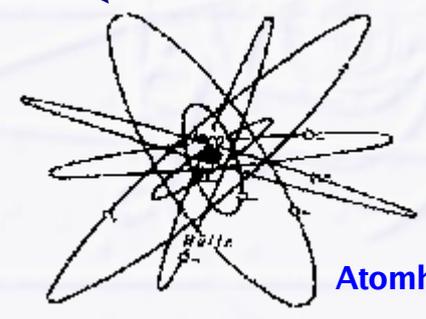
| | Quarks | | Leptonen | |
|--------------|---------|-----------|------------|---------------------------|
| Generation 3 | t Top | b Bottom | τ Tau | ν_τ Tau-neutrino |
| Generation 2 | c Charm | s Strange | μ Muon | ν_μ Muon-neutrino |
| Generation 1 | u Up | d Down | e Electron | ν_e Electron-neutrino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

WIR und alles, was wir um uns sehen!

Protonen
Neutronen



Atomkern



Atomhülle

Wechselwirkungen

● 4 verschiedene (bekannte) Wechselwirkungen (Kräfte)

→ Kraft- oder Austauscheteilchen sind Bosonen

- ganzzahliger Spin (= 1) (Eigendrehimpuls in Einheiten von \hbar)

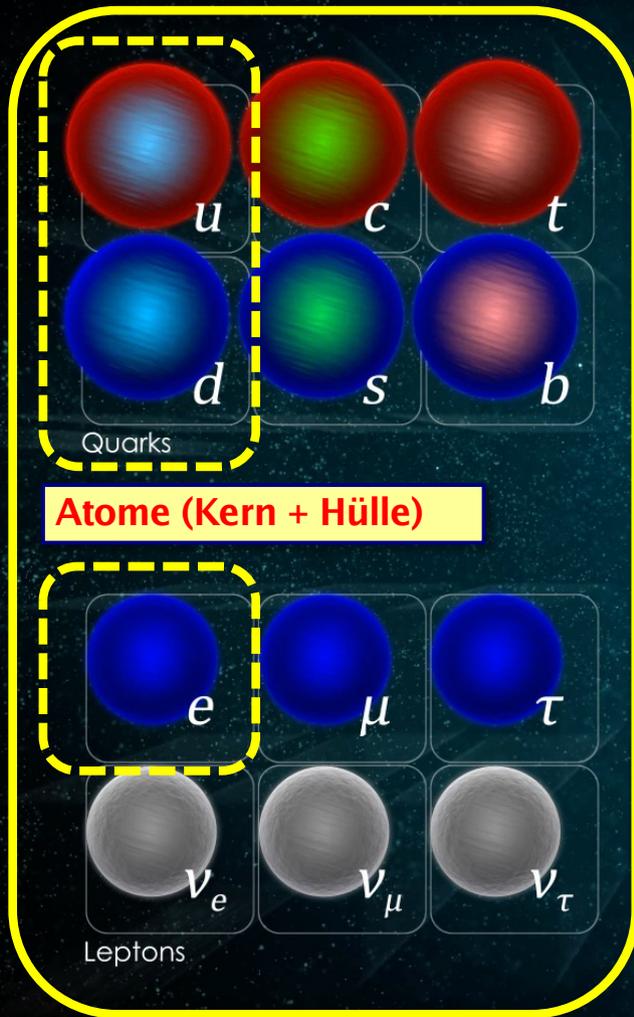
→ Materieteilchen sind Fermionen

- halbzahliger Spin (= $\frac{1}{2}$) = asymmetrische Wellenfunktion
- zwei Materieteilchen im gleichen quantenmechanischen Zustand können nicht gleichzeitig am selben Ort sein (**Pauli-Prinzip**), die Materie kann sich nur deswegen zu Atomen und geräumigeren Strukturen zusammenschließen

| 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^0 | Radioaktivität, Zerfälle |
| Gravitation | 10^{-38} | ∞ | “Graviton” | Schwerkraft |

Das Standardmodell auf einen Blick

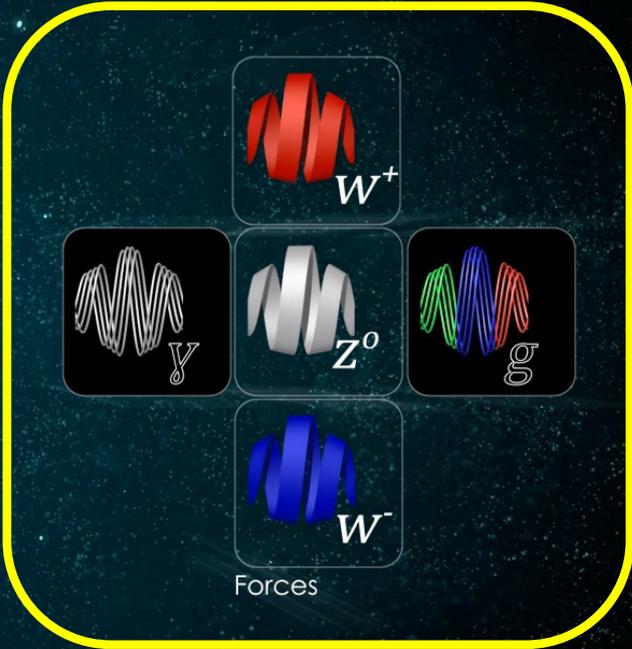
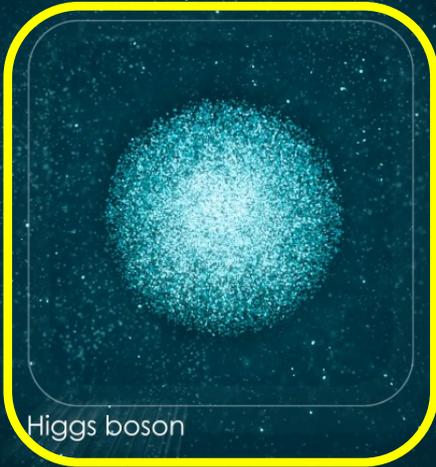
- Entwickelt seit den 1960er Jahren



Atome (Kern + Hülle)

Materie (Materieteilchen)

Masse (Higgs)



Wechselwirkungen (Kraftteilchen)



ING SCIENCE

Higgs & Co.

**Higgs für Dummies,
Higgs Jagd (vor dem LHC)**

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

$$\begin{aligned} B_\mu &= A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1), \\ G_{\mu\nu} &= \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (3)$$

into the form

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

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. **134**, 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

Brout-Englert-Higgs Mechanismus

- **Brout-Englert-Higgs (BEH) Mechanismus wurde inspiriert durch Festkörperphysik**
 - **Meißner-Ochsenfeld Effekt erklärt durch Ginzburg-Landau 1950**
 - exponentieller Abfall eines externen Magnetfeldes in einem Supraleiter (Eindringtiefe) ist äquivalent mit dem BEH Mechanismus
 - Magnetfeld erhält “effektive Masse” im Superleiter
 - **Anwendung auf Teilchenphysik (nicht-relativistisch) zuerst vorgeschlagen 1962 durch Philip W. Anderson (Festkörper Physiker)**
 - **Volle relativistische Theorie 1964 durch Brout, Englert, Higgs, und später durch Guralnik, Hagen, Kibble**
- **Eichsymmetrien erklären die Entstehung von starker und elektro-schwacher Wechselwirkung**
 - **verbieten aber massive Austauscheteilchen (Vektorbosonen W^+ , W^- , Z^0)**
 - **Eichsymmetrien können aber spontan gebrochen (BEH Mechanismus)**
 - **Konsequenz: Vektorboson als Kraftteilchen erhalten Masse**

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**

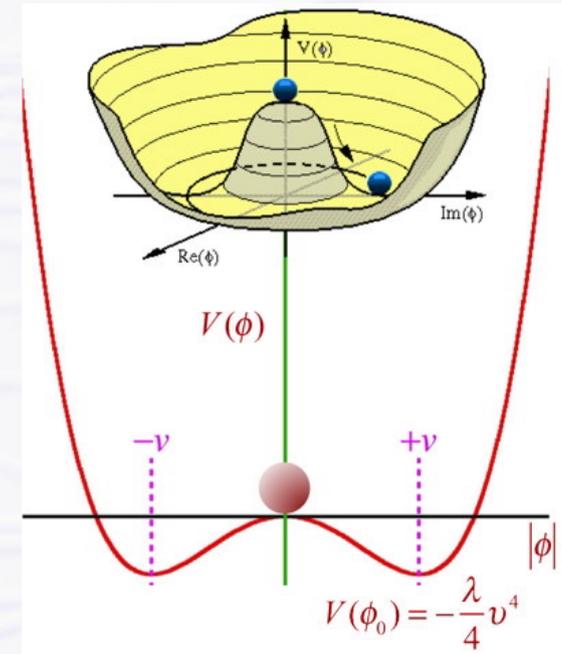
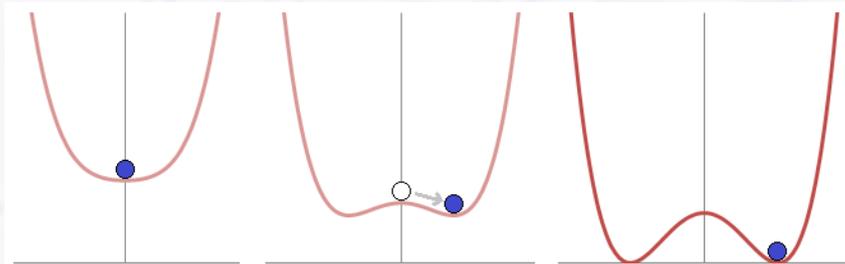
$$V(\Phi) = +\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$

Φ ist komplex
(2 x 2 Komponenten)

- **Sombbrero-artige Form (“Mexikanischer Hut“)**

- **Entstehung unmittelbar nach dem Urknall**

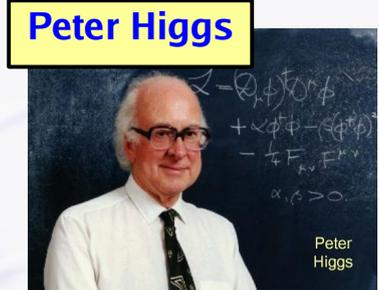
| | | |
|--|--------|--|
| heiss | kühler | kalt |
| $(E > 10^{15} \text{ GeV}, T > 10^{30} \text{ K})$ | | $(E < 10^{14} \text{ GeV}, T < 10^{29} \text{ K})$ |



↑ ↑

Minimum bei $|\Phi| = v (\neq 0 !)$
= Vakuumenergie des Higgs-Feldes

Higgs-Feld → Masse



- **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**

- **Wie entsteht die Masse?**

- **Das Vakuum ist nie leer, sondern immer erfüllt mit einem Higgs-Feld**

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

- **zunächst masselose Teilchen ($v = c$) wechselwirken ständig mit dem Higgs-Feld**

- Wechselwirkung verursacht “Trägheit” ($v < c$): Teilchen erhält träge Masse

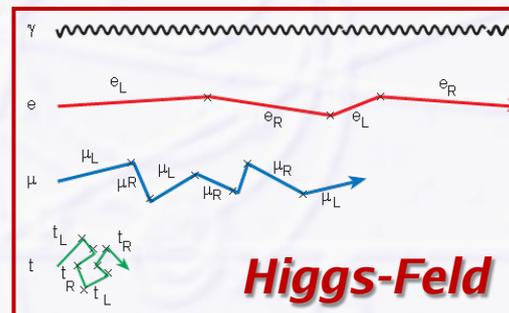
- träge Masse: $F = m_{\text{träge}} \cdot a$, schwere Masse: $F = G \cdot (m_{\text{schwer},1} \cdot m_{\text{schwer},2}) / r^2$

keine Masse: Photon $v = c$

geringe Masse: Elektron $v < c$

mittelschwere Masse: Myon $v \ll c$

sehr schwere Masse: Top-Quark $v \lll c$



$$m_{\text{träge}} = m_{\text{schwer}}$$

(experimentell bestätigt auf $< 10^{-12}$)

BEH Mechanismus: Analogien I

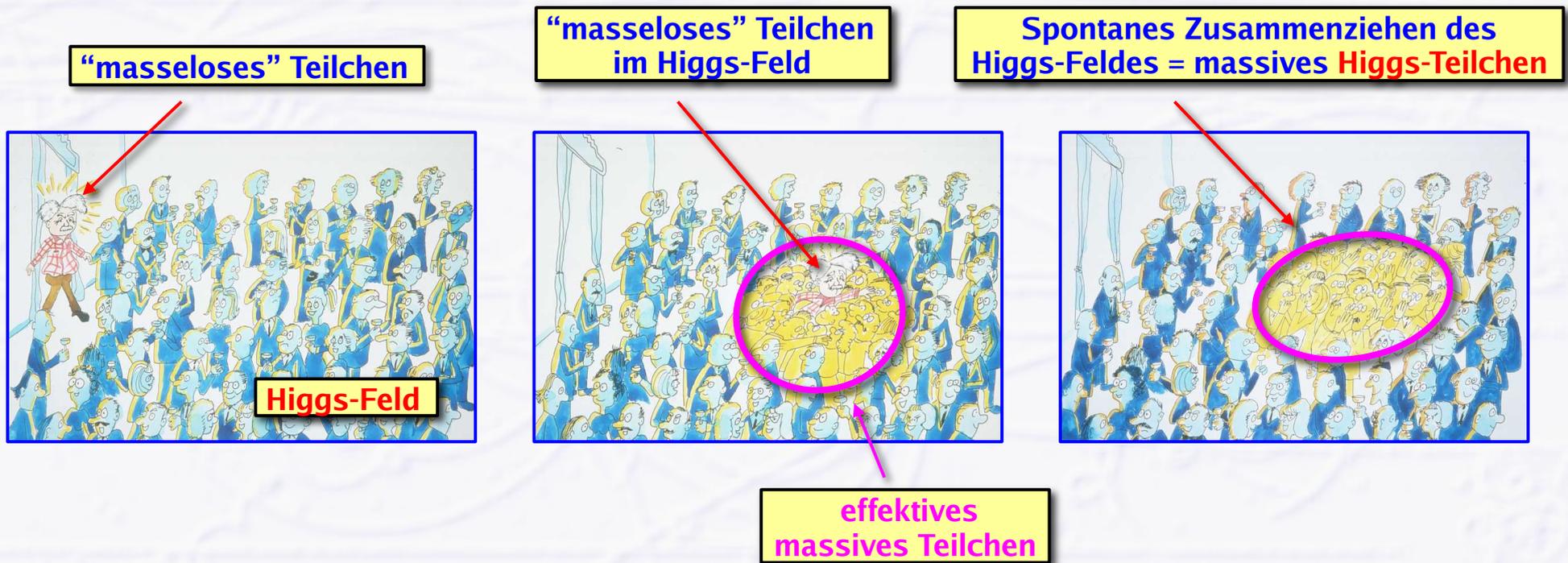
● Alternatives Bild: Higgs-Feld als zähe Flüssigkeit

- 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)**



Higgs-Mechanismus: Analogien II

- **Dave 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)**



Analogien III: Higgs-Feld \rightarrow Higgs-Teilchen

- Higgs-Feld = Wasserfläche, Higgs-Teilchen = Wassertropfen

Higgs-Feld
(ungestört)

Higgs-Teilchen
(kurzlebig)

Zerfall
(am Kollisionspunkt)

Anregung
(Kollision im LHC)

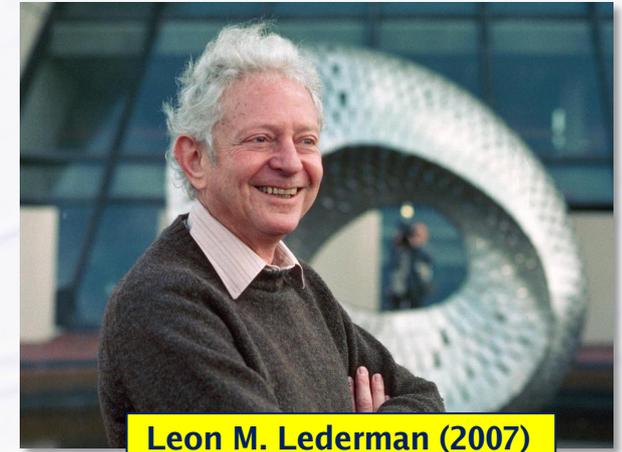
Nachweis
(durch ausgehende Wellen/Teilchen)

[Credits: stepvideolabs \(2014\)](#)

“Das Gottesteilchen”

- **“erfunden” von Leon M. Lederman**

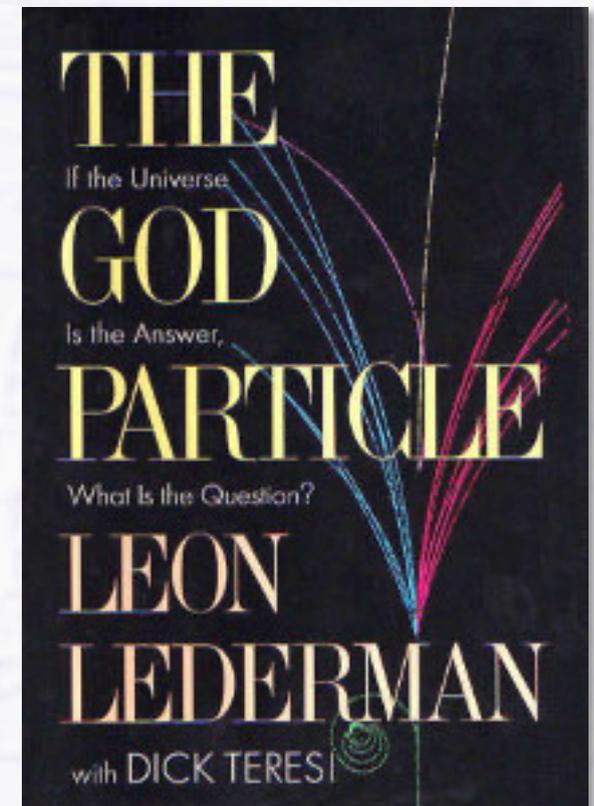
- geboren 1922, früherer Fermilab Direktor
- Nobelpreis 1988 (mit Melvin Schwartz und Jack Steinberger) für die Entdeckung des Myon Neutrinos 1962



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

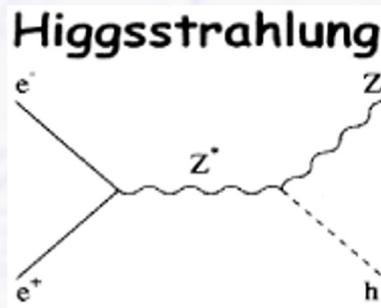
- und gab dem Higgs Boson den Spitznamen **“Das Gottesteilchen”**

- 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."



1990er Jahre: LEP Higgs Hunting

- Erwartete Higgs Erzeugung bei LEP über “Higgsstrahlung”



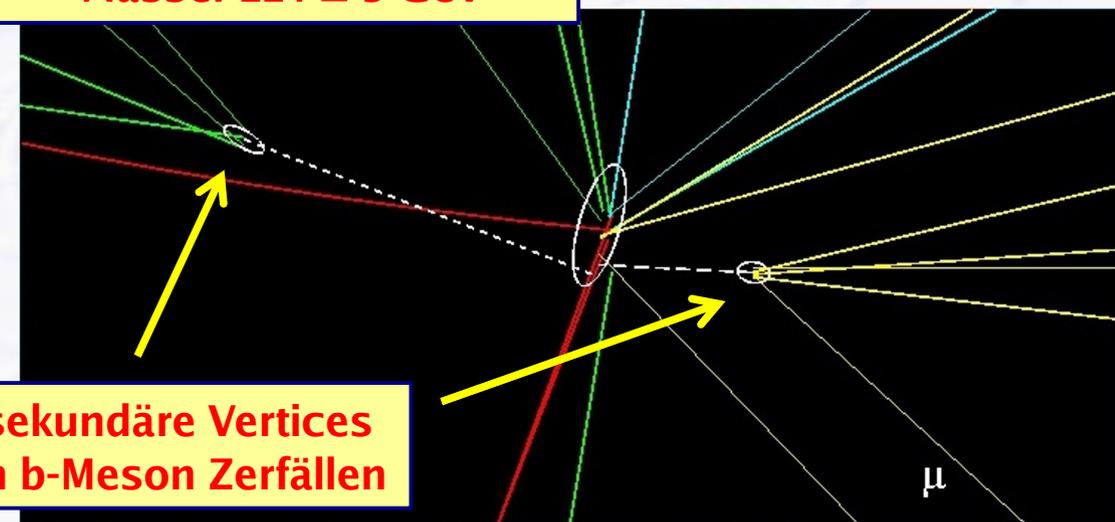
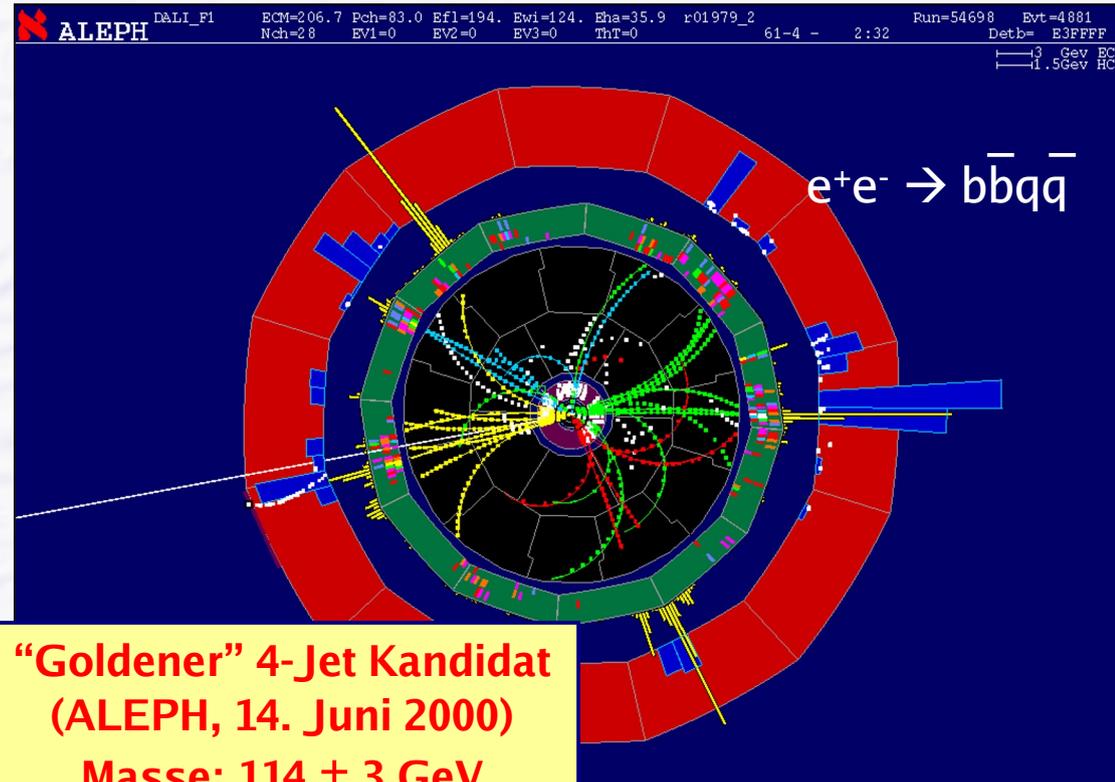
- Zerfall von Z^0 und Higgs

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

$H \rightarrow b\bar{b}$ (2 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"!!!

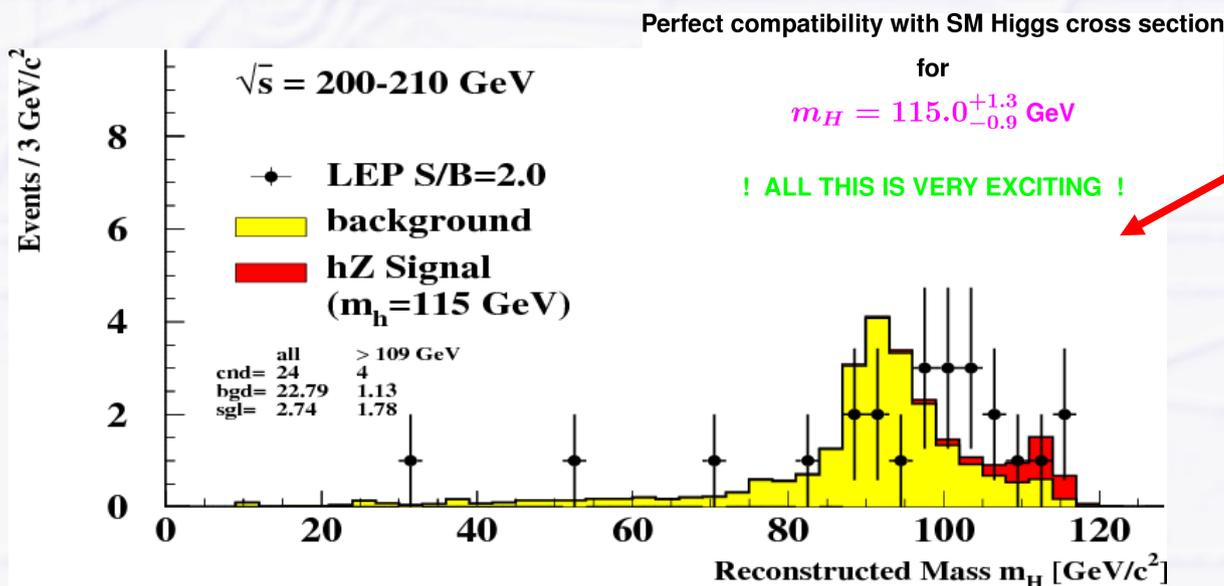
> 3 σ : "evidence for..." (Flüge nach Stockholm checken...)

> 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...

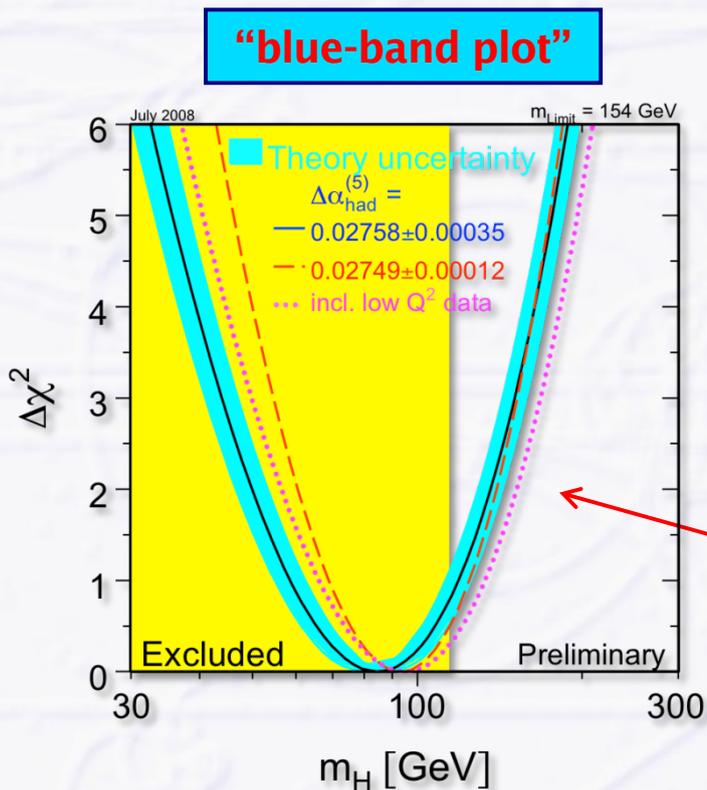
NEIN



LEP Higgs Ergebnisse

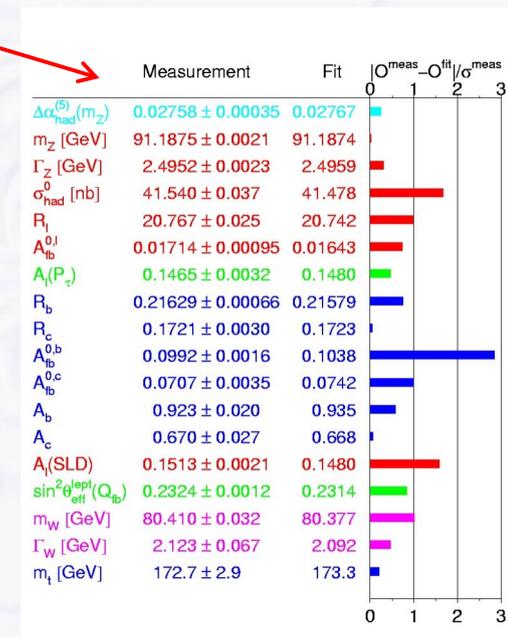
LEP Ausschlußgrenzen vor Start des LHC

- $M_{\text{Higgs}} > 114.4 \text{ GeV}$ (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}

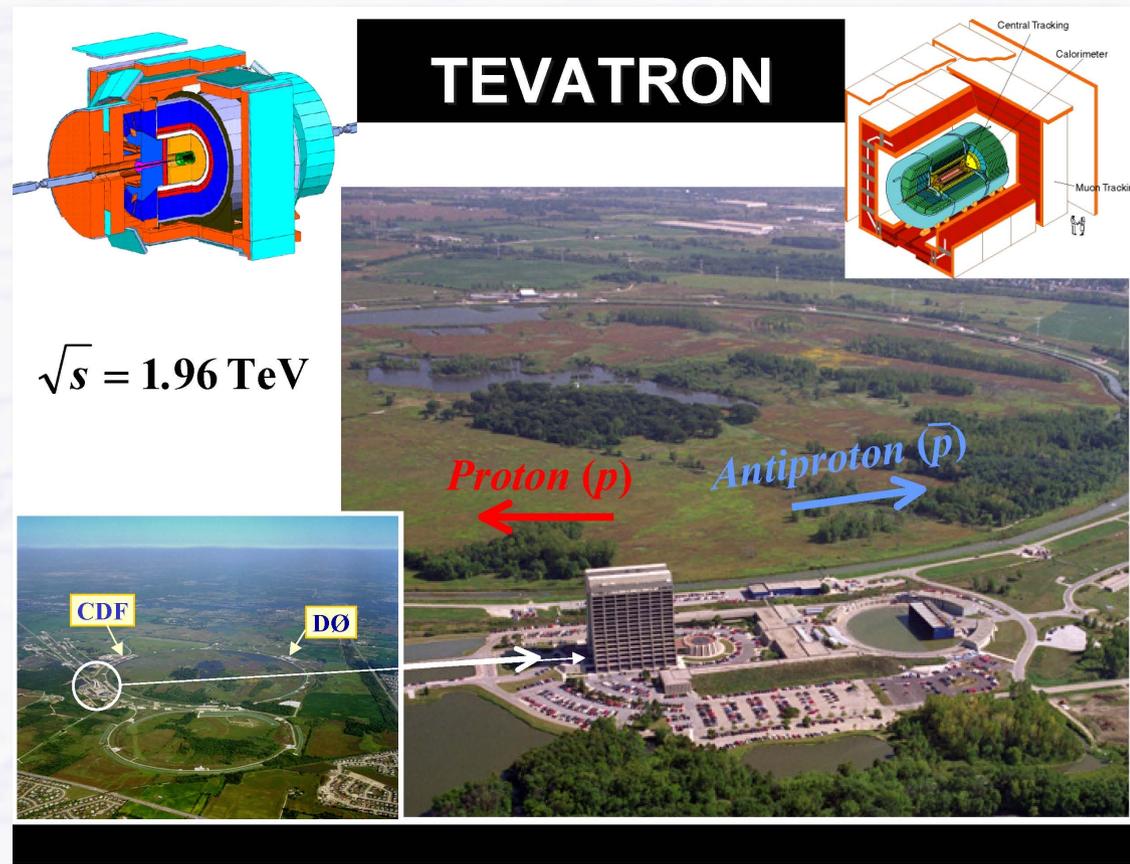


Tevatron übernimmt von LEP

- Nach Ende von LEP, weitere Higgs Jagd in USA
- Tevatron collider am Fermilab (FNAL, 50 km westlich Chicago)
- Protonen und Antiprotonen Kollisionen bei 2×0.98 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



2000er Jahre: 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

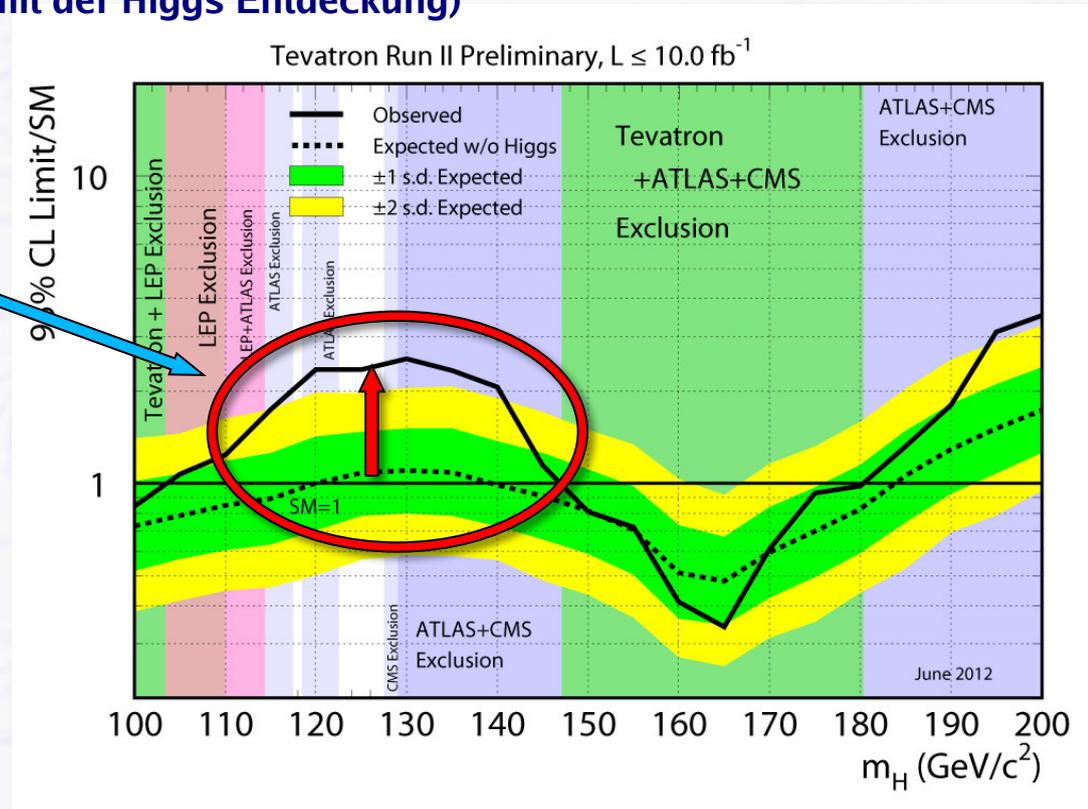
(2 Tage vor dem historischen CERN Seminar mit der Higgs Entdeckung)

→ 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



Higgs Jagd am LHC

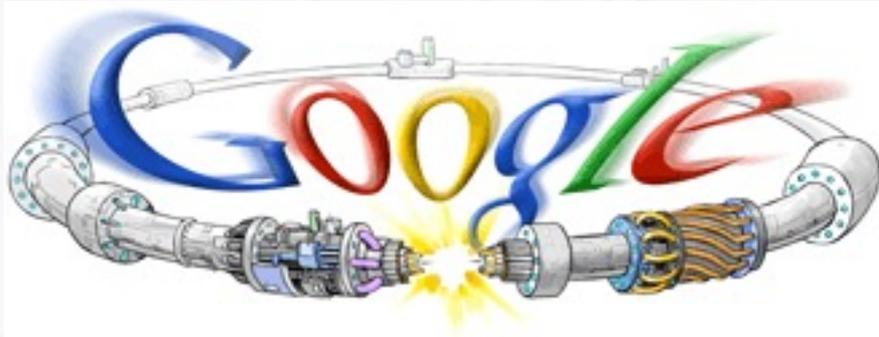
“Where the Higgs was found!”

“Erstes Higgs” am LHC (4. April 2008)



Peter Higgs vor dem ATLAS Detektor

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



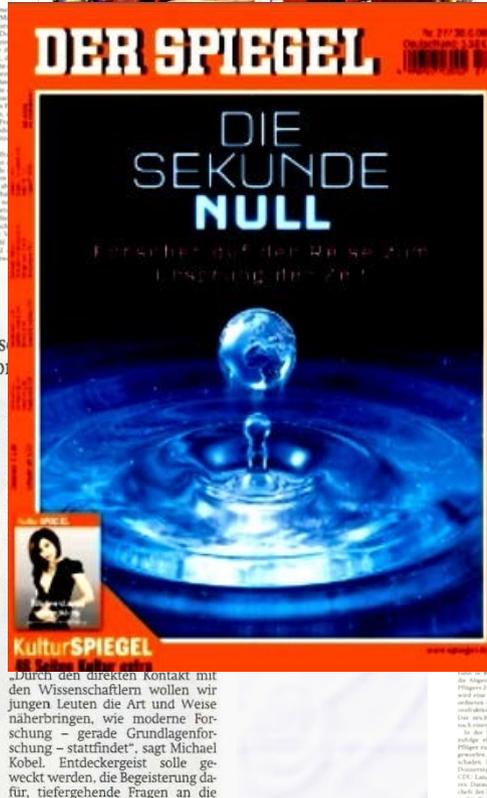
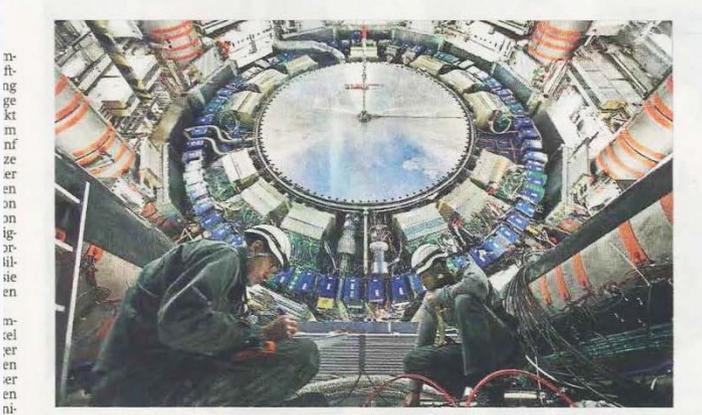
CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)



LHC Start in deutschen Medien



...gab es die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“, dem Teilchenbeschleuniger am Forschungszentrum Cern bei Genf in bislang unbeobachtete Region...



Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie

ATLAS Kontrollraum



Higgs-Teilchen Produktion und Zerfall

● Indirekter Nachweis des Higgs-Feldes durch Higgs-Teilchen

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

● Higgs-Teilchen Produktion + Zerfälle sind berechenbar

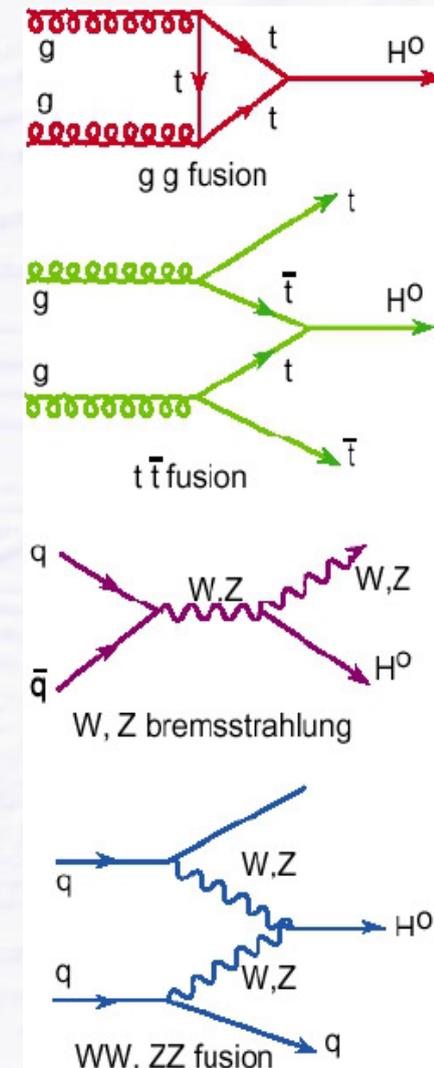
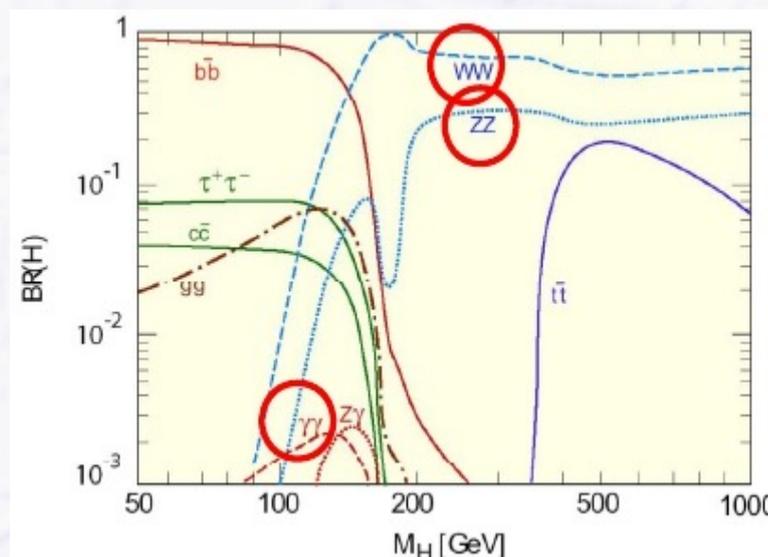
→ nur abhängig von der (zunächst unbekannt) Masse

→ 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 am LHC

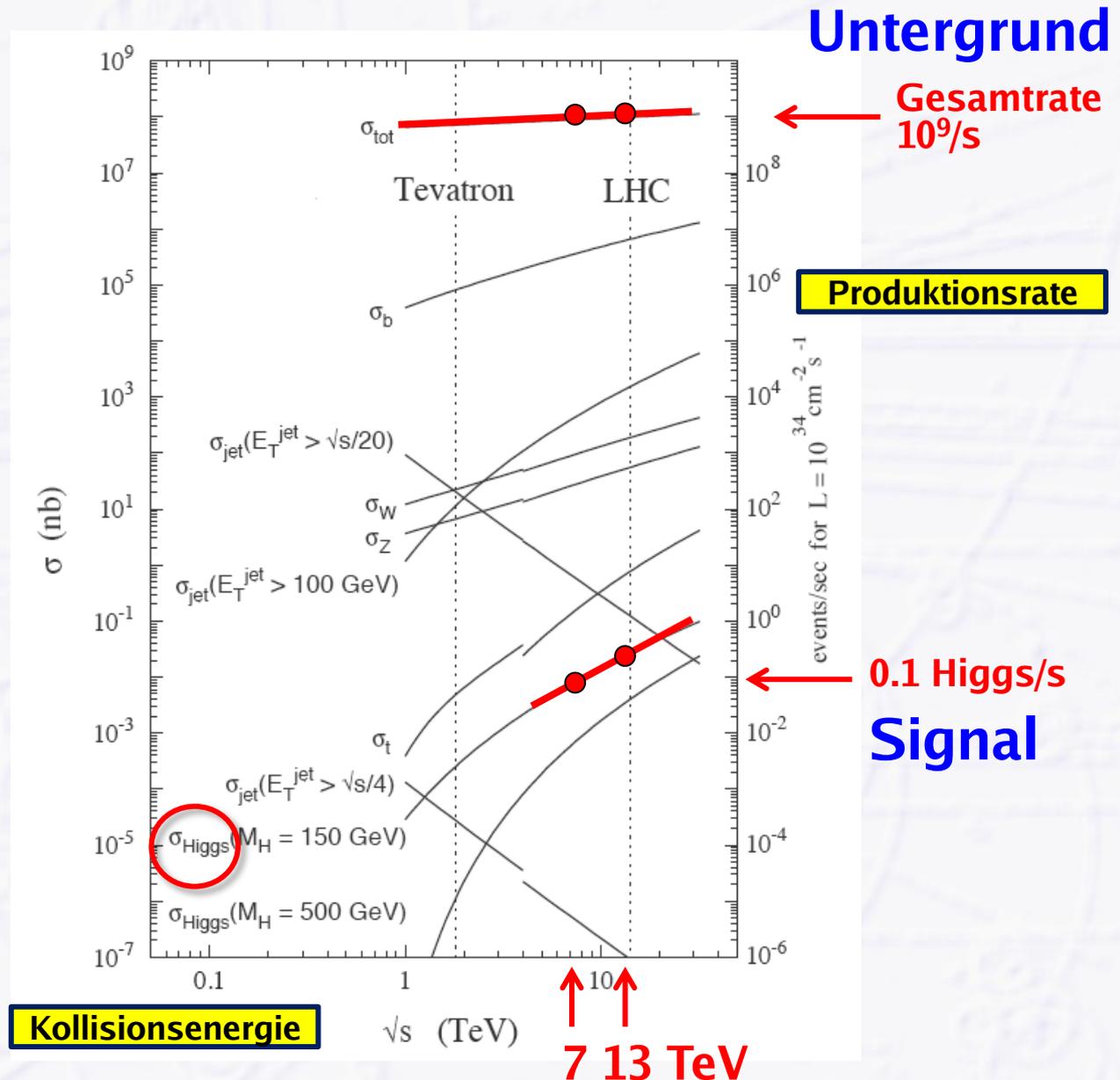
- Produktionsrate:
~100 Higgs-Teilchen pro Stunde

→ 2010 - 2012 wurden ca. **300'000 Higgs-Teilchen bei ATLAS und CMS produziert**

- **ABER: Higgs-Teilchen zerfallen sehr schnell**
(Zerfallszeit 1.56×10^{-22} s)

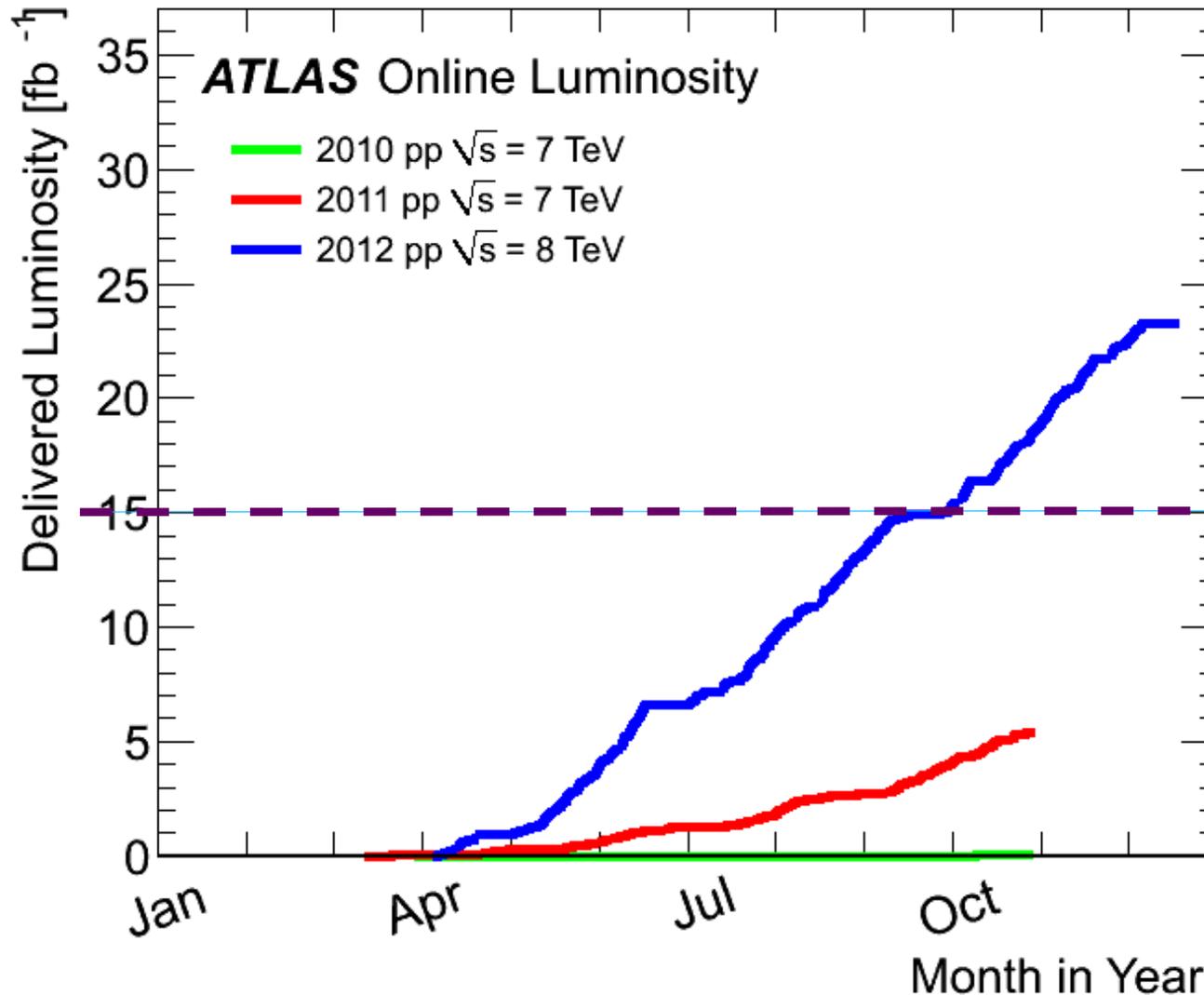
○ nur wenige (seltene) Zerfallskanäle eignen sich zum Nachweis

- **nur ~1'000 Higgs-Teilchen wurden nachgewiesen**



Entwicklung der LHC Luminosität

- LHC Start im März 2010 mit hochenergetischen pp Kollisionen



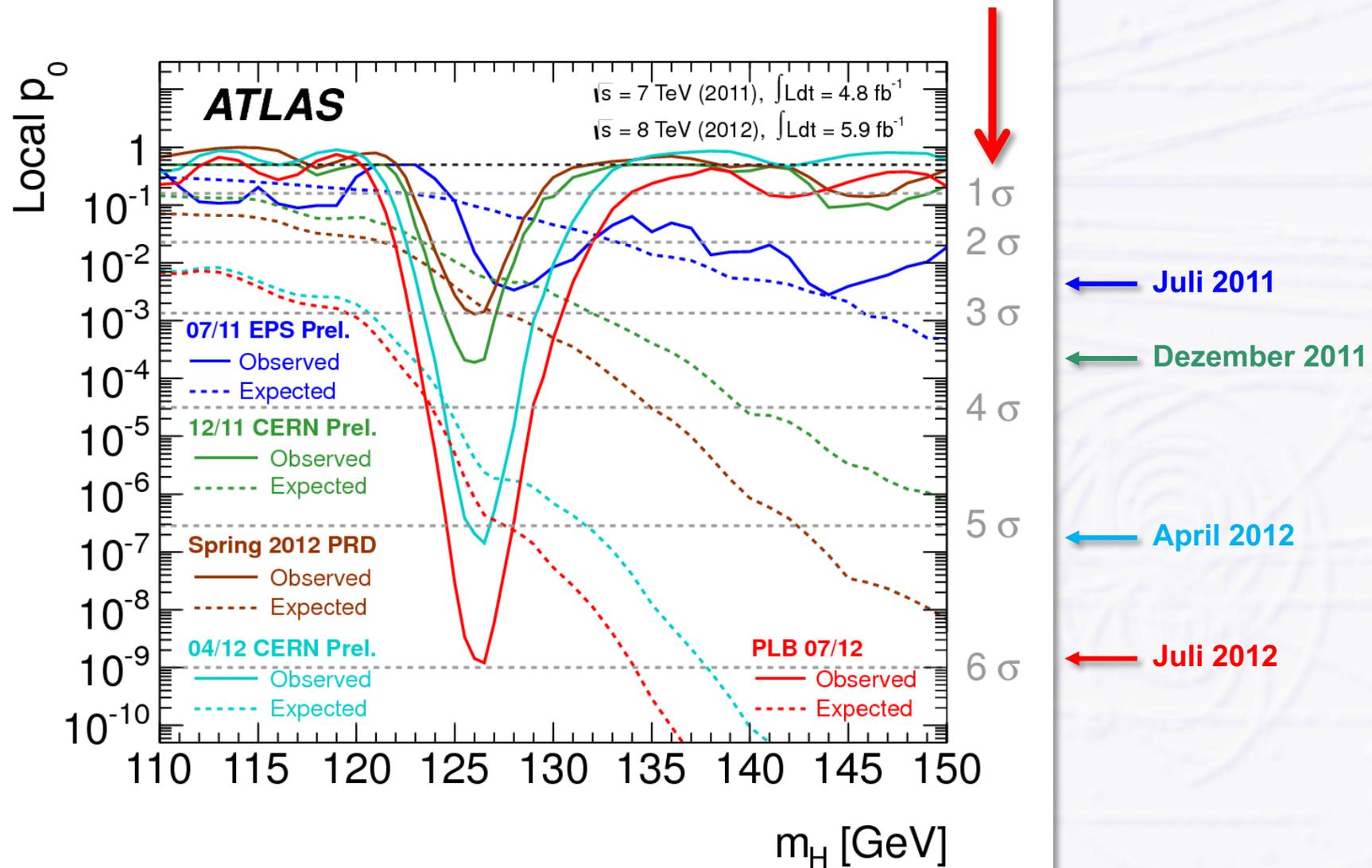
Ziel für 2012

← 4. Juli 2012

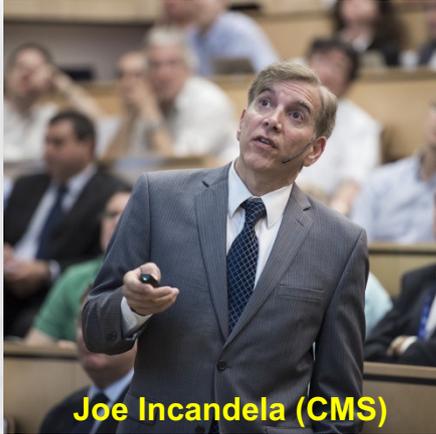
Der Weg zur Entdeckung

● Erste Hinweise auf "etwas" bei ~125 GeV Masse im Juli 2011

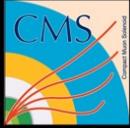
→ statistische Signifikanz wächst über >ein Jahr stetig an



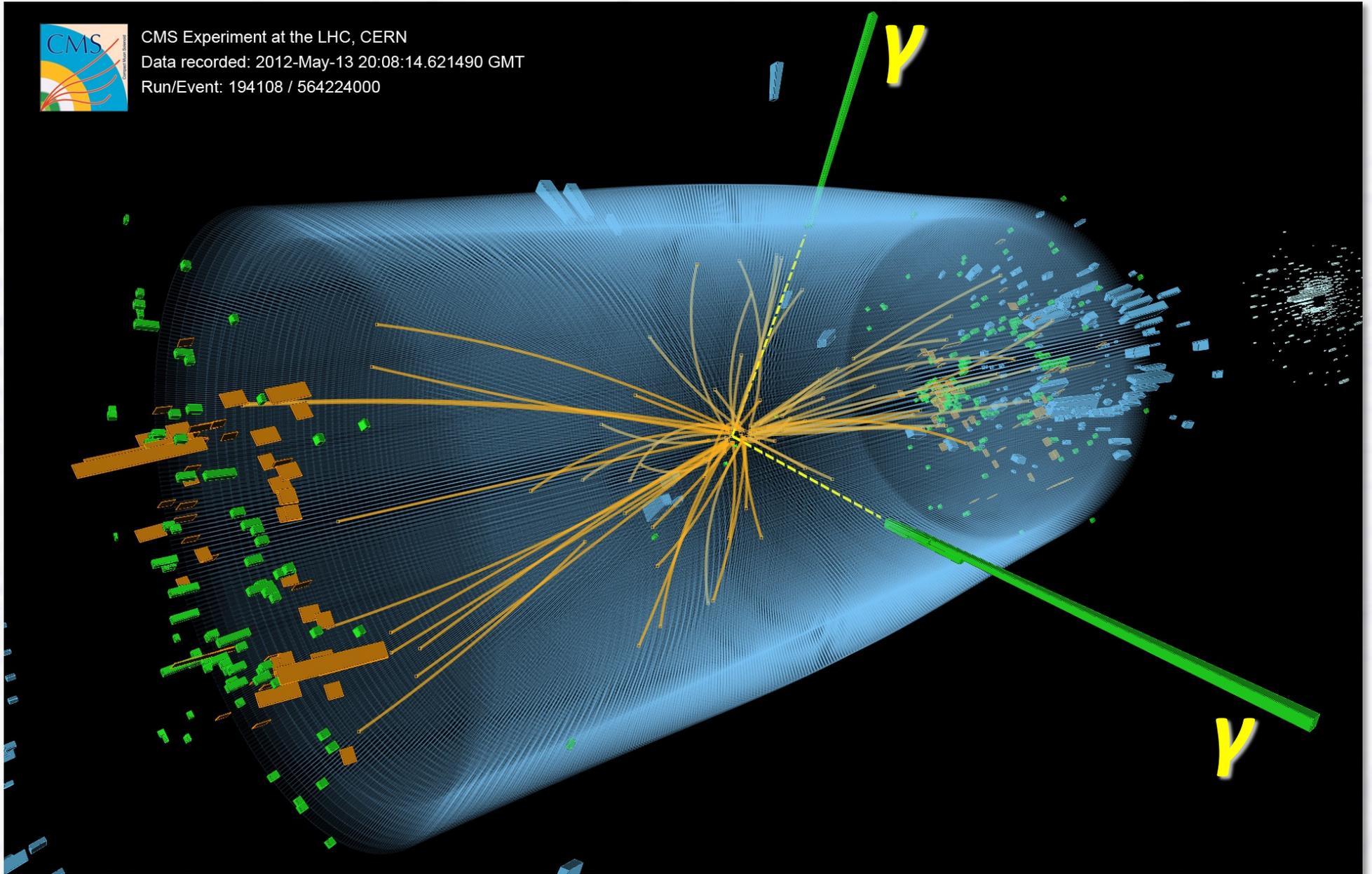
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



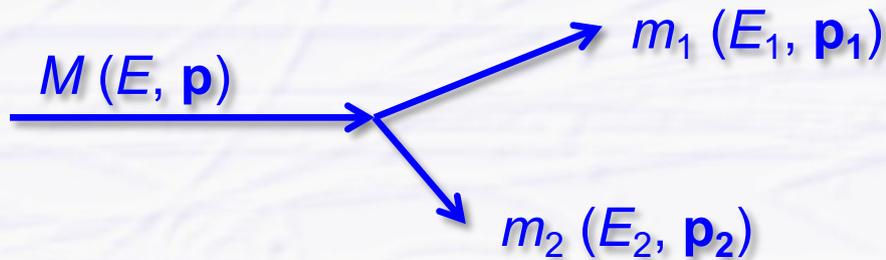
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Wie misst man Teilchenmassen?

- 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: $H \rightarrow \gamma \gamma$

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

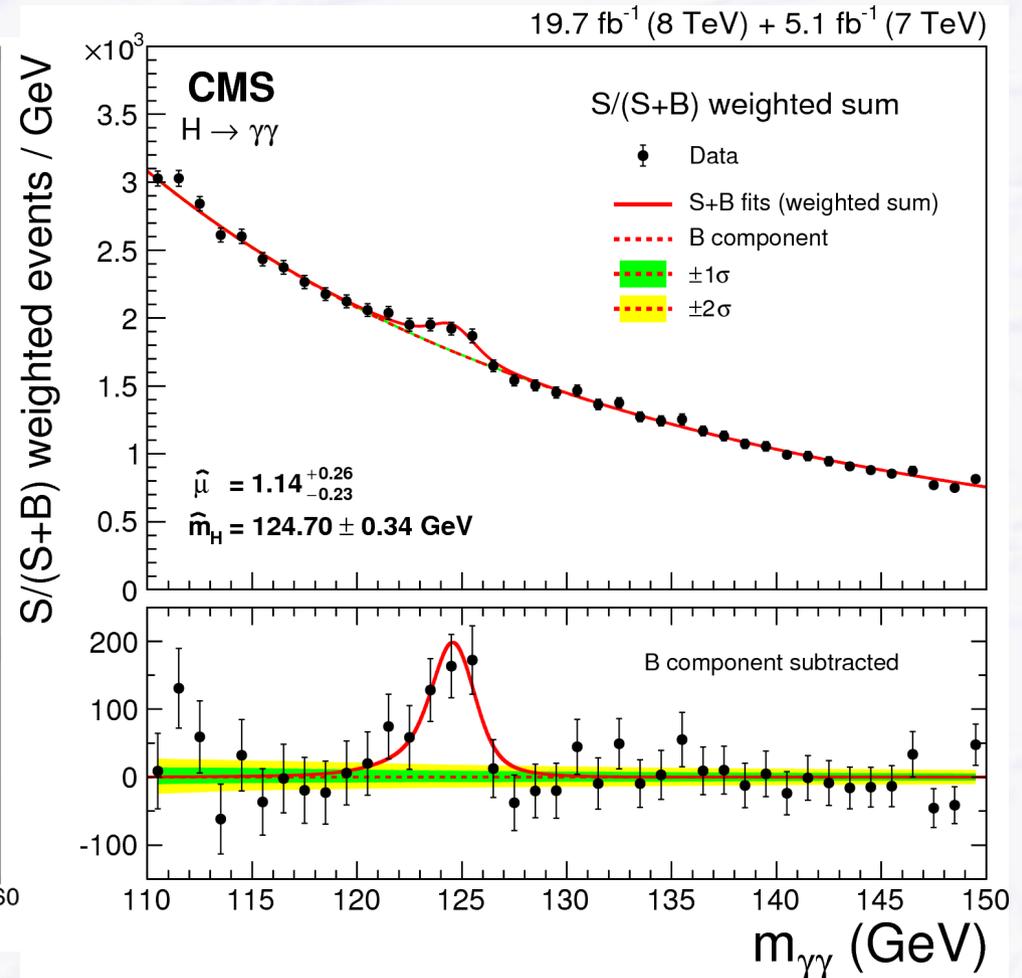
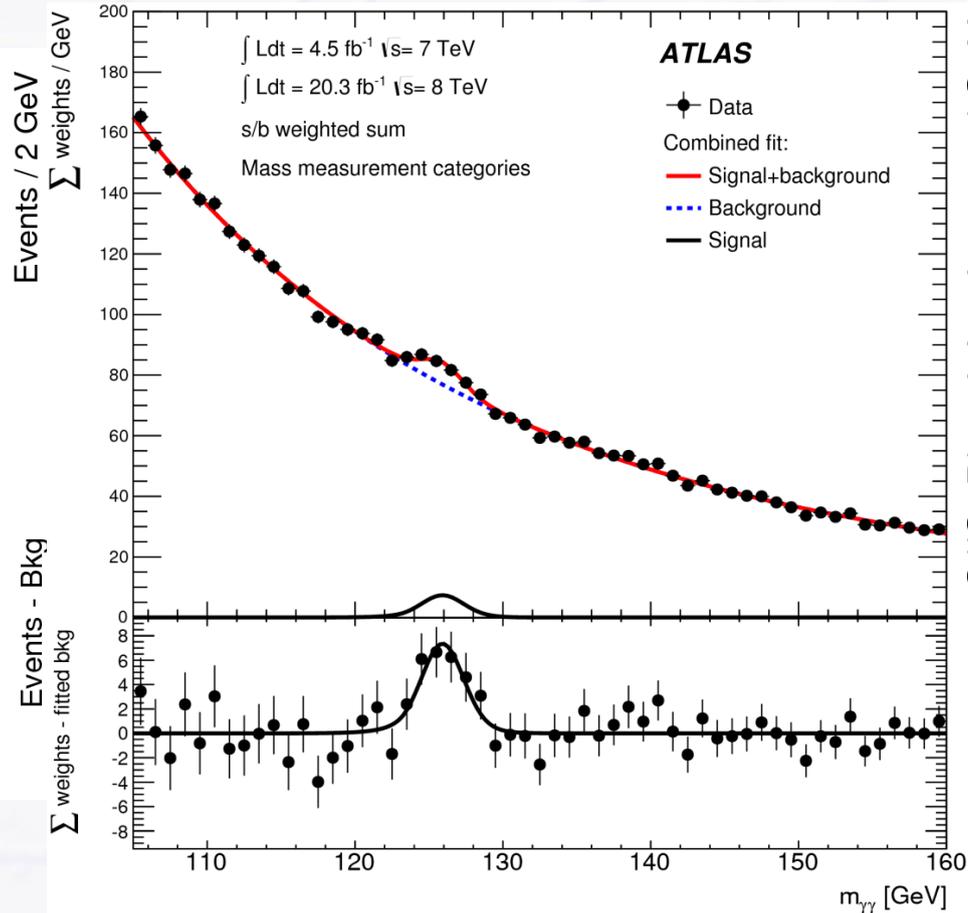
- **Messung der Higgsmasse aus Photonimpulsen + Winkel**

$H \rightarrow \gamma\gamma$

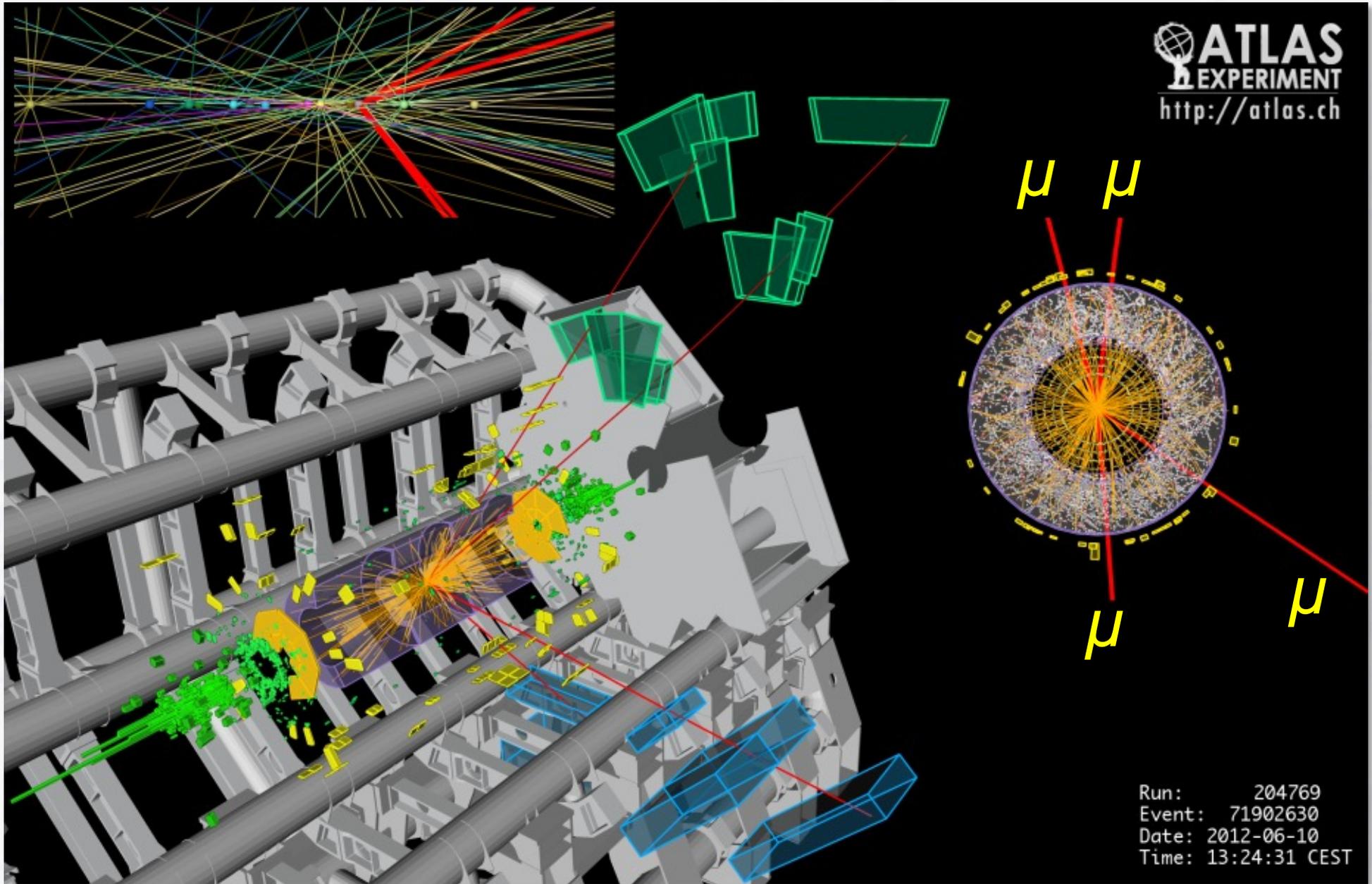
- **Bester Zerfallskanal für $M_H < 120$ GeV**
- ➔ **zweitbester Zerfallskanal für $120 < M_H < 130$ GeV**

Stand: 16. Juni 2014

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



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

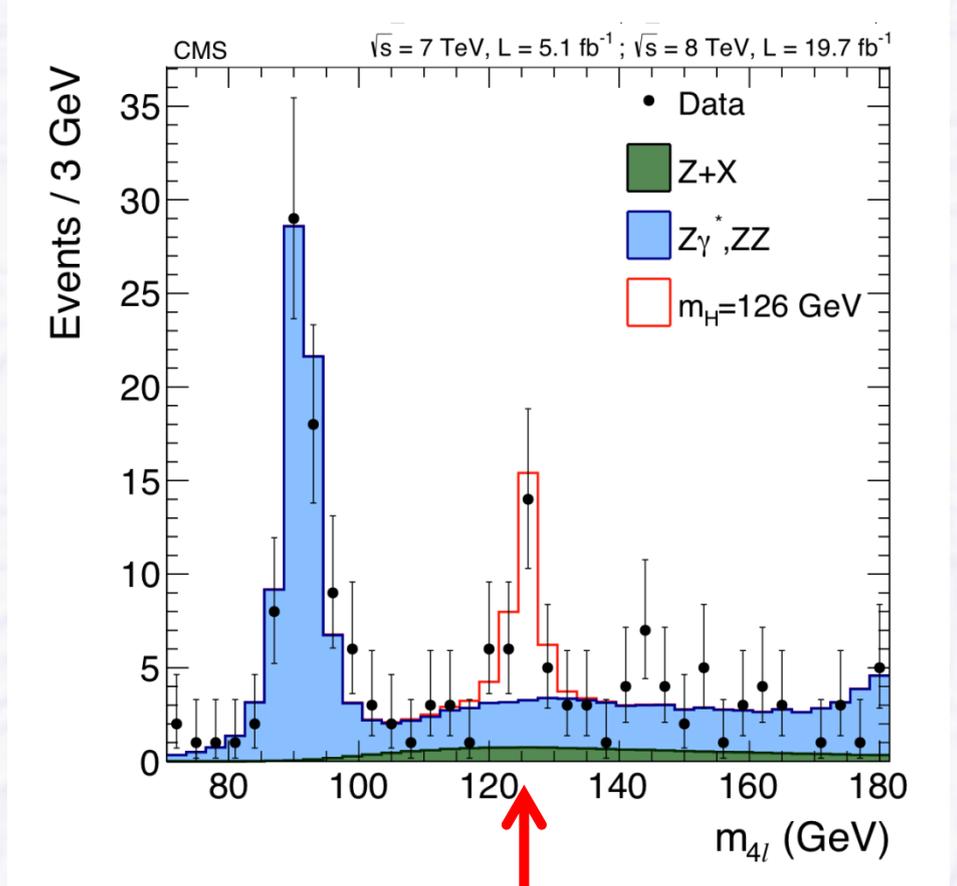
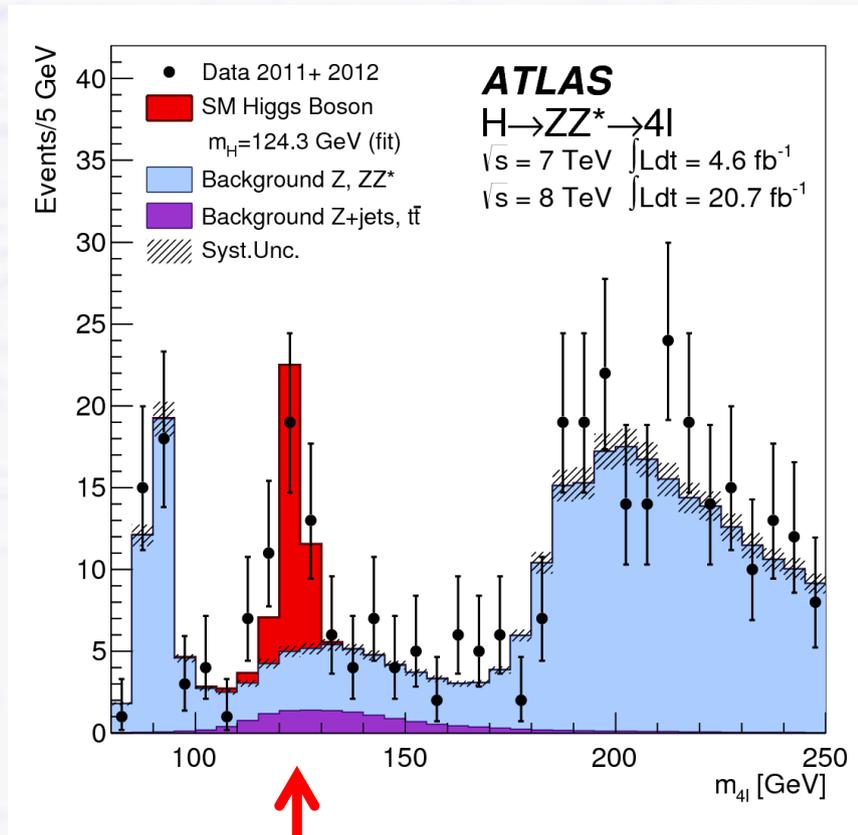


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptons}$

● "Goldener Zerfallskanal"

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

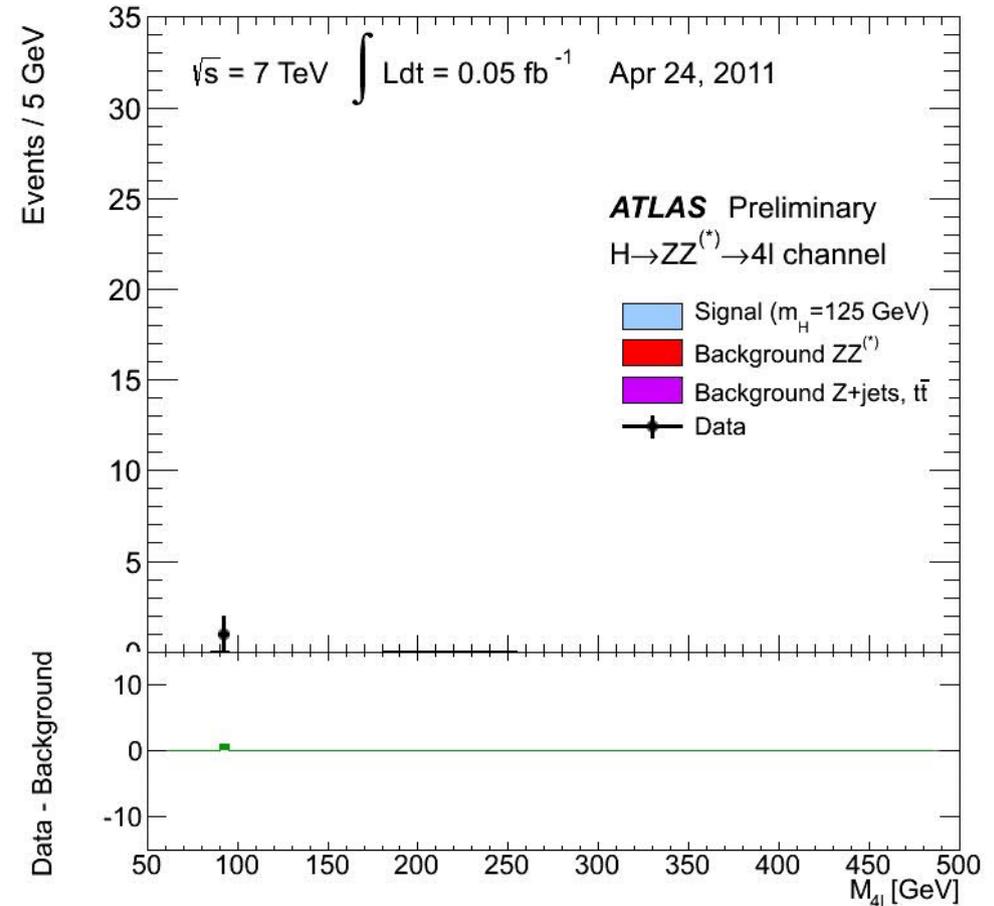
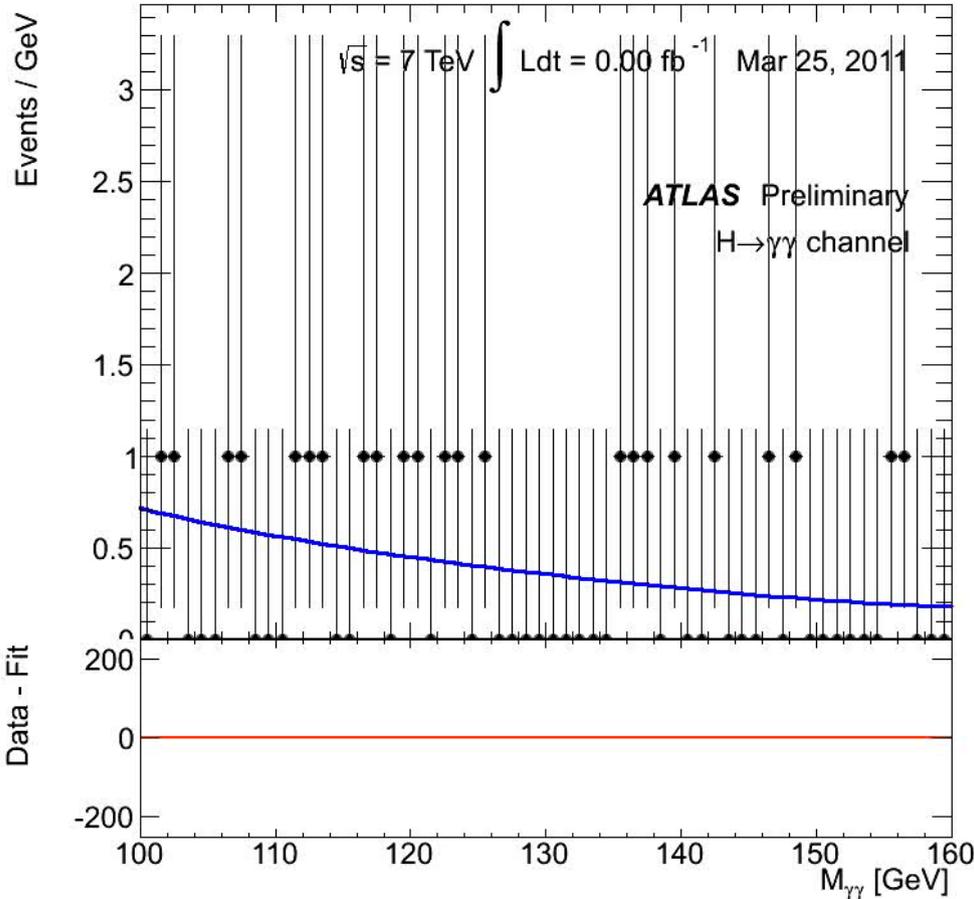
Stand: 16. Juni 2014



Higgs Signifikanz wächst mit der Zeit...

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow 4l$

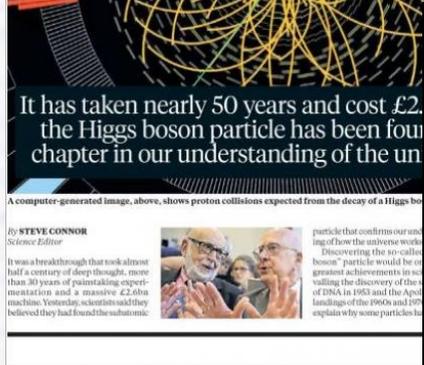
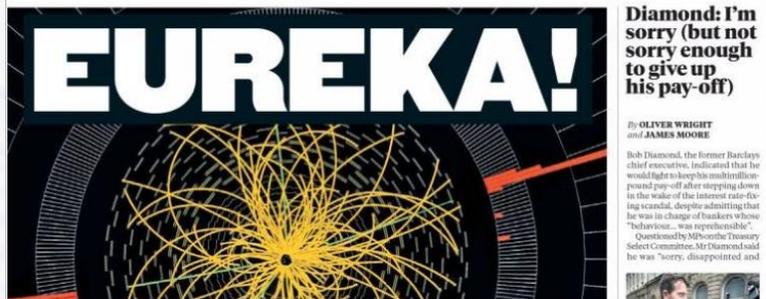


Higgs hier

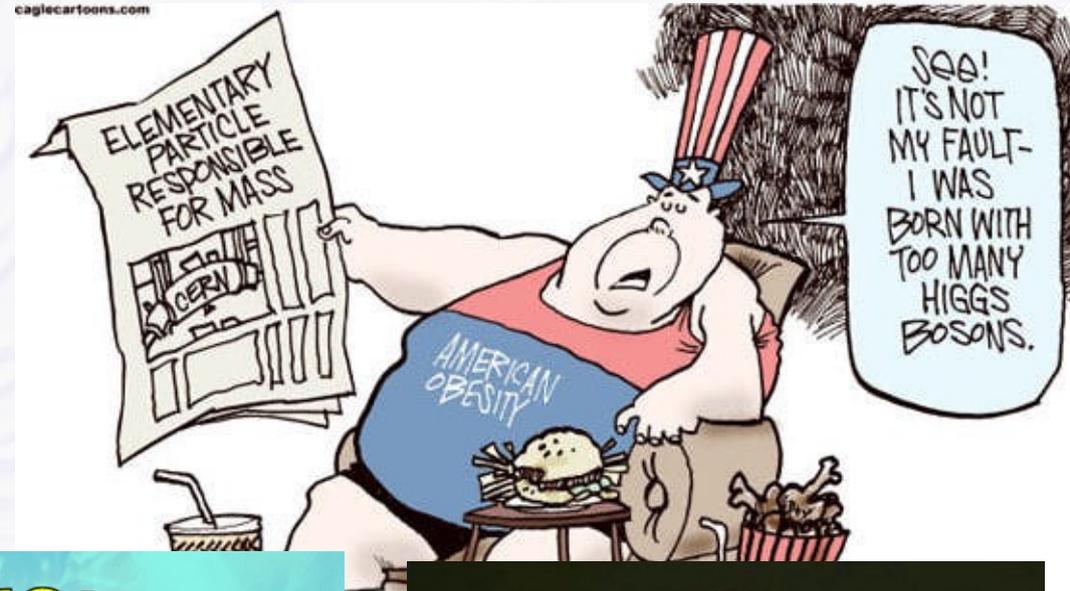
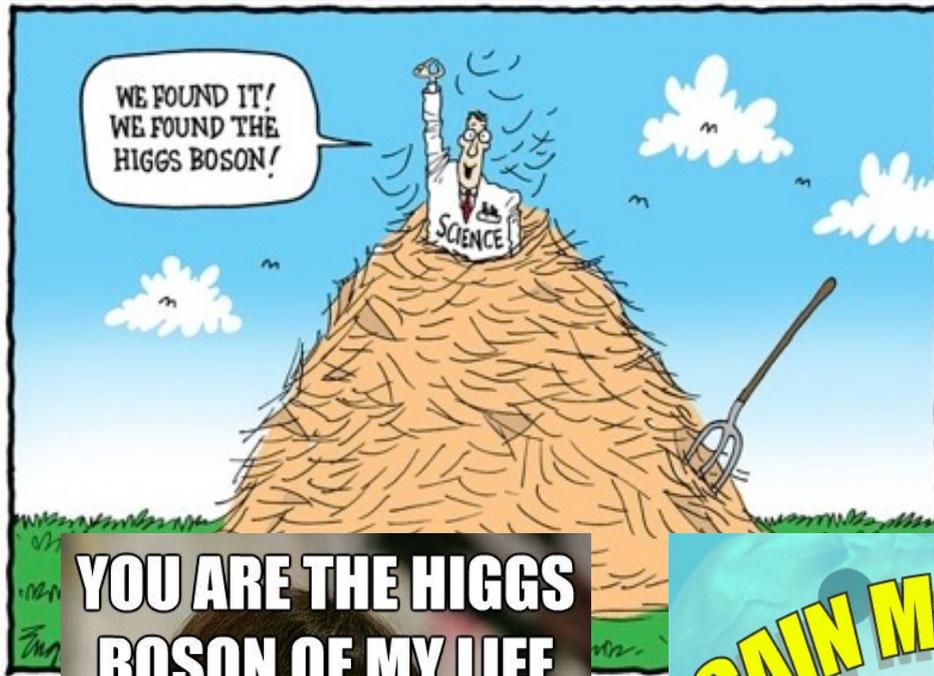
Alle Daten von 2011 + 2012

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

An advertisement for "Higgs Boson Pills". It features a cartoon illustration of a muscular man with a determined expression, surrounded by lightning bolts. The text "GAIN MASS FAST!" is written in large, bold, yellow letters. Below the illustration is a red banner with a white pill icon and the text "HIGGS BOSON PILLS" and "CLICK HERE!!1!". At the bottom, there is a small warning: "WARNING: TAKING TOO MUCH OF THESE PILLS MAY TURN YOU INTO A BLACK HOLE" and the website "FROGSICLE.COM".

SAY GOD PARTICLE

**ONE MORE
GODDAMN TIME**

Nach der Entdeckung

- Entdeckung ist nur der Anfang...

- Weitere Messungen nötig

- **Masse**

- wichtig für die „Stabilität des Universums“

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

- zerfällt das Teilchen wie im Standardmodell vorhergesagt (Signalstärke = 1)?

- oder gibt es Abweichungen → kein Standardmodell-Higgs?

- **Spin (und Parität = Symmetrieverhalten bei Raumspiegelung)**

- Higgs-Feld ist ein **skalares Feld**

- → Higgs-Teilchen muss Spin 0 haben (und positive Parität)

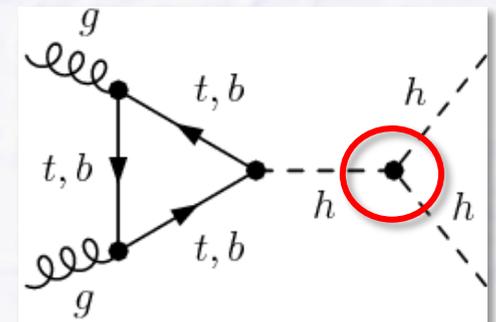
- **Kopplungskonstanten** an Vektorbosonen und Fermionen

- sind die Kopplungen proportional zu den Teilchenmassen?

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

- in ferner Zukunft...

- braucht seeeehr veeeele Daten (~2035?)



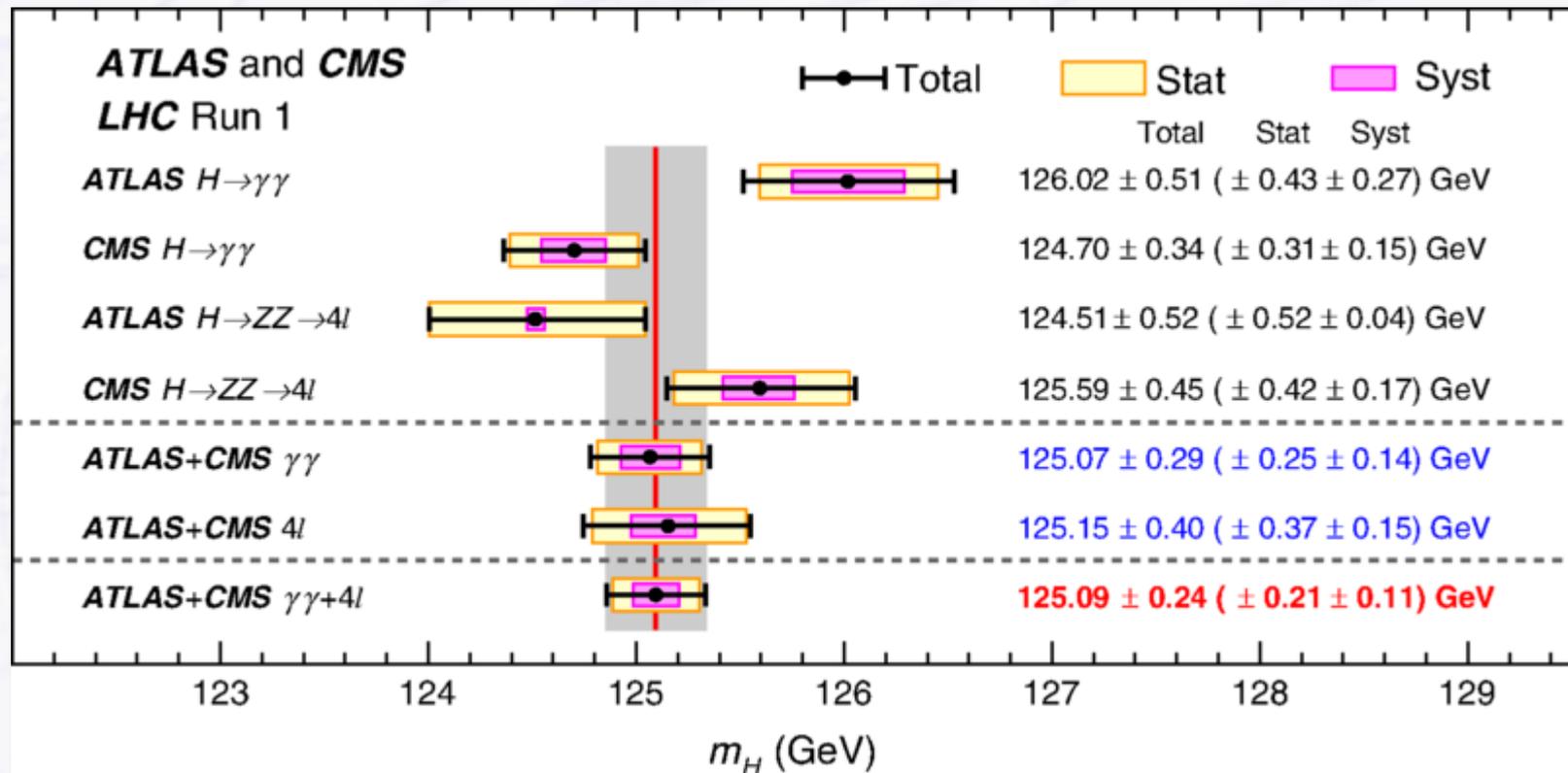
Higgs Masse

- **Higgs-Masse = freier Parameter im Standardmodell**

- muss so genau wie möglich gemessen werden (keine Vorhersage der Theorie)

→ **Kombinierte Messung von ATLAS und CMS (Mai 2015)**

- verwendet Zerfallskanäle mit der besten Massenauflösung: $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



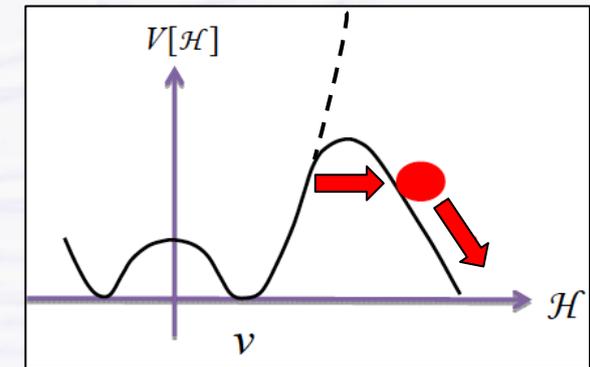
→ **Messunsicherheit nur 0.19%(!)**



Stabilität des Vakuums

Ist das Vakuum (= unser Universum) stabil?

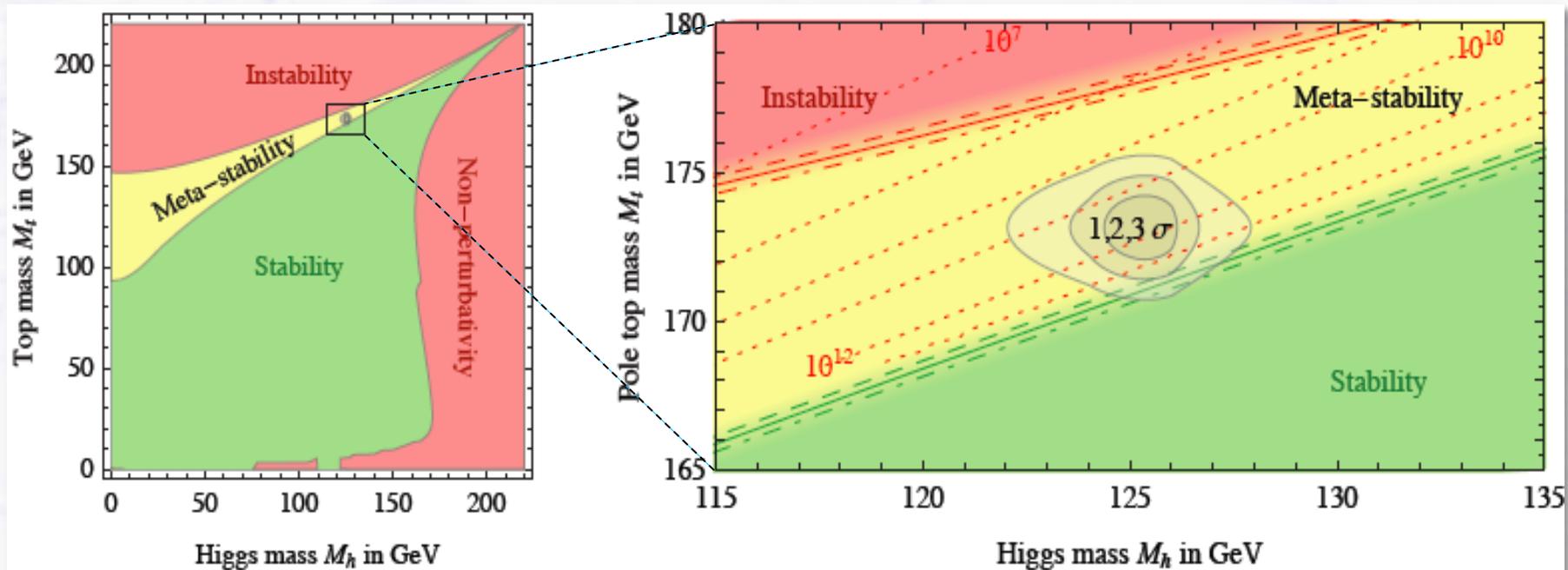
- entspricht die Vakuumenergie (durch das Higgs-Feld) nur einem lokalen Minimum des Higgs-Potentials?
- gibt es evtl. einen Zustand geringerer Energie?
- könnte das Vakuum zu diesem Zustand durchtunneln?



→ hängt ab von Top- und **Higgs-Masse**

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

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

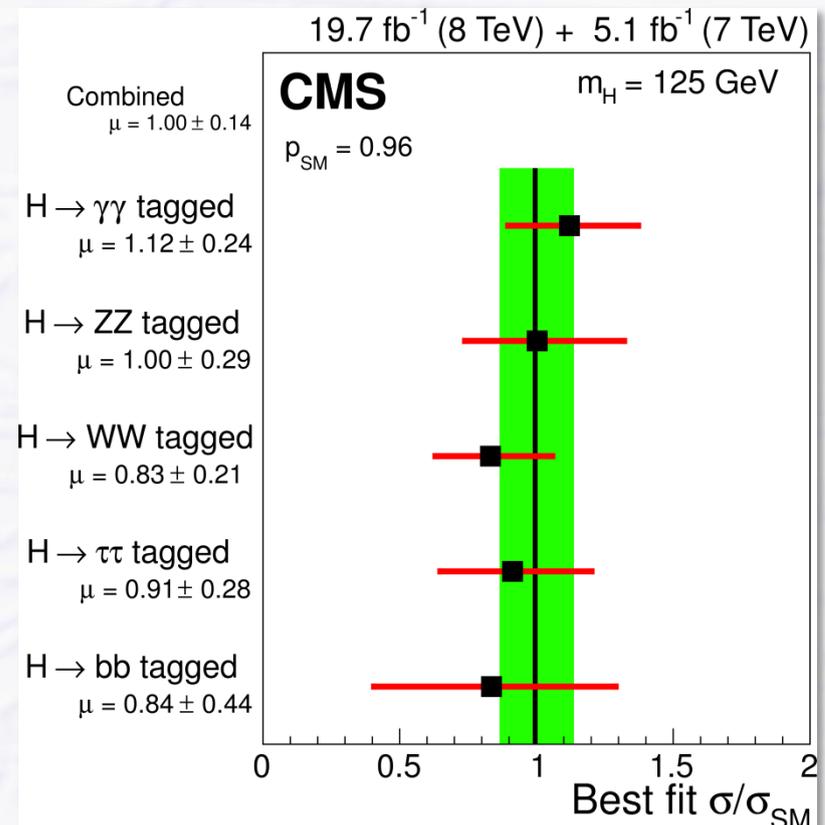
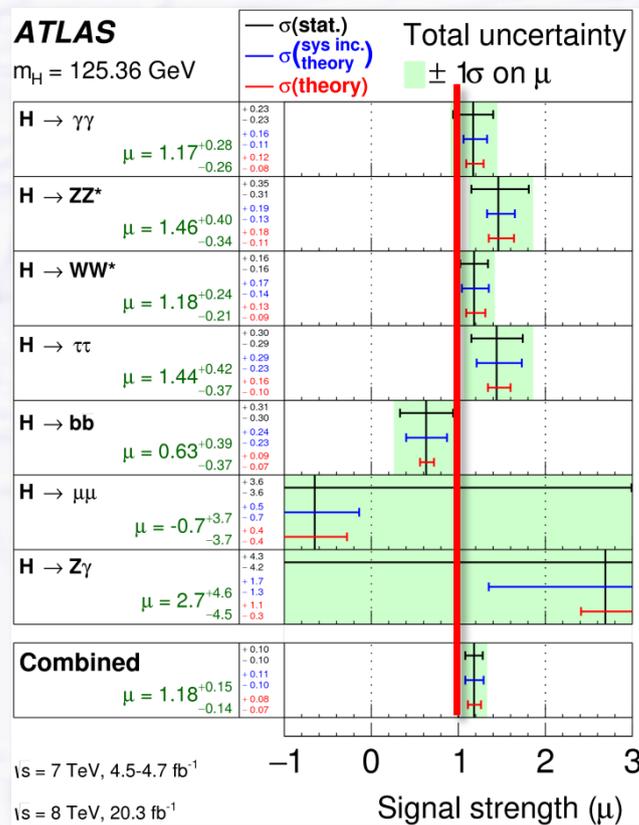


Standardmodell Higgs?

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

→ ATLAS: $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.18 \pm 0.15$, $m_H = 125.36 \pm 0.37$ (stat.) ± 0.18 (sys.)

→ CMS: $\sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.00 \pm 0.14$, $m_H = 125.02 \pm 0.27$ (stat.) ± 0.15 (sys.)



Spin und Parität?

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

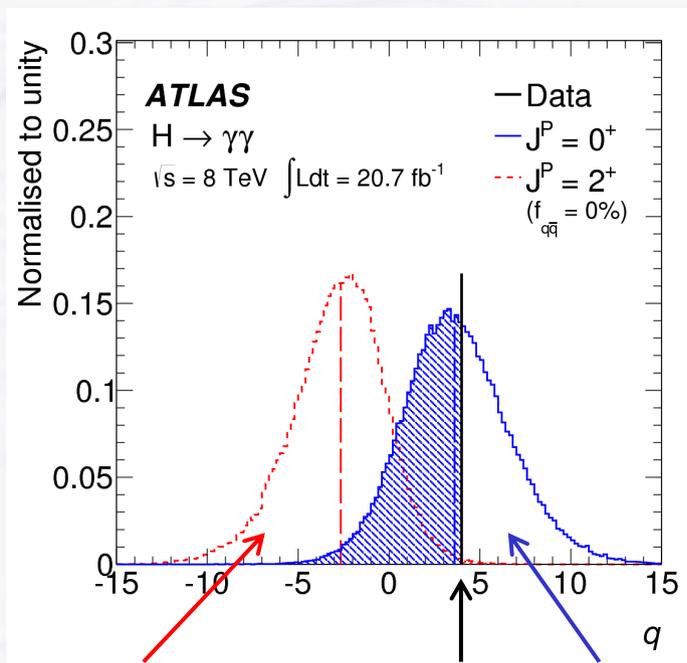
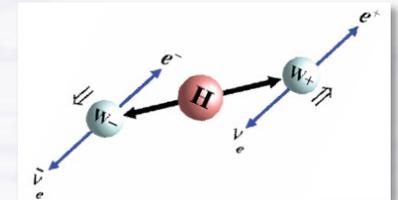
→ **Parität** = Symmetrieverhalten der Wellenfunktion bei Raumspiegelung

• 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)

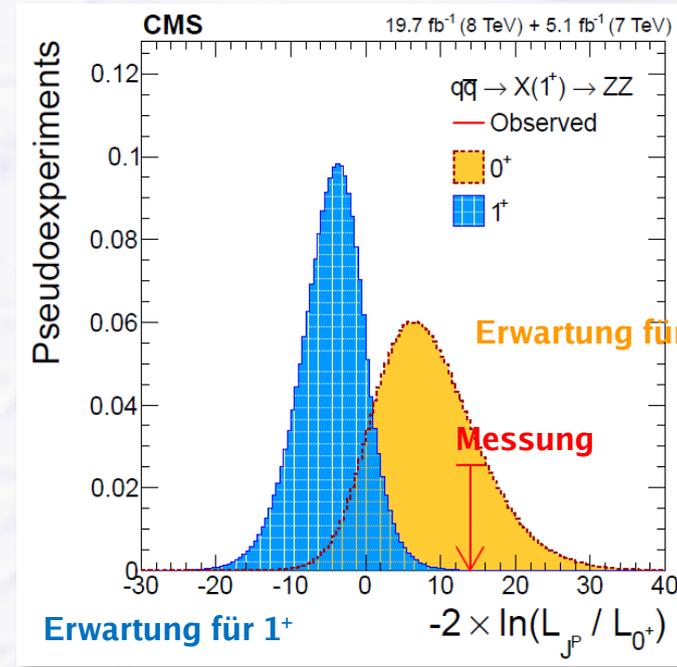
→ Messung aus Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte



Erwartung für 2^+

Messung

Erwartung für 0^+



Erwartung für 1^+

Erwartung für 0^+

Messung

$-2 \times \ln(L_{J^P} / L_{0^+})$

Higgs und Massenerzeugung?

Erwartung:

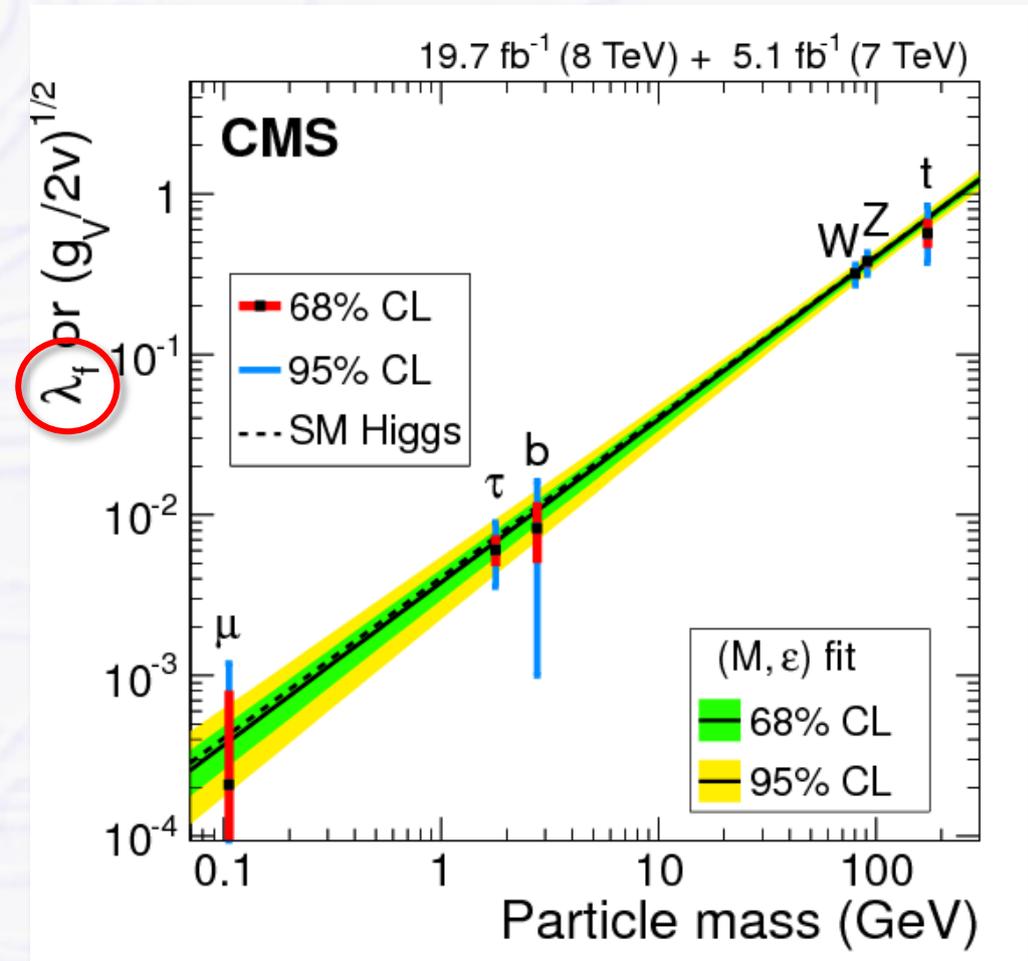
Wenn Higgs-Mechanismus verantwortlich für die Erzeugung der Masse

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

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

→ $\lambda \propto M$

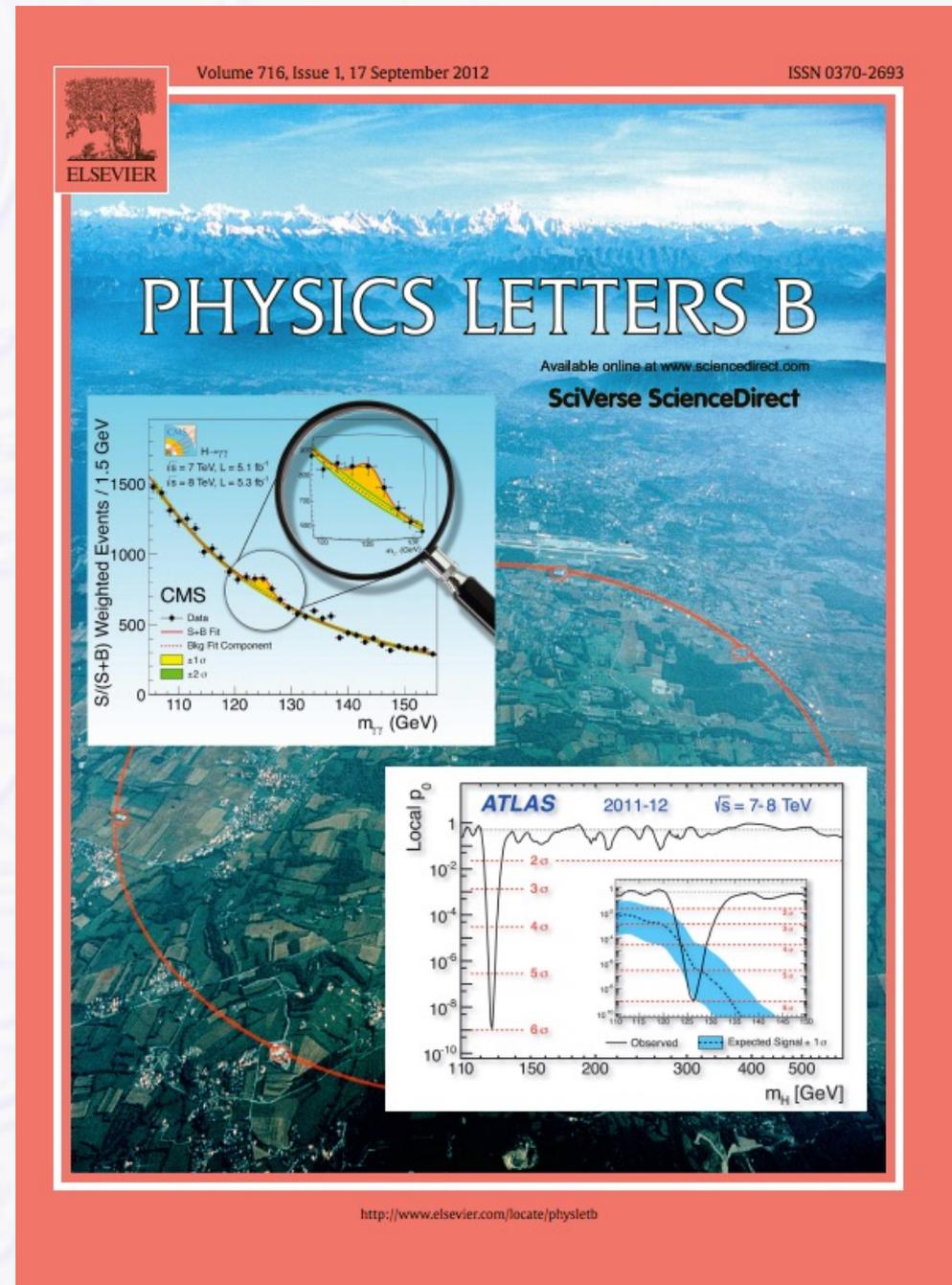
Je größer die Masse, je stärker die Kopplung an das Higgs-Feld ✓



Higgs: Stand der Erkenntnisse

- 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...

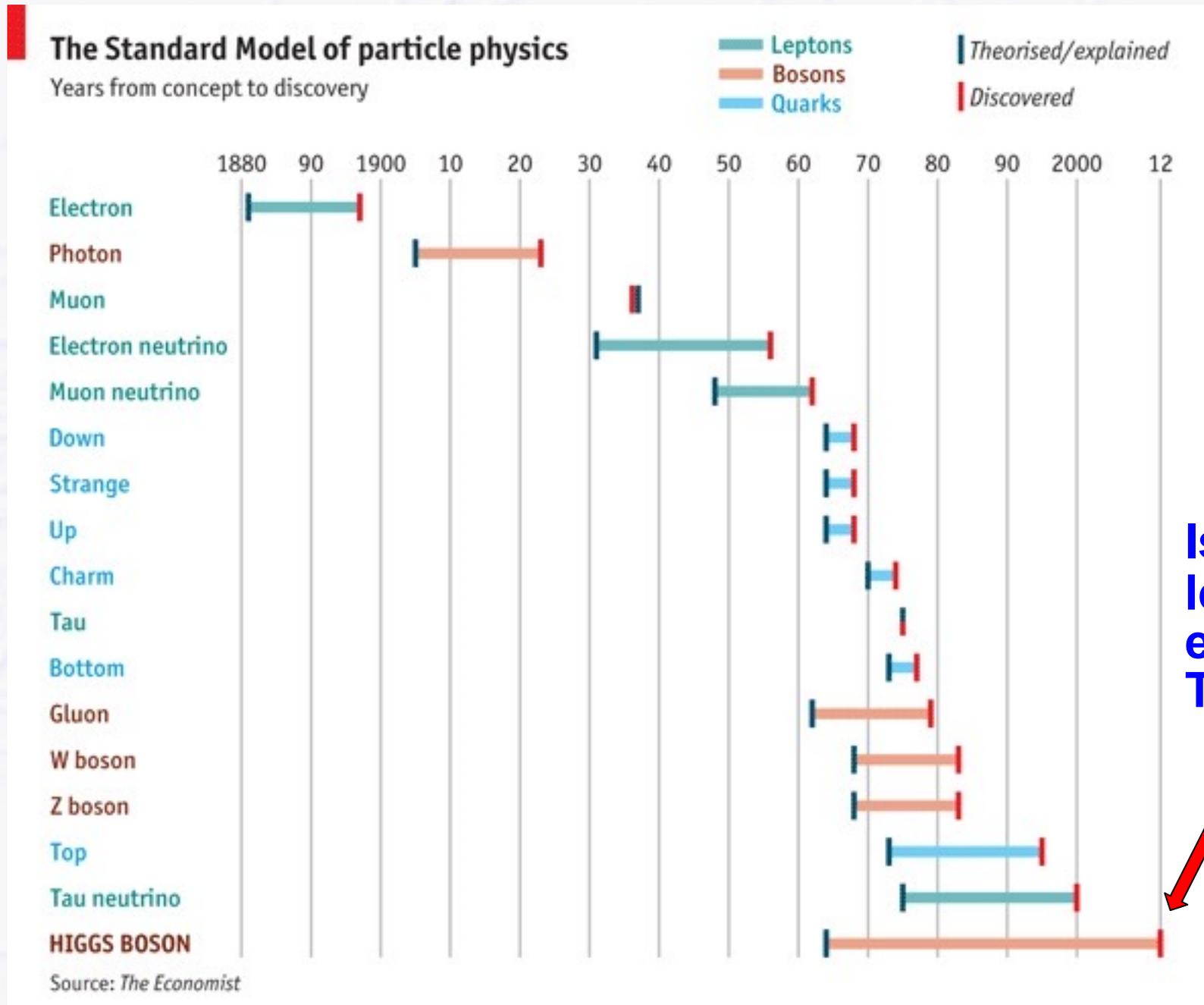


Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

“...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?



Nach dem Higgs

**SUSY, Dunkle Materie,
zukünftige Projekte**

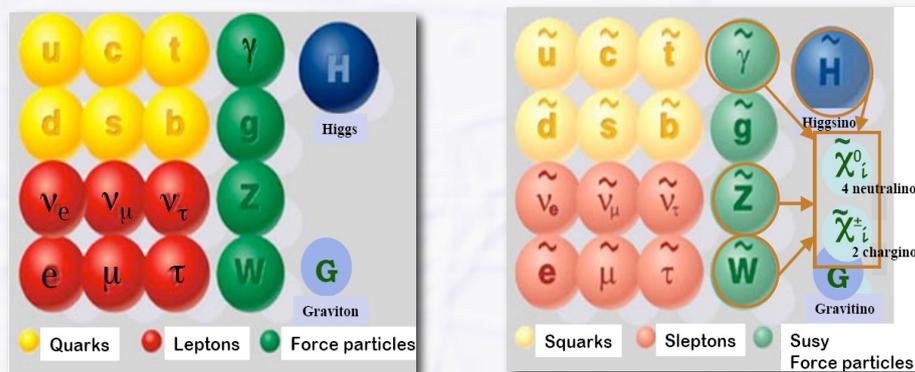
Jenseits des Standardmodells

● 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(!!!)

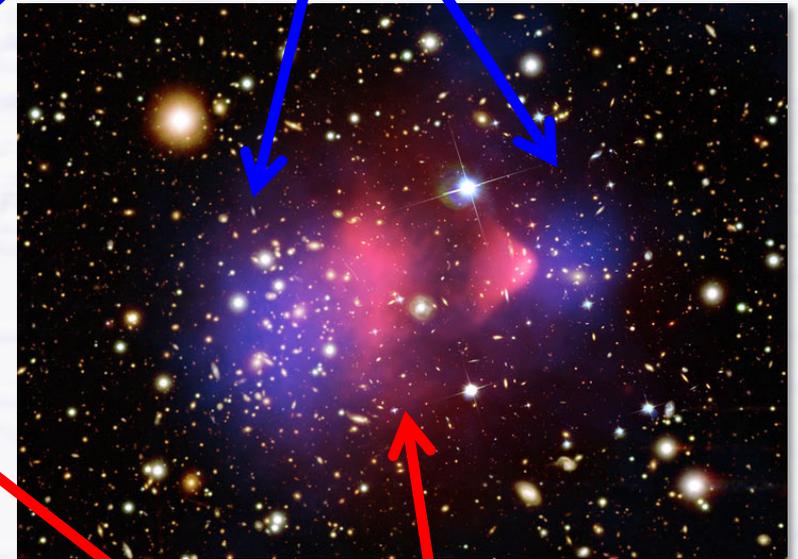
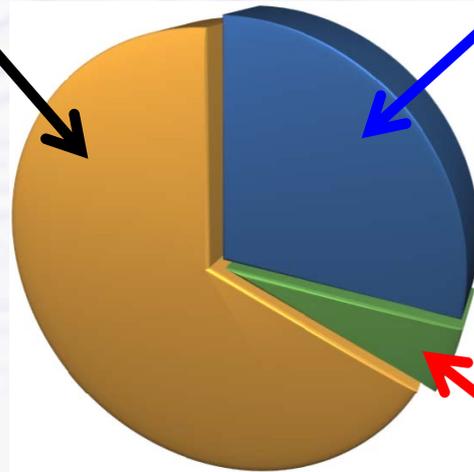
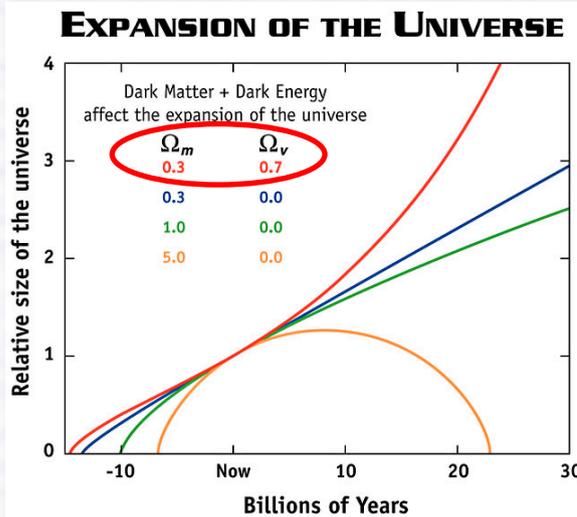
Bestandteile des Universums

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

SUSY?

Dunkle Energie:
69.2% ± 1.0%

Dunkle Materie:
25.7% ± 0.4%



Gewöhnliche Materie:
4.82% ± 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?

● Bisher 2 mehrjährige Run-Perioden am LHC

→ **Run 1: 2011 – 2012** (Higgs-Entdeckung am 4. Juli 2012, 7-8 TeV, 30 fb⁻¹)

- Long Shutdown 1: 2013 + 2014, Wartungspause, Erweiterungen

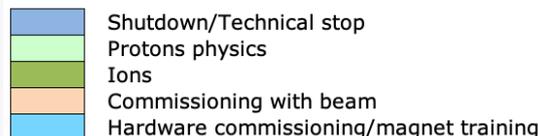
→ **Run 2: 2015 – 2018** (Bestimmung vieler Higgs-Parameter, 13 TeV, 160 fb⁻¹)

- Long Shutdown 2: 2019 – 2021, verlängert wegen Covid-19, viele neue Detektorelemente

→ **Run 3: 2022 – 2025** (13.6 TeV, ~200 fb⁻¹ erwartet)



Last updated: January 2022



Ziel bis 2038: 3'000 fb⁻¹
ca. 15x mehr Daten als bis Ende 2018

Zukunft 1a: e^+e^- @ 0.5 TeV →

ILC = International Linear Collider

● Elektron-Positron Collider

→ 0.5 – 1 TeV, 2 x 25 km Länge

- basierend auf supraleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- technologisch ausgereift
- 5% “Prototyp” in Betrieb (freier Elektronenlaser XFEL am DESY, Hamburg)



● “Higgs-Fabrik”

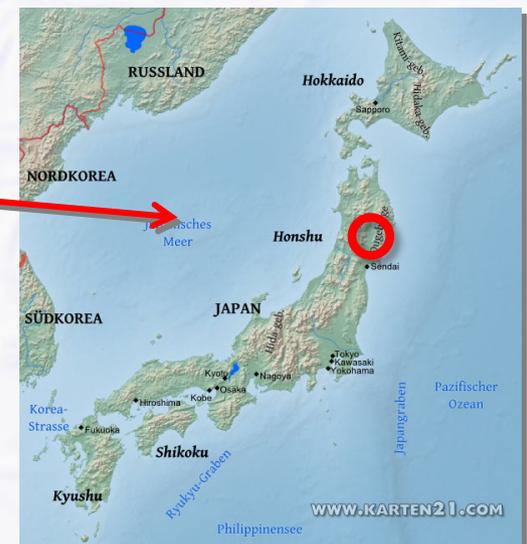
→ Präzisionsmessungen des Higgs (und Top-Quarks)

- Vorteil gegenüber Hadron Collider: nur wenig störender Untergrund anderer Reaktionen

● Japan hat Standort angeboten

→ nördlich von Sendai

- verschiedene Evaluierungen durch japanische Komitees
 - ➔ (noch) keine positive Empfehlung
- falls Entscheidung für ILC
 - ➔ weltweites Projekt: Japan (50-60%) + europäische + US-Beteiligung



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

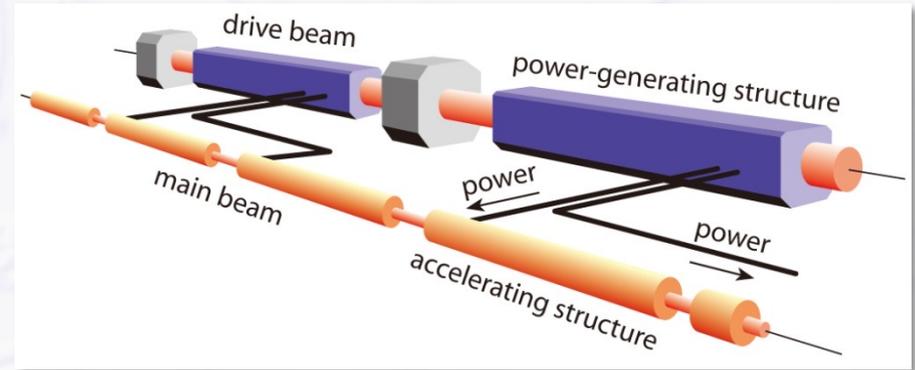


CLIC = Compact Linear Collider

Elektron-Positron Collider

\rightarrow 3 TeV, 2 x 25 km Länge

- o basierend auf normalleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- o 2 Strahlen: “drive beam + main beam”
- o Energieübertragung von einem niederenergetischen intensiven Strahl zu einem hochenergetischen zweiten Strahl



“SUSY-Fabrik”

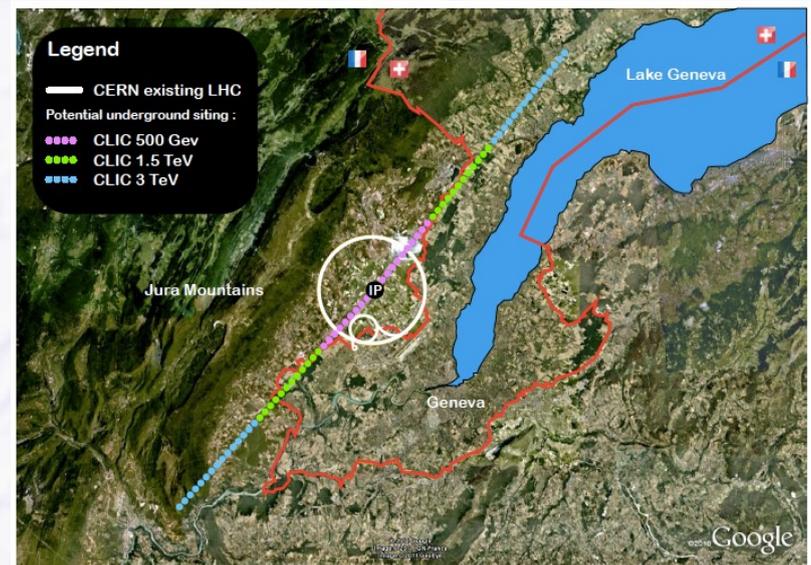
\rightarrow Präzisionsmessungen von SUSY Teilchen

- o falls SUSY bei LHC gefunden
- o komplementär zu LHC

Möglicher Standort: CERN

\rightarrow entlang des Jura

\rightarrow Wechselwirkungspunkt am CERN



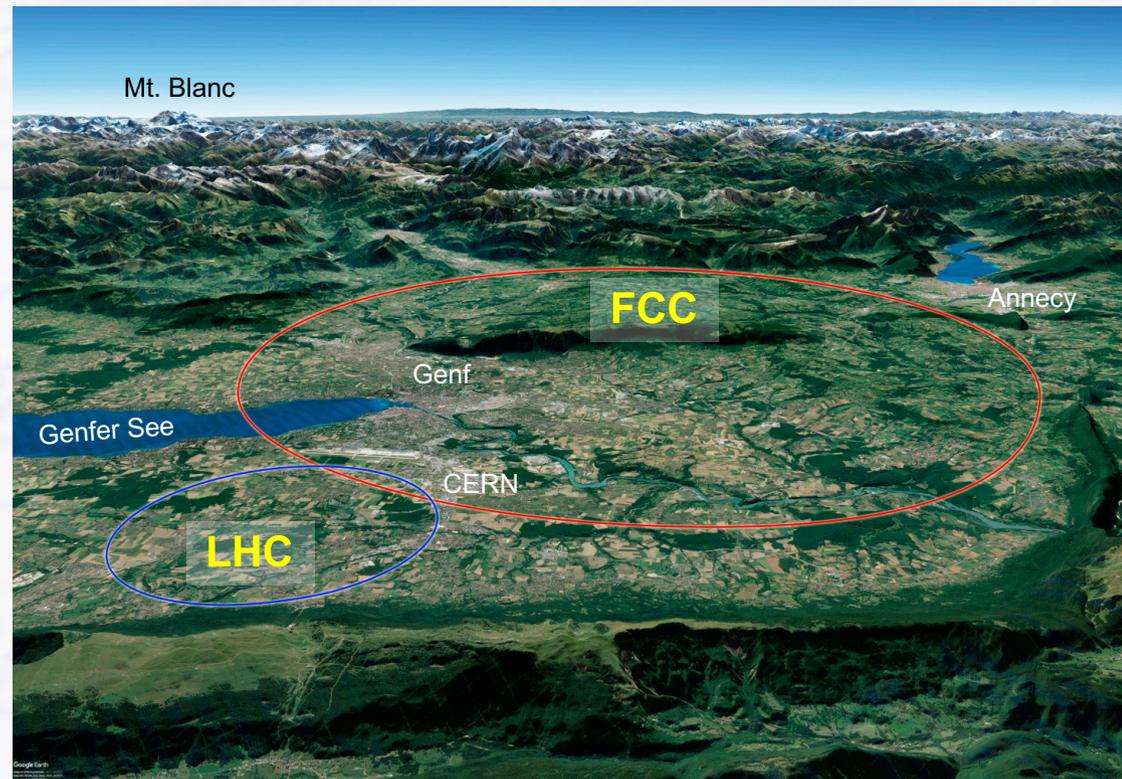
Zukunft 2: neuer Collider → FCC

FCC = Future Circular Collider

- Konzeptstudie eines ~100 km Tunnels in der Region Genf
- Erste Stufe könnte ein e^+e^- Collider mit 365 GeV bis 2040 sein
 - **“Higgs-Fabrik”**
- Zweite Stufe: pp Collider mit 100 TeV (7x LHC) ab 2065
 - Entwicklung neuer supraleitender Magnete mit >16 T nötig (Nb₃Sn statt NbTi oder Hochtemperatur-Supraleiter)

→ Physikzielsetzung?

- bisher keine Hinweise oder Vorhersagen für “neue” Physik im Energiebereich des FCC
- SUSY?
- Dunkle Materie?



Aussichten

● LHC läuft bis 2038 oder länger(?)

- Run 3 mit 13.6 TeV bis 2025
- ab 2029 “high luminosity“ LHC

→ Ziel: **3000 fb⁻¹ = 15x** mehr Daten als Run 1+2

● Nächster Update der European Strategy for Particle Physics ~2026 (nach Ende von LHC Run 3)

→ Input (neben anderem):

- SUSY bei LHC? Oder andere neue Phänomene???
- ILC genehmigt in Japan?
- FCC-ee und FCC-pp Machbarkeit, Kosten, Physikzielsetzung für FCC-pp?

→ Output:

- Welche Richtung soll die (Hochenergie-)Teilchenphysik einschlagen?
- Was wird DAS Zukunftsprojekt nach LHC Ende ab 2038?

Die nächsten Jahrzehnte bleiben spannend...