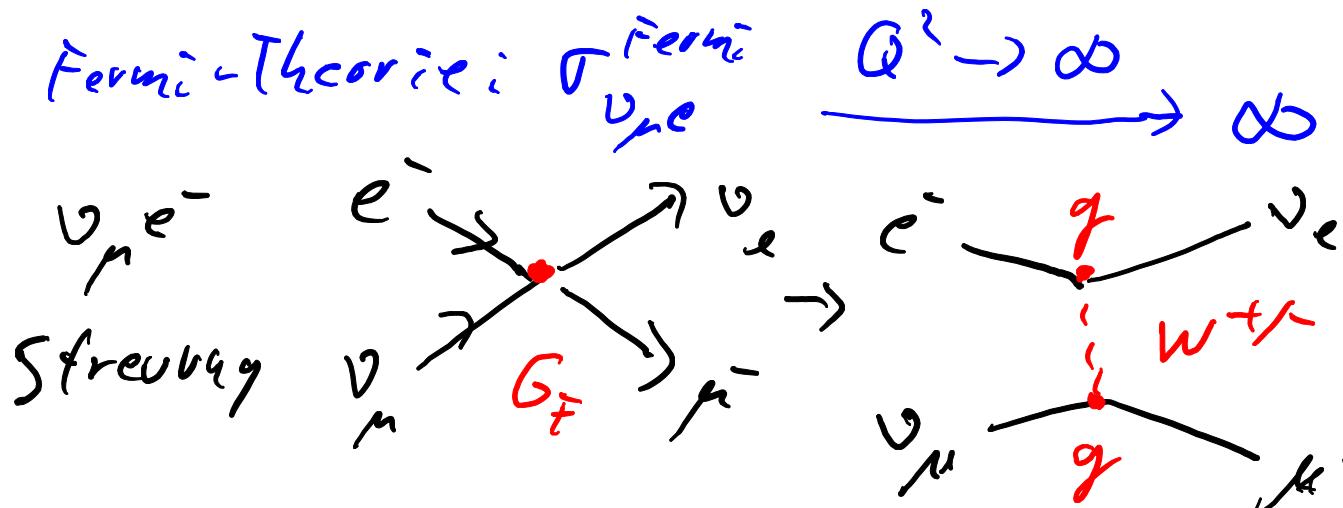


12. Elektroschwache Wechselwirkung

12.1 Fiktivmediane Vektorbosonen



$$|\langle \psi_f | H | \psi_i \rangle| \sim G_F |\mu_{ei}| \rightarrow g \frac{1}{Q^2 c^2 + M_w^2 c^4} g$$

für $Q^2 \rightarrow 0$

$$G_F = \frac{g^2}{8} \frac{g^2}{M_w^2 c^4} \cdot (5c)^3$$

Verletzung der Unitaritätsgrenze

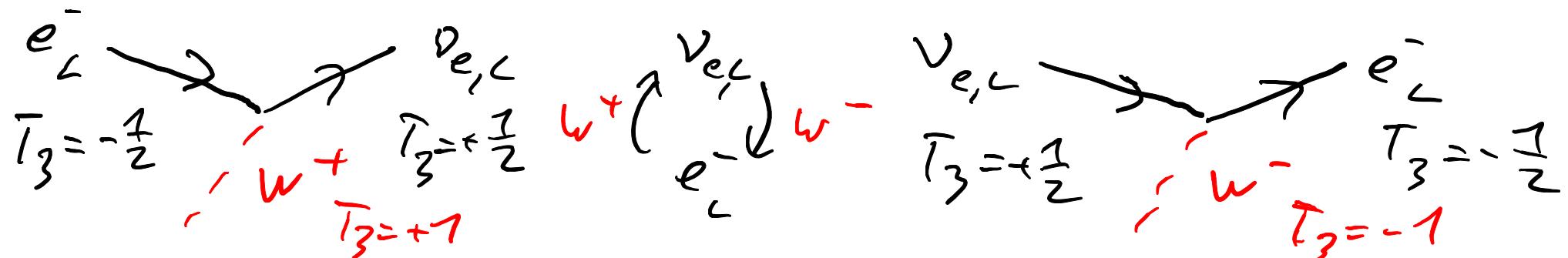
W: massive Austauschteilchen der schwachen WW

$$g \xrightarrow{Q^2 \rightarrow 0} \frac{g^2}{M_w^2 c^4}$$

$$M_w = 80,4 \text{ GeV}/c^2, \text{ Spur } 15$$

→ geringe Stärke der schwachen WW bei kleinen Q^2 wegen großer W-Masse

72.7.7 Wechselwirkung des W-Bosons



→ W^+/W^- -Bosonen wirken wie Auf-/Absteigende operatoren

→ $SU(2)$ -Symmetrie der schwachen WW

→ Erhaltungsgruppe schwacher Isospin T

W-Kopplung an Doppeltrios mit $T = \frac{1}{2}$, $T_3 = \pm \frac{1}{2}$

$$\left(\begin{matrix} \nu_e \\ e^- \end{matrix}\right)_L, \left(\begin{matrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{matrix}\right)_L, \left(\begin{matrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{matrix}\right)_L, \left(\begin{matrix} u \\ d' \end{matrix}\right)_L, \left(\begin{matrix} c \\ s' \end{matrix}\right)_L, \left(\begin{matrix} t \\ b' \end{matrix}\right)_L$$

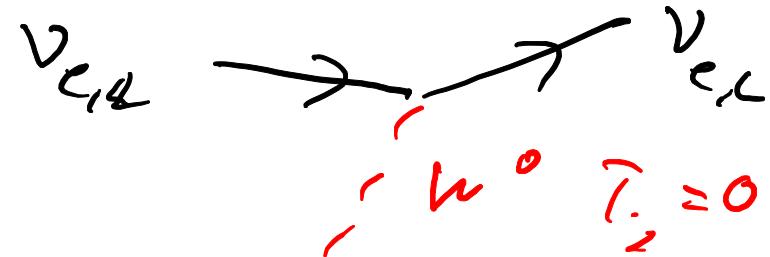
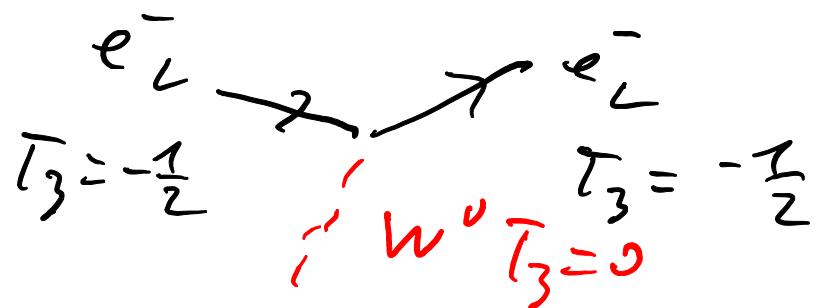
Quarkmischungen: $d' \approx d$, $s' \approx s$, $b' \approx b$

$$W^{+/-} : T_3 = \pm \frac{1}{2} \Rightarrow T = \frac{1}{2}$$

→ $W^{+/-}$ gehören zu schwachen Isospin-Triplett

3 12.1.2 W^0 -Boson

- W^0 : Austauschteilchen mit $T=1, T_3=0$



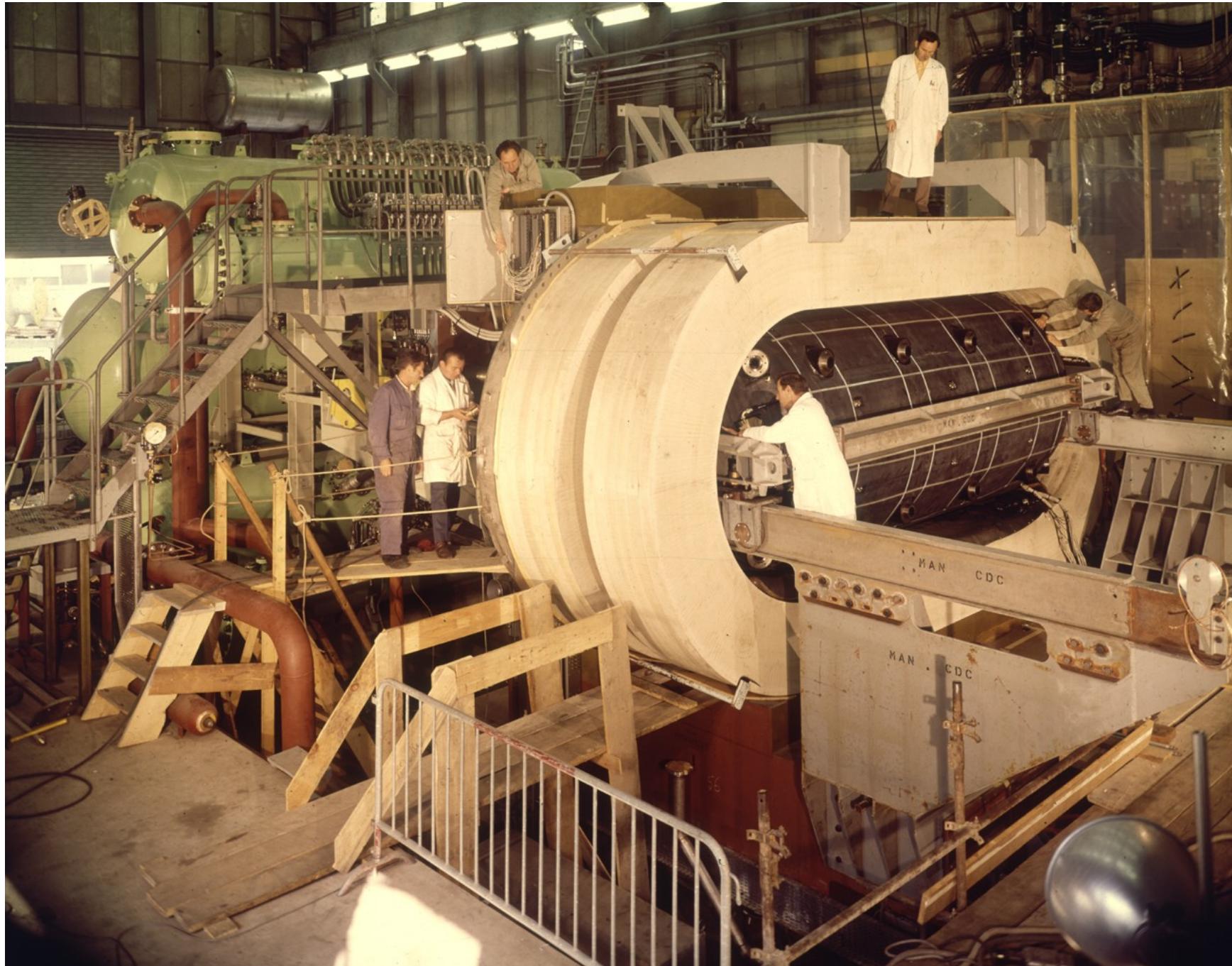
W^0 -Austausch: Neutraler Strom (NC)

W^\pm -Austausch: Geladener Strom (CC)

- Experimenteller Nachweis von NC-Reaktionen durch $\bar{\nu}_\mu$ -Streuung

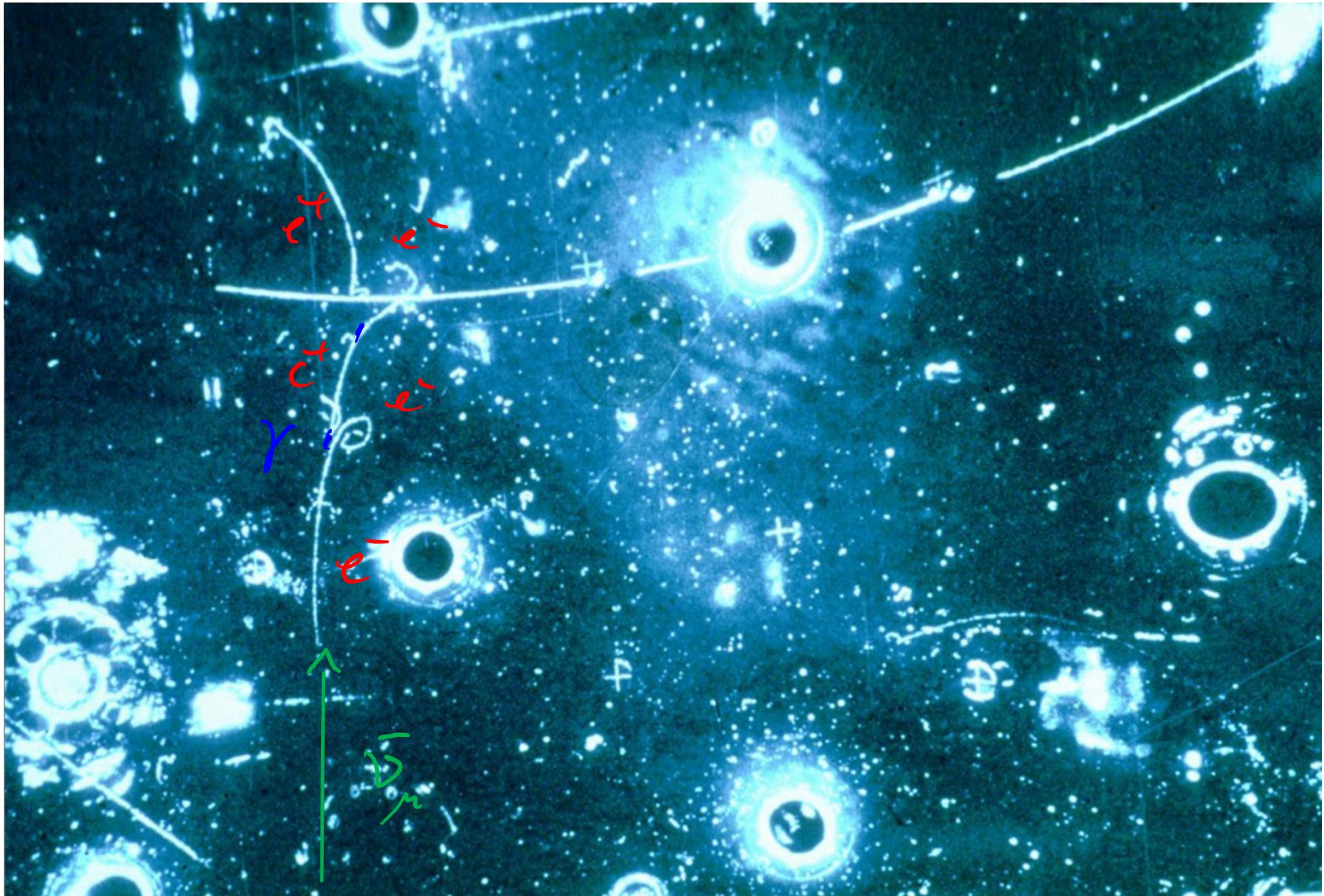


Gargamelle - Experiment (CERN)



$\bar{\nu}_\mu$ -Stahl
auf 12 m^3
Flüssigpros
Freon
(CCl_2F_2)

Erfste Beobachtung von NC-Reaktion (1973)



6 12.2 Vereinigung der elektromagn. und schwacher Wechselwirkung*

Glashow-Salam-Weinberg-Theorie

- W koppelt an schwacher Isospin mit Stärke $g T_3$
- Weiteres Austauschteilchen B^0 mit $I = T_3 = 0$
- B^0 koppelt an schwache Hyperladung mit Stärke $g' \frac{Y}{2}$

$$Y = ?(0 \cdot T_3) \rightarrow Y_{\nu_L} = -1, Y_{\nu_R} = 0, Y_e = -1, Y_{e_R} = -2$$

- Mischung von W^0 und B^0 bildet experimentell beobachtete Austauschteilchen mit definierter Masse:

$$\langle Y \rangle = \sin \Theta_W \langle W^0 \rangle + \cos \Theta_W \langle B^0 \rangle \quad M_Y = 0$$

$$\langle Z^0 \rangle = \cos \Theta_W \langle W^0 \rangle - \sin \Theta_W \langle B^0 \rangle \quad M_Z = 91,2 \text{ GeV}$$

Z^0 koppelt an links- und rechtshäufige Teilchen
 Θ_W : schwacher Mischungswinkel / Weinberg-Winkel

7 12.2. 1 Relationen der Kopplungsstärken

*

- γ -Kopplung an V_L :

$$\sin \Theta_w g \left(+\frac{1}{2}\right) + \cos \Theta_w g' \left(-\frac{1}{2}\right) \stackrel{!}{=} 0$$

$$\Rightarrow \sin \Theta_w g = -\cos \Theta_w g'$$

$$\Rightarrow \frac{g'}{g} = \tan \Theta_w$$

- γ -Kopplung an e_R :

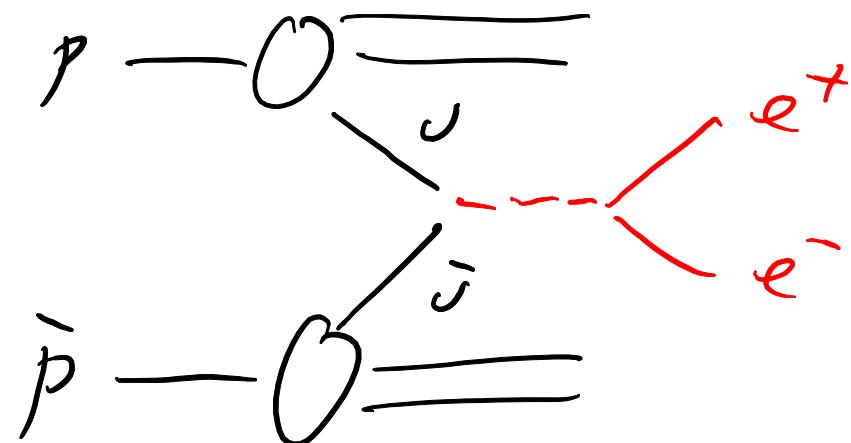
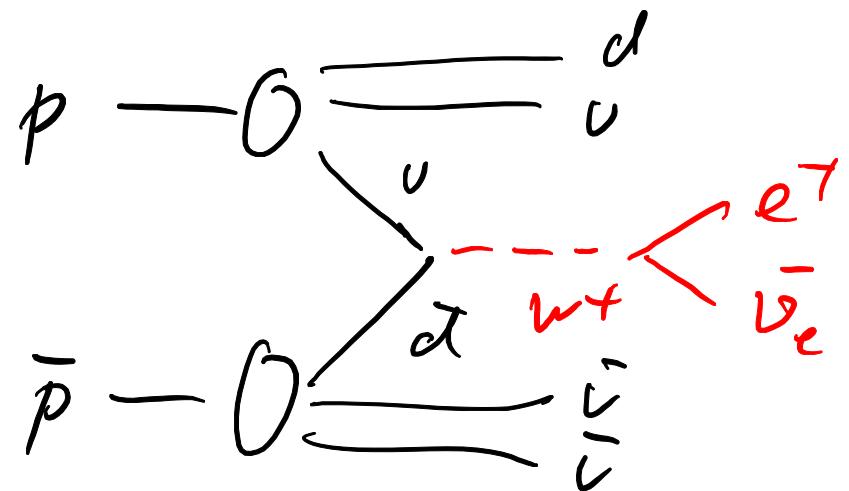
$$0 + \cos \Theta_w g' (-1) = -e$$

$$\Rightarrow g \sin \Theta_w = g' \cos \Theta_w = e$$

$$\sin^2 \Theta_w \approx 0,23 \rightarrow \Theta_w \approx 28,7^\circ$$

12.3 Entdeckung und Untersuchung von W- und Z Bosonen

- TPS-Beschleuniger am CERN: $p \rightarrow \overleftarrow{p}$ $220 \text{ GeV} \quad 270 \text{ GeV}$

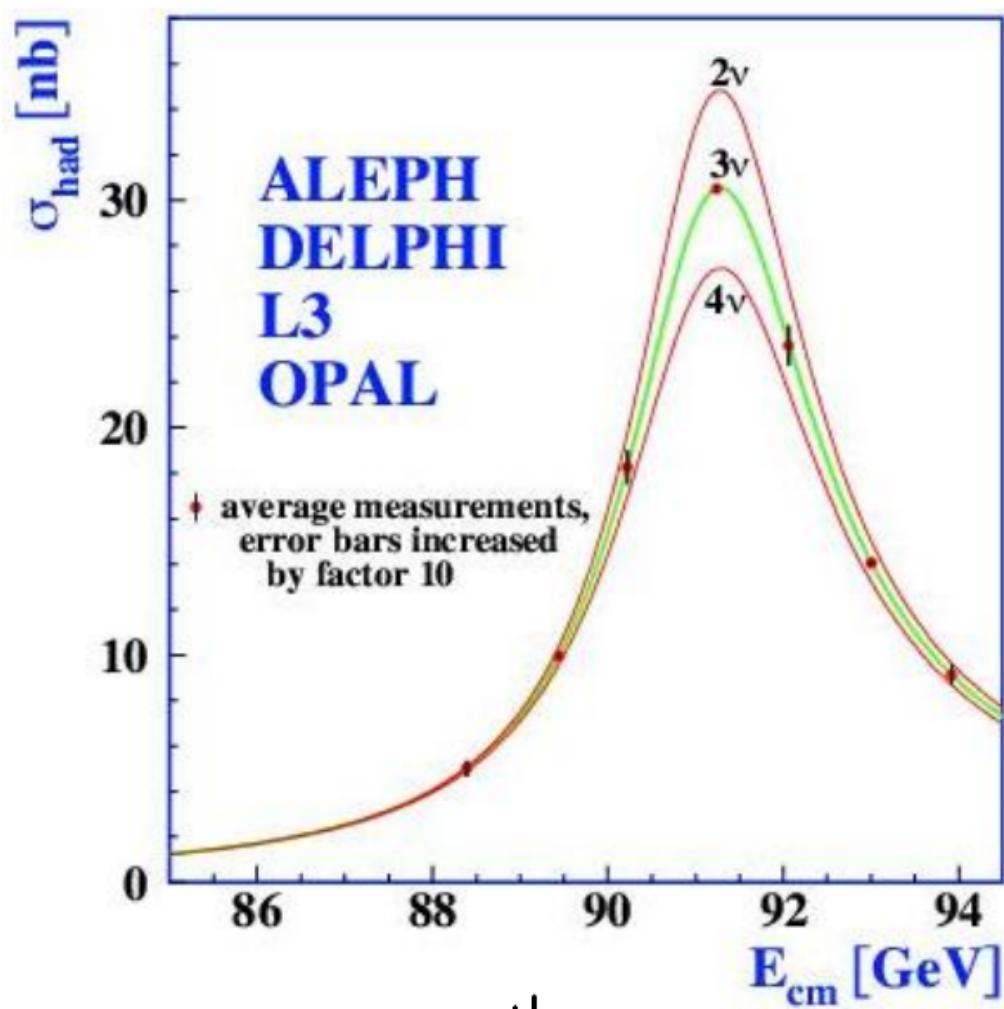


- Nachweis durch UA1 und UA2 (1983)
- Nobelpreis Rubbia und v.d. Meer 1983

9 LEP - Beschleuniger: e^+e^- , 27 km Umfang, 1989-2000

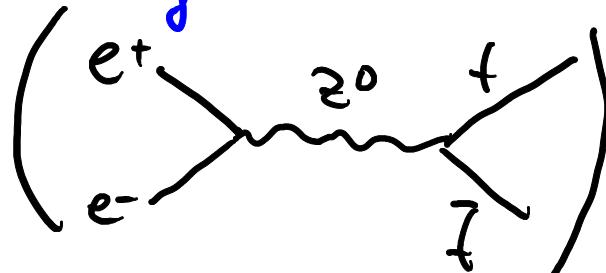


Z^0 -Boson wird bei e^+e^- -vernichtung in Resonanz erzeugt



Es gibt nur 3 leichte Neutrino-generationen

(Gleichzeitig Einschränkung auf weitere Familien von Leptonen und Quarks)



- Position des Resonanzpeak:

$$M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

- Breite der Resonanz:

$$\Gamma_Z = \frac{\hbar}{\tau_Z} = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

- Breite und Höhe der Resonanzkurve wachsen/sinken mit der Anzahl möglicher Z^0 -Zerfallskanäle:

$$Z^0 \rightarrow e^+e^- \quad \mu^+\mu^- \quad \tau^+\tau^- \quad u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b}, \nu_e\bar{\nu}_e, \nu_\mu\bar{\nu}_\mu, \nu_\tau\bar{\nu}_\tau$$

12.4 Spontane Symmetriebrechung & Higgs - Mechanismus

• Problem der GSW - Theorie

w^+, w^- , z Bosonen müssen masselos sein. Bosonmassen können aber nicht einfach in die Theorie reingeschrieben werden
(Masseterme sind unverträglich mit $SU(2)$ - Symmetrie des schwachen Isospin in GSW - Theorie)

Lösung durch spontane Symmetriebrechung:

• Konzept: (grundlegende Arbeiten: Brout, Englert, Higgs, u.a. (1964))

bei hohen Energien sichtbar

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ - Symmetrie

\uparrow
schw. Isospin \nwarrow schw. Hyperladung

bei niedrigen Energien sichtbar

$U(1)_{em}$ - Symmetrie

\uparrow
elek. Ladung

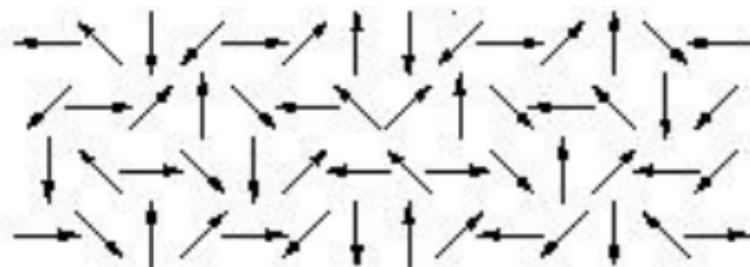
w^+, w^- , w^0 , B masselos

$\longrightarrow w^+, w^-, z^0$ massiv
 γ masselos

Spontane Symmetriebrechung

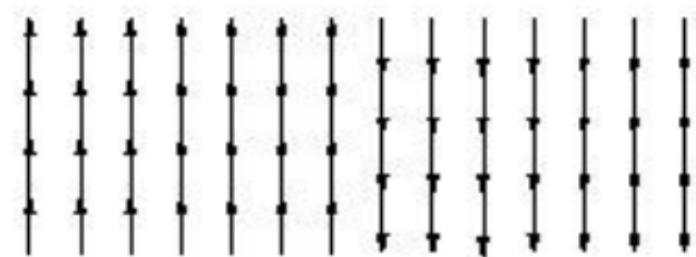
- Physikalische Grundgesetze sind symmetrisch
Lösungsgleichung für betrachtetes System ist nicht symmetrisch
- Beispiel außerhalb Teilchenphysik: Ferromagnetismus
 - ↳ Symmetrie: Drehinvarianz der Spin-Spin-Wechselwirkung bei $T > T_c$
 - ↳ Spontane Sgm. Brechung: Ausbildung weißscher Bezirke bei $T < T_c$

$$T > T_c$$



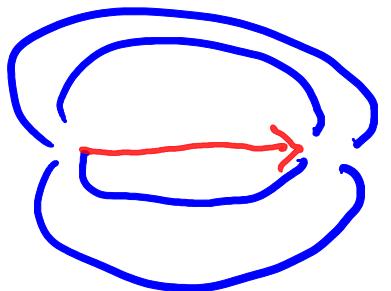
Magnetfeld im Mittel = 0
Rotationsymmetrie

$$T < T_c$$

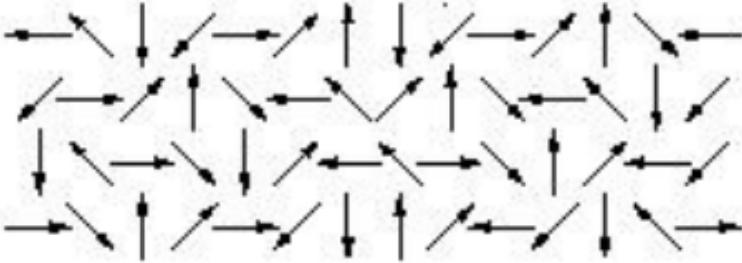


Magnetfeld im Mittel $\neq 0$
keine Rotationsymmetrie

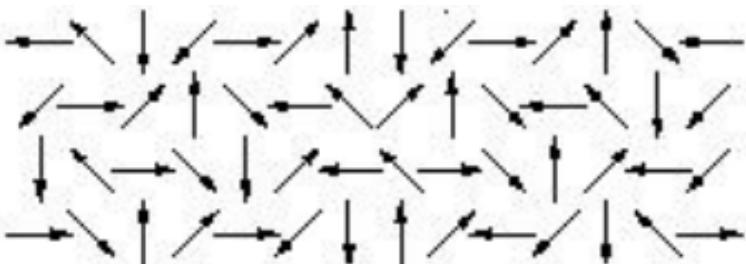
Testdipol
masselos



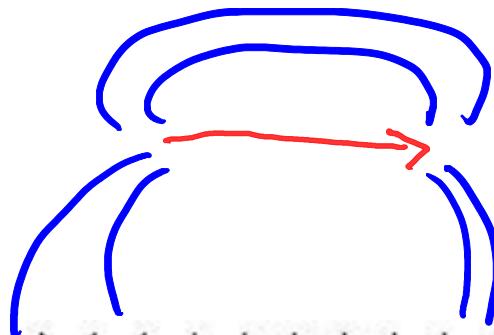
Hintergrund
feld
mit
 $\langle |\phi| \rangle = 0$



keine Wechselwirkung
mit Hintergrundfeld
 \rightarrow gespeicherte Feldenergie
 $= 0$
 $T > T_c$

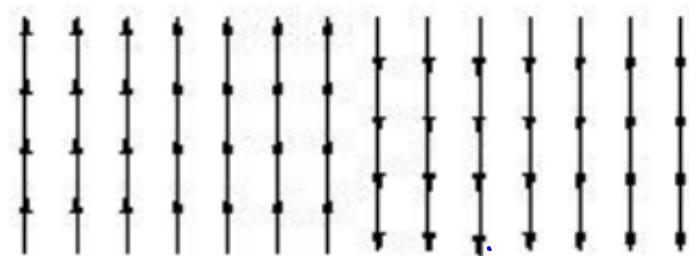


Testdipol
massiv



$\langle |\phi| \rangle \neq 0$

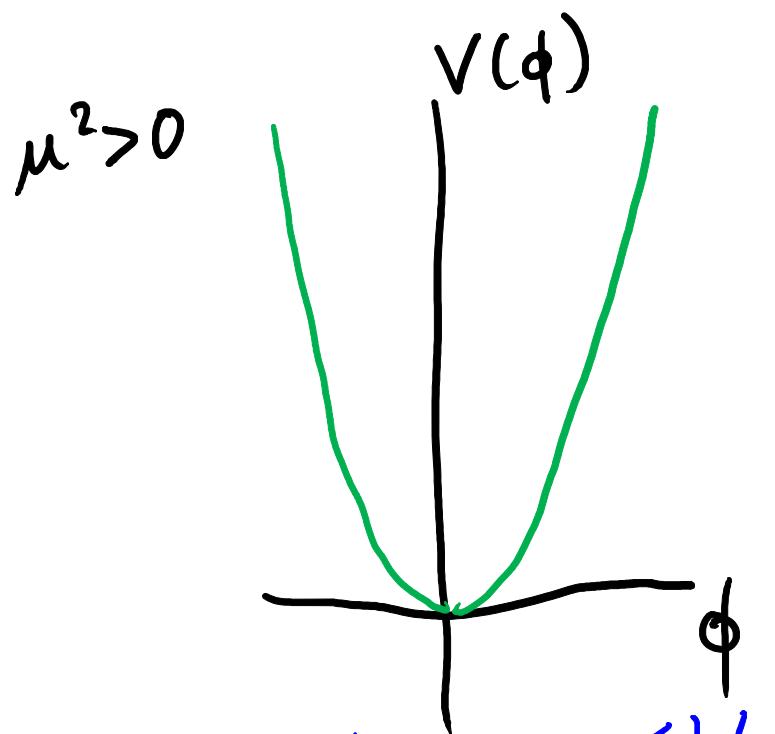
Wechselwirkung mit Hintergrund-
feld
 \rightarrow gespeicherte Feldenergie $\neq 0$
 $T < T_c$



Selbstwechselwirkung in
Hintergrundfeld
 \leadsto gespeicherte Feldenergie $\neq 0$

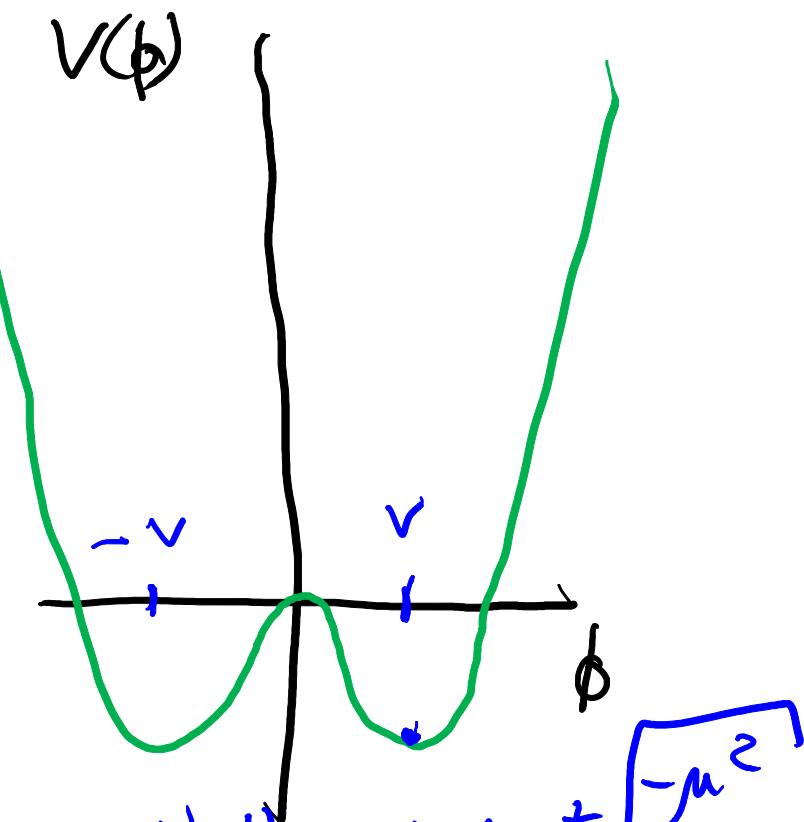
- Für Teilchenphysik: Neues Wechselwirkungspotential

$$V(\phi) = \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4$$



im Minimum $\langle |\phi| \rangle = 0$
und $\phi \leftrightarrow -\phi$ symmetrisch

hat $\phi \leftrightarrow -\phi$ Symmetrie



$$\langle |\phi| \rangle = \pm v = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$$

und keine Symmetrie

Zusammengefasst

- An allen Orten und zu (fast) allen Zeiten existiert ein Higgs-Hintergrundfeld ϕ , mit $\langle |\phi| \rangle = \pm v \neq 0$
 ↑ Vakuumserwartungswert v
- W^+, W^-, Z^0 koppeln an Hintergrundfeld ϕ und erhalten eine feste potentielle Energie $\sim \langle |\phi| \rangle = \pm v$

→ Masse W^+, W^-, Z

↓ konkret $m_W = g_W \cdot \frac{v}{2}$, $m_Z = \frac{g_W}{\cos \theta_W} \cdot \frac{v}{2}$
d.h. $v = \frac{1}{\sqrt{2 G_F}} \approx 246 \text{ GeV}$

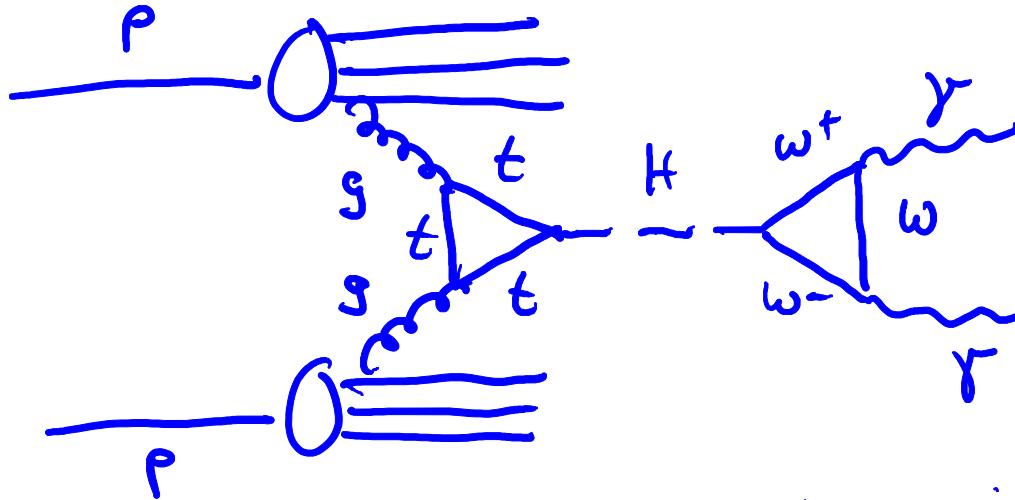
- Auch Fermionen können an Higgs-Hintergrundfeld koppeln und so massiv werden

- Higgs-Hintergrundfeld besitzt einen weiteren Freiheitsgrad, der durch Selbstwechselwirkung massiv wird

→ Higgs-Boson $J^{PC} = 0^{++}$ Masse $m_H = \sqrt{2 \lambda} = ?$

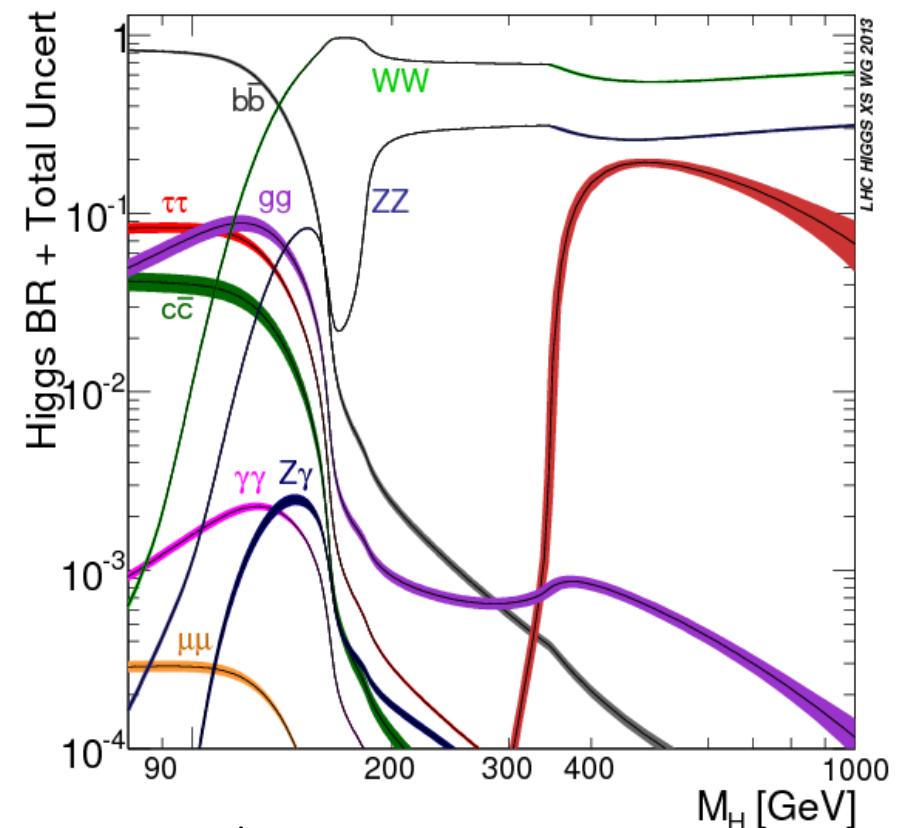
Higgs - Boson - Suchen

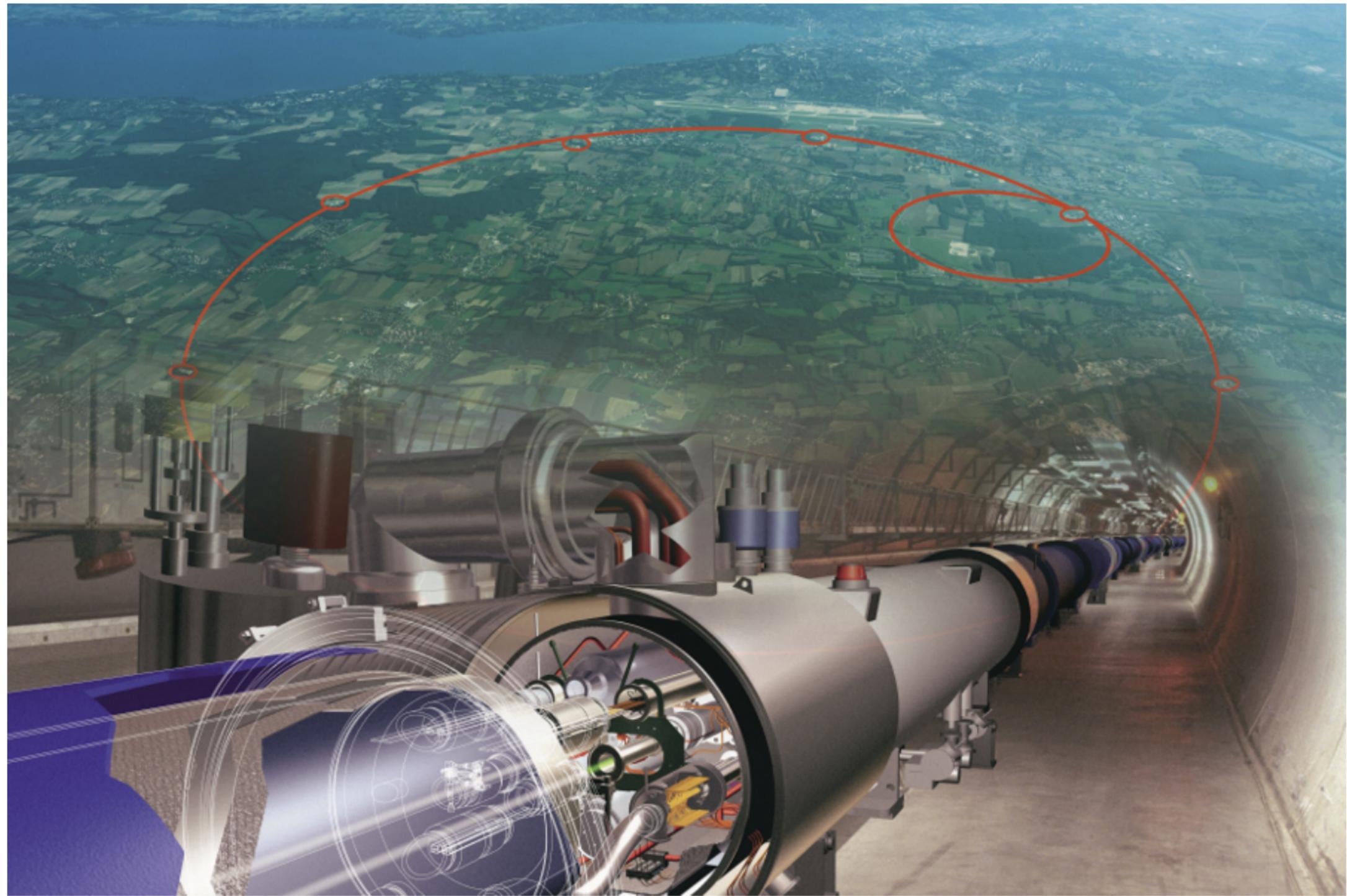
- LEP mit e^+e^- bis $\sqrt{s} = 209 \text{ GeV}$
 - Tevatron mit $p\bar{p}$ bis $\sqrt{s} = 1.9 \text{ TeV}$
 - LHC mit $p\bar{p}$ bis $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ (aktuell $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$)
- } keine Entdeckung,
aber Massenuntergrenzen



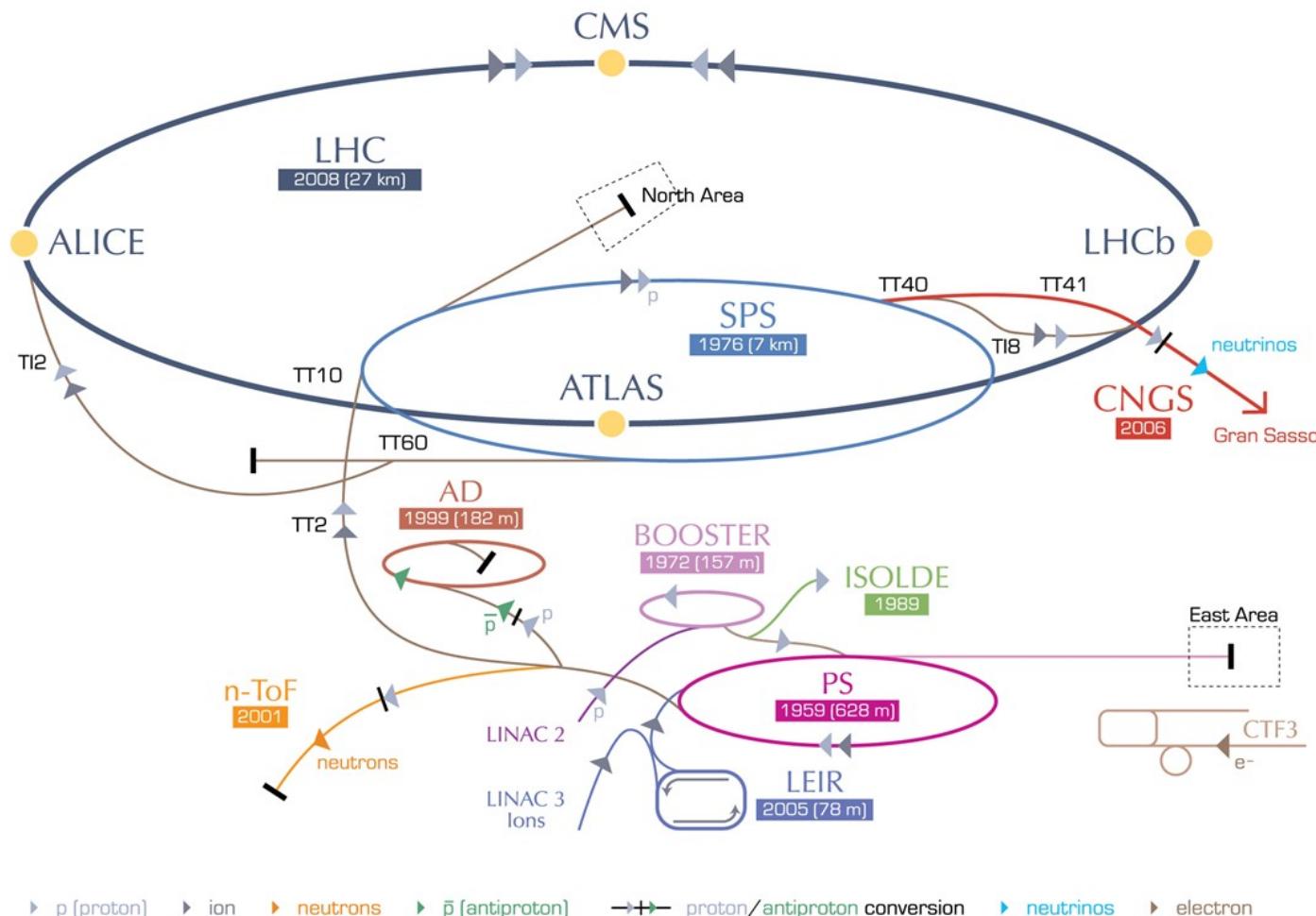
aus $\int \mathcal{L} dt = 25 \text{ fb}$ in 2011/2012
bei $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ und 8 TeV

NB: $H \rightarrow \gamma\gamma$ kann leichter nachgewiesen werden als $H \rightarrow b\bar{b}$, weil weniger Konkurrenzprozesse ähnliche Signaturen im Detektor erzeugen





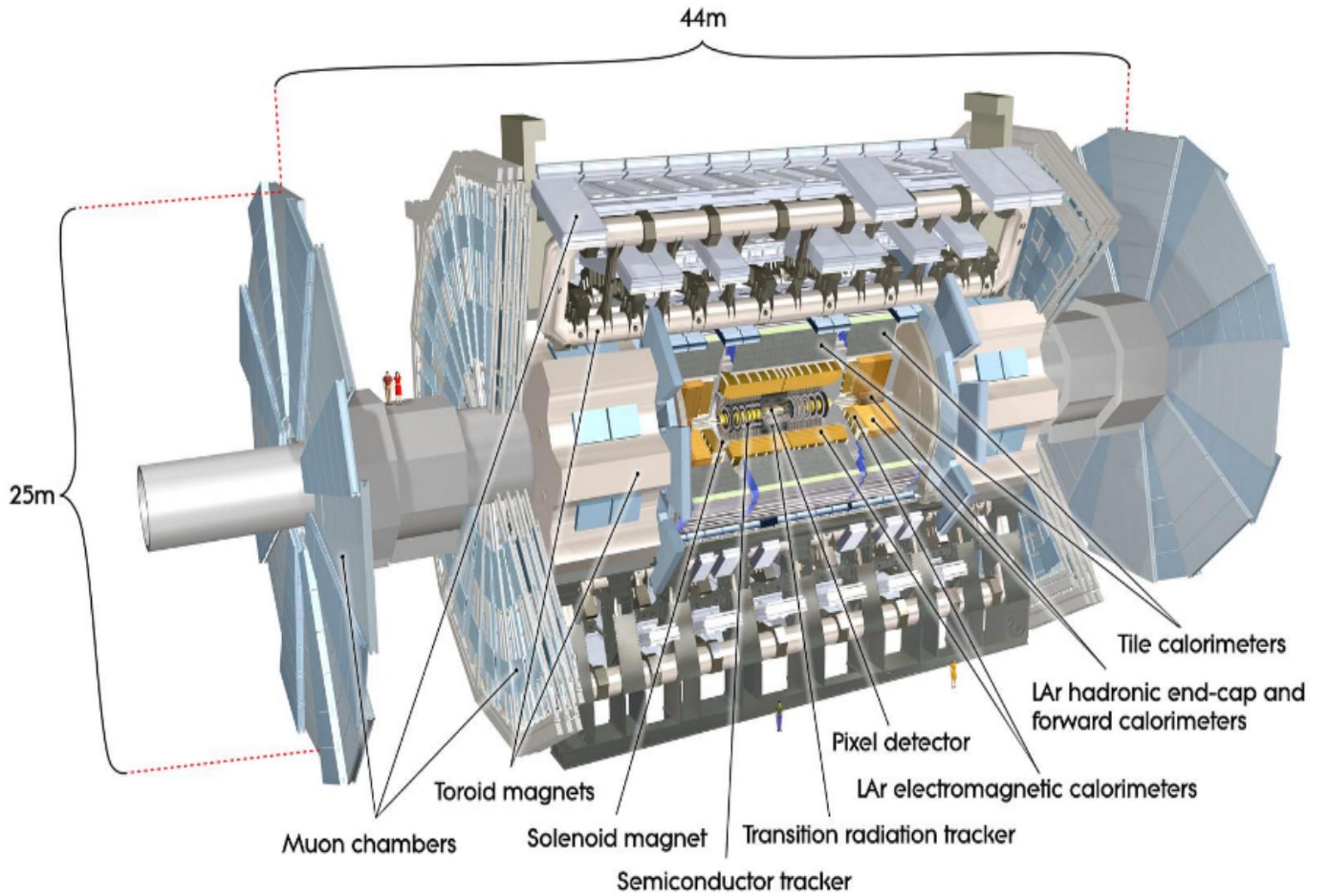
CERN's accelerator complex

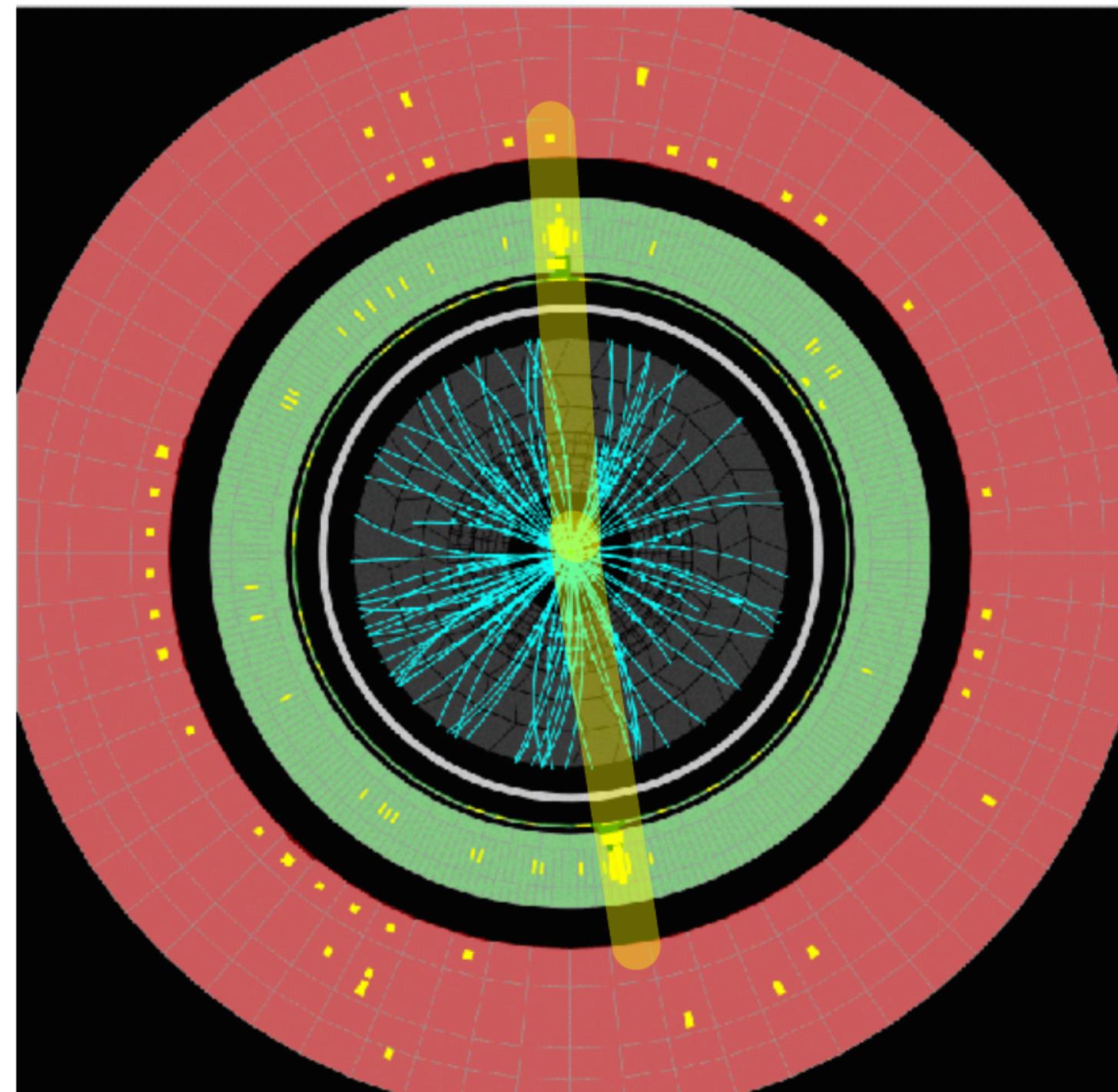


LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



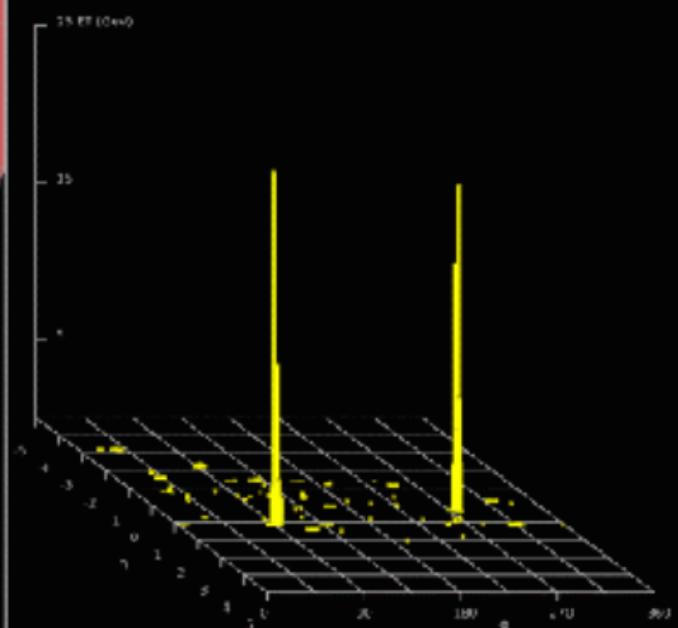




ATLAS EXPERIMENT

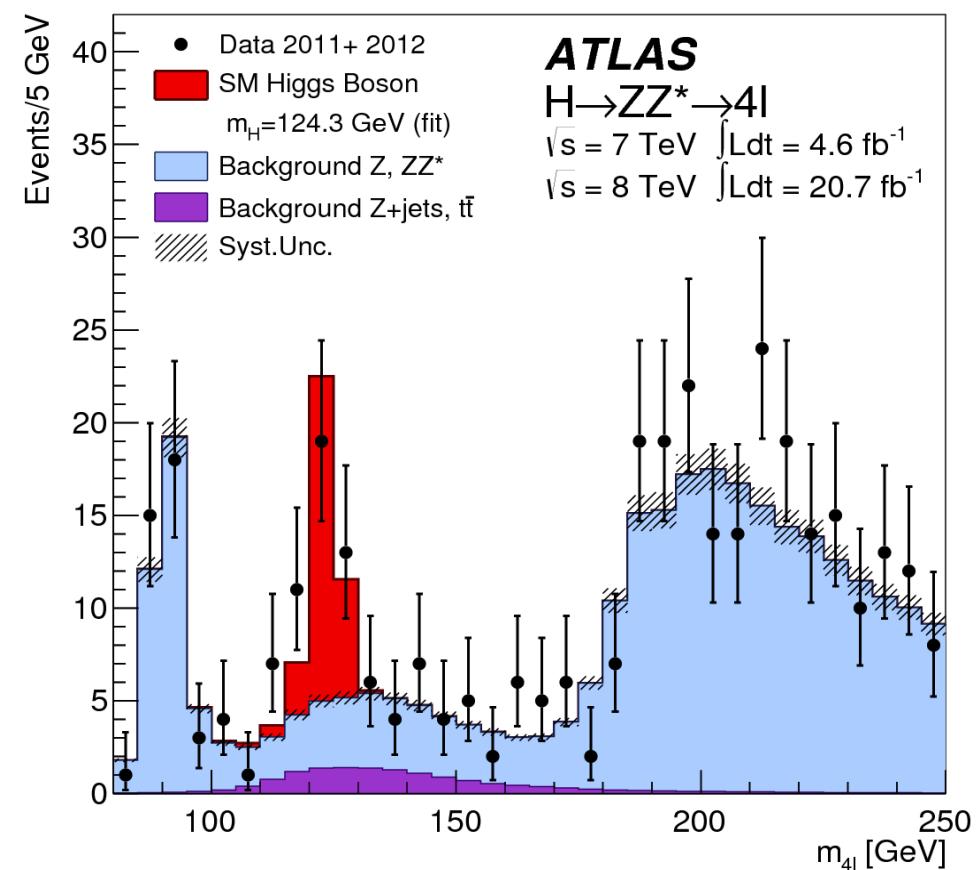
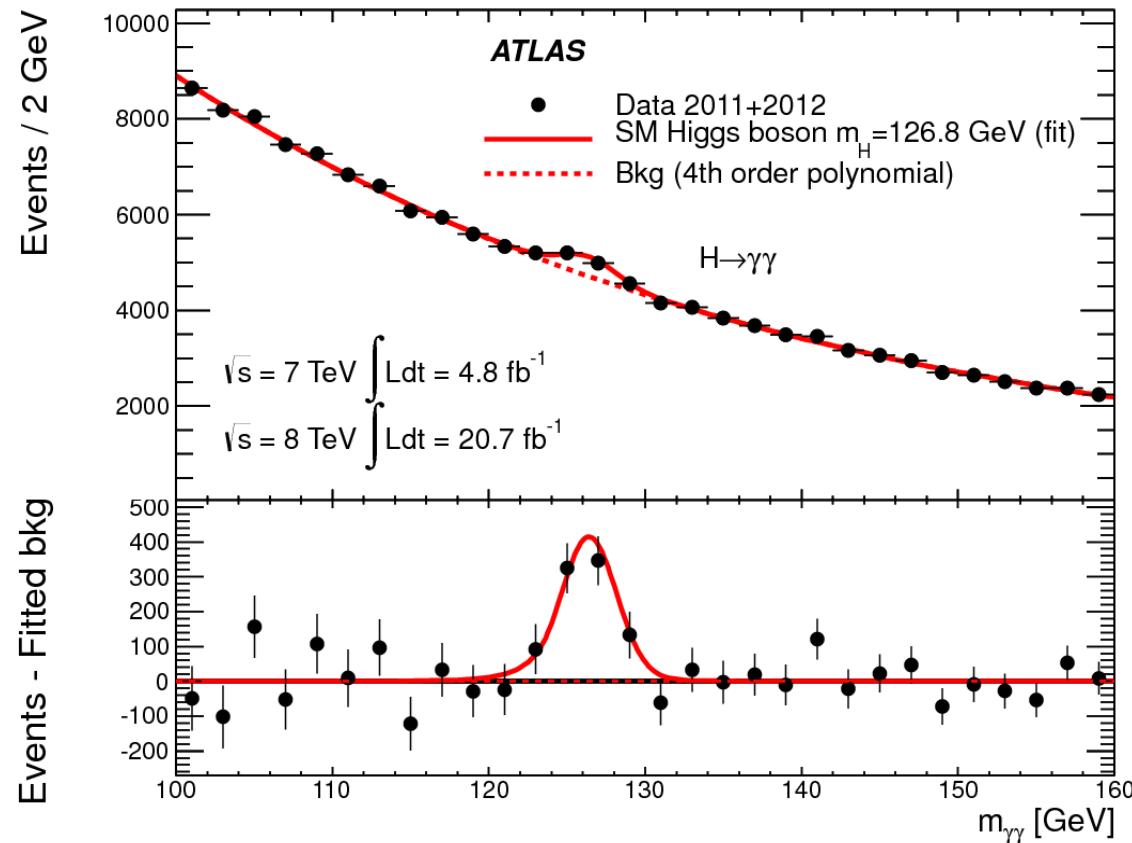
Run Number: 203779, Event Number: 56662314

Date: 2012-05-23 22:19:29 CEST



Entdeckung Juli 2012 in $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$

unabhängig bestätigt im ATLAS & CMS - Experiment Zerfallen



$\Rightarrow m_H = 125.4 \text{ GeV} ; J^P = 0^+$
und alle weiteren Eigenschaften im Einklang mit der
Erwartung für ein GSW - Higgsboson

G SW - Higgsboson

- genaue Vermessung von Zerfalls- und Produktionskanäle
- andere Eigenschaften: Spin, Parität
- nur 1 Higgsboson?

→ Theorien jenseits des Standardmodells

der Teilchenphysik

(einige Erweiterungen sehen 5 Higgsbosonen vor...)