Experimentelle Higgs-Massenschranken durch Präzisionsdaten

Marc Hoge

Sommerakademie Neubeuern 2008 Arbeitsgruppe 2 "Physik am Large Hadron Collider"

> Seminarvortrag 15. August 2008

• • • • • • • • • • • • •

-

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

2 Higgs-Physik am LEP

- LEP
- Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

< 🗇 🕨 < 🖃 🕨

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

Higgs-Physik am LEP I FP

• Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

• • • • • • • • • • • • •

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenz

Higgsmasse

• Im SM hat man Skalardoublet $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ im Potential

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^{\dagger} \Phi + \lambda (\Phi^{\dagger} \Phi)^2 \; .$$

• Spontane Symmetriebrechung im Fall $\mu^2 < 0$ und $\lambda > 0$. $V(\Phi)$ hat Minimum in

$$\Phi^{\dagger}\Phi=-rac{\mu^2}{2\lambda}=:rac{
u^2}{2}\;.$$

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenz

Higgsmasse

• Im SM hat man Skalardoublet $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ im Potential

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^{\dagger} \Phi + \lambda (\Phi^{\dagger} \Phi)^2 \; .$$

• Spontane Symmetriebrechung im Fall $\mu^2 < 0$ und $\lambda > 0$. $V(\Phi)$ hat Minimum in

$$\Phi^{\dagger}\Phi=-rac{\mu^2}{2\lambda}=:rac{
u^2}{2}\;.$$

Φ wird umparametrisiert als

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

mit dem Higgsfeld h(x).

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Higgsmasse

• Im SM hat man Skalardoublet $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ im Potential

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^{\dagger} \Phi + \lambda (\Phi^{\dagger} \Phi)^2 \; .$$

• Spontane Symmetriebrechung im Fall $\mu^2 < 0$ und $\lambda > 0$. $V(\Phi)$ hat Minimum in

$$\Phi^{\dagger}\Phi=-rac{\mu^2}{2\lambda}=:rac{
u^2}{2}\;.$$

Φ wird umparametrisiert als

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

mit dem Higgsfeld h(x).

Konsequenz

Das Higgs-Boson erhält selbst die Masse

$$m_H = v\sqrt{2\lambda}$$
.

• Aber: Higgsmasse wird durch Renormierung korrigiert.

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Renormierte Higgsmasse

- Betrachte zunächst nur die Higgs-Selbstwechselwirkung (keine WW mit Eichbosonen oder Fermionen).
- Kopplung λ ändert sich mit Energieskala Q gemäß

$$\frac{1}{Q}\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}Q}=\frac{3\lambda^2}{4\pi^2}\,. \qquad (\text{Renormierungsgruppengleichung})$$

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Renormierte Higgsmasse

- Betrachte zunächst nur die Higgs-Selbstwechselwirkung (keine WW mit Eichbosonen oder Fermionen).
- Kopplung λ ändert sich mit Energieskala Q gemäß

 $\frac{1}{Q} \frac{d\lambda}{dQ} = \frac{3\lambda^2}{4\pi^2}.$ (Renormierungsgruppengleichung)

Lösung ist

$$\lambda(\mathcal{Q}) = rac{\lambda(\mathcal{Q}_0)}{1 - rac{3\lambda(\mathcal{Q}_0)}{4\pi^2} \ln rac{\mathcal{Q}^2}{\mathcal{Q}_0^2}}$$

mit z.B. $Q_0 = v$ gewählt.

• $\lambda(Q)$ hat Polstelle bei $Q_{\text{Pol}} = Q_0 \exp \frac{2\pi^2}{3\lambda(Q_0)}$, sodass dort $\lambda(Q \to Q_{\text{Pol}}) \longrightarrow \infty$.

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Renormierte Higgsmasse

- Betrachte zunächst nur die Higgs-Selbstwechselwirkung (keine WW mit Eichbosonen oder Fermionen).
- Kopplung λ ändert sich mit Energieskala Q gemäß

 $\frac{1}{Q} \frac{d\lambda}{dQ} = \frac{3\lambda^2}{4\pi^2}.$ (Renormierungsgruppengleichung)

Lösung ist

$$\lambda(\mathcal{Q}) = rac{\lambda(\mathcal{Q}_0)}{1 - rac{3\lambda(\mathcal{Q}_0)}{4\pi^2} \ln rac{\mathcal{Q}^2}{\mathcal{Q}_0^2}}$$

mit z.B. $Q_0 = v$ gewählt.

- $\lambda(Q)$ hat Polstelle bei $Q_{Pol} = Q_0 \exp \frac{2\pi^2}{3\lambda(Q_0)}$, sodass dort $\lambda(Q \to Q_{Pol}) \longrightarrow \infty$.
- Forderung: Theorie soll bis zur Energieskala A keine divergente Kopplung haben!
- Mit $m_H = v \sqrt{2\lambda(Q)}$ ergibt sich dadurch die obere Schranke

$$m_H^2 < \frac{8\pi^2 v^2}{3 \ln \frac{\Lambda^2}{v^2}}$$
.

< 口 > < 同 > < 回 > < 回 > .

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Obere Schranken

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

- Für quantitativ sinnvolle Resultate muss WW mit Eichbosonen und Fermionen mitberücksichtigt werden.
- $\bullet\,$ Rechnung analog, aber deutlich komplizierter (\rightarrow laufende Kopplungen der anderes WWs).

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Obere Schranken

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

- Für quantitativ sinnvolle Resultate muss WW mit Eichbosonen und Fermionen mitberücksichtigt werden.
- $\bullet\,$ Rechnung analog, aber deutlich komplizierter (\rightarrow laufende Kopplungen der anderes WWs).
- Als genähertes Ergebnis bekommt man

Obere Schranken für die Higgsmasse $\Lambda = 10^{16} \text{ GeV}$ (GUT-Skala) \implies $m_H < 200 \text{ GeV}$, $\Lambda = 1 \text{ TeV}$ (Tevatron) \implies $m_H < 800 \text{ GeV}$.

Higgs-Physik am LEP Experimentelle Schranken durch LEP Schranken aus elektroschwachen Fits Zusammenfassung

Obere Schranken

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

- Für quantitativ sinnvolle Resultate muss WW mit Eichbosonen und Fermionen mitberücksichtigt werden.
- $\bullet\,$ Rechnung analog, aber deutlich komplizierter (\rightarrow laufende Kopplungen der anderes WWs).
- Als genähertes Ergebnis bekommt man

Obere Schranken für die Higgsmasse $\Lambda = 10^{16} \text{ GeV}$ (GUT-Skala) \implies $m_H < 200 \text{ GeV}$, $\Lambda = 1 \text{ TeV}$ (Tevatron) \implies $m_H < 800 \text{ GeV}$.

 Problem: Bei großem λ ist Störungstheorie nicht mehr sinnvoll. Eichtheorien auf dem Gitter bestätigen allerdings diese Resultate (numerisch).

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Vakuumstabilitätsgrenze

• Aus Vakuumstabilitäts-Bedingung

$$-\infty < V(v) < V(0) \iff \lambda > 0$$

(andernfalls keine spontane Symmetriebrechung mehr!) kann untere Massenschranke hergeleitet werden.

Untere Schranken für die Higgsmasse			
$\Lambda = 10^{16} \text{ GeV}$ (GUT-Skala)	\implies	$m_H > 130 { m GeV},$	
$\Lambda = 1 \text{ TeV}$ (Tevatron)	\implies	$m_H > 71 \mathrm{GeV}$.	

Trivialitätsgrenze Vakuumstabilitätsgrenze

Vakuumstabilitätsgrenze

Aus Vakuumstabilitäts-Bedingung

$$-\infty < V(\nu) < V(0) \iff \lambda > 0$$

(andernfalls keine spontane Symmetriebrechung mehr!) kann untere Massenschranke hergeleitet werden.

Untere Schranken für die Higgsmasse			
$\Lambda = 10^{16} \text{ GeV}$ (GUT-Skala)	\implies	$m_{H} > 130 \; { m GeV} ,$	
$\Lambda = 1 \text{ TeV}$ (Tevatron)	\implies	<i>m_H</i> > 71 GeV.	

• Zusammenfassend erhält man aus theoretischen Überlegungen

Masse des Higgs-Bosons

Die Masse *m_H* des Higgs-Bosons unterliegt den Einschränkungen

 $130 \text{ GeV} \leq m_H \leq 200 \text{ GeV},$

falls das Standardmodell bis zu Energien von 10¹⁶ GeV gültig ist.

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

2 Higgs-Physik am LEP

- LEP
- Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

• • • • • • • • • • • • •

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Der Large Electron-Positron Collider



- Speicherring mit 27 km Umfang.
- In Betrieb von 1989 bis 2000.
- Stattfindende Prozesse von der Form

 $e^+ + e^- \longrightarrow X + Y + \dots$

• Letzte Ausbaustufe (LEP2) erreichte Energien bis $\sqrt{s} = 209$ GeV.

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Der Large Electron-Positron Collider



- Vier Experimente: ALEPH, Delphi, L3, OPAL.
- Wichtigste Ergebnisse:
 - Messung der W- und Z-Massen
 - Existenz von genau drei leichten Neutrinosorten

- Speicherring mit 27 km Umfang.
- In Betrieb von 1989 bis 2000.
- Stattfindende Prozesse von der Form

 $e^+ + e^- \longrightarrow X + Y + \dots$

• Letzte Ausbaustufe (LEP2) erreichte Energien bis $\sqrt{s} = 209$ GeV.

• • • • • • • • • • • • •

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Higgs-Produktion

Mögliche Prozesse e^+ Ζ e^+ $\bar{\nu}_{e}$ e^+ W^+ Н Η Ζ W^{-} Η e⁻ **Higgs-Strahlung** W^+W^- -Fusion ZZ-Fusion

イロン イロン イヨン イヨン

크

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Higgs-Produktion

Mögliche Prozesse e^+ e⁺ e^+ W+ Η Z W-Η **Higgs-Strahlung** W^+W^- -Fusion ZZ-Fusion Nur Higgss = 206 GeV 1.8 1 Strahlung 1.6 Higgs-Strahlung + WW-Fusion + 1.4 QHiggs [pp] [dd] ZZ-Fusion Bei LEP-Energien 1.2 s661H0.8 $(\sqrt{s} \le 209 \text{ GeV})$ ist m_H = 50 GeV Higgs-Higgs-Strahlung der Strahlung 0.6 - Higgs-Strahlung + WW-Fusion + ZZ-Fusion 0.4 dominante Prozess. 115 0.2 10-3 0 90 100 110 120 130 60 70 80 100 200 300 400 500 600 700 800 m, [GeV] s [GeV]

イロト イ団ト イヨト イヨト

크

Higgs-Zerfall

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

• Ausführlicher im nächsten Vortrag von Philipp. Kurzer Vorgriff:



Higgs-Zerfall

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

• Ausführlicher im nächsten Vortrag von Philipp. Kurzer Vorgriff:



 Sehr leichtes Higgs (*m_H* < 50 GeV) hat viele Zerfallsmöglichkeiten. LEP1-Daten (1989-1995) implizieren aber

 $m_H > 63, 3 \text{ GeV}$ mit 95% CL.

• Für LEP2 daher nur Zerfälle oberhalb dieser Massengrenze interessant.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 >

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Zerfallsbreite $\Gamma(H)$



- Zerfall überwiegend in die schwersten kinematisch möglichen Teilchen.
- Masselose Endzustände quasi bedeutungslos.

A B > A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A B >
 A

LEP Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Verzweigungsverhältnisse Br(H)



- Bis zu $m_H = 140 \text{ GeV}$ Zerfall vorwiegend in $b\bar{b}$ -Paare.
- Oberhalb von *m_H* = 140 GeV fast ausschließlich in *W⁺W⁻*- und *ZZ*-Paare, bei LEP aber kinematisch nicht möglich.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 >

Eventgewichte und Spaghetti Plots ikelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Jonfidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

2 Higgs-Physik am LEP

- LEP
- Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Eventgewichte

Probleme beim Higgsnachweis

Higgs kann nicht direkt, sondern nur dessen Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Daher:

- Nicht *m_H* kann gemessen werden, sondern nur die aus den Zerfallsprodukten rekonstruierte Masse *m*_{rec}.
- Durch beschränkte Detektorauflösung oder nicht detektierte Teilchen (Neutrinos) unterscheiden sich *m*_{rec} und *m*_H im Allgemeinen.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Eventgewichte

Probleme beim Higgsnachweis

Higgs kann nicht direkt, sondern nur dessen Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Daher:

- Nicht *m_H* kann gemessen werden, sondern nur die aus den Zerfallsprodukten rekonstruierte Masse *m*_{rec}.
- Durch beschränkte Detektorauflösung oder nicht detektierte Teilchen (Neutrinos) unterscheiden sich m_{rec} und m_H im Allgemeinen.

FRAGE: Wie signifikant ist ein bestimmtes Higgs-Event?

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • •

Eventgewichte

Probleme beim Higgsnachweis

Higgs kann nicht direkt, sondern nur dessen Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Daher:

- Nicht *m_H* kann gemessen werden, sondern nur die aus den Zerfallsprodukten rekonstruierte Masse *m*_{rec}.
- Durch beschränkte Detektorauflösung oder nicht detektierte Teilchen (Neutrinos) unterscheiden sich m_{rec} und m_H im Allgemeinen.

FRAGE: Wie signifikant ist ein bestimmtes Higgs-Event?

Eventgewicht μ

Die wahre Higgsmasse sei (hypothetisch) m_H . Sei $s(m_H, m_{rec})$ die erwartete Zahl von Higgsereignissen mit rekonstruierter Masse m_{rec} . $b(m_{rec})$ sei der erwartete Hintergrund. Dann setzt man

$$\mu(m_H, m_{
m rec}) := \ln\left(1 + rac{s(m_H, m_{
m rec})}{b(m_{
m rec})}
ight)$$

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Eventgewichte

Probleme beim Higgsnachweis

Higgs kann nicht direkt, sondern nur dessen Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Daher:

- Nicht *m_H* kann gemessen werden, sondern nur die aus den Zerfallsprodukten rekonstruierte Masse *m*_{rec}.
- Durch beschränkte Detektorauflösung oder nicht detektierte Teilchen (Neutrinos) unterscheiden sich *m*_{rec} und *m*_H im Allgemeinen.

FRAGE: Wie signifikant ist ein bestimmtes Higgs-Event?

Eventgewicht μ

Die wahre Higgsmasse sei (hypothetisch) m_H . Sei $s(m_H, m_{rec})$ die erwartete Zahl von Higgsereignissen mit rekonstruierter Masse m_{rec} . $b(m_{rec})$ sei der erwartete Hintergrund. Dann setzt man

$$\mu(m_H, m_{
m rec}) := \ln\left(1 + rac{s(m_H, m_{
m rec})}{b(m_{
m rec})}
ight)$$

ALSO: Event mit m_{rec} spricht mit Gewicht $\mu(m_H, m_{\text{rec}})$ für die Hypothese m_H .

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

イロト イヨト イヨト イヨト

Eventgewichte

Higgsevent mit $m_{rec} = 110 \text{ GeV}$ und $m_H = 100, 110, 120 \text{ GeV}$:



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Eventgewichte

Higgsevent mit $m_{rec} = 110 \text{ GeV}$ und $m_H = 100, 110, 120 \text{ GeV}$:



Hypothesentest

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

FRAGE: Wie kann man entscheiden, ob man ein Teilchen "sieht"?

Hypothesentest

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

FRAGE: Wie kann man entscheiden, ob man ein Teilchen "sieht"?

Zwei Hypothesen

Experiment soll entscheiden zwischen

- Hintergrund (b)-Hypothese oder
- Signal plus Hintergrund (*s* + *b*)-Hypothese.

Hypothesentest

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

FRAGE: Wie kann man entscheiden, ob man ein Teilchen "sieht"?

Zwei Hypothesen

Experiment soll entscheiden zwischen

- Hintergrund (b)-Hypothese oder
- Signal plus Hintergrund (*s* + *b*)-Hypothese.

Idee: Führe wie folgt einen Hypothesentest durch.

- Definiere eine Testgröße als Funktion von s und b.
- *m_H* taucht als Parameter dieser Funktion auf.

Hypothesentest

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

FRAGE: Wie kann man entscheiden, ob man ein Teilchen "sieht"?

Zwei Hypothesen

Experiment soll entscheiden zwischen

- Hintergrund (b)-Hypothese oder
- Signal plus Hintergrund (*s* + *b*)-Hypothese.

Idee: Führe wie folgt einen Hypothesentest durch.

- Definiere eine Testgröße als Funktion von s und b.
- *m_H* taucht als Parameter dieser Funktion auf.
- Wert der Funktion unterscheidet zwischen wenig und sehr signalartig.
- Entdeckung oder Ausschluss kann im Rahmen einer Signifikanz bestimmt werden.

Hypothesentest

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

・ ロ ト ・ 同 ト ・ 回 ト ・ 回 ト

FRAGE: Wie kann man entscheiden, ob man ein Teilchen "sieht"?

Zwei Hypothesen

Experiment soll entscheiden zwischen

- Hintergrund (b)-Hypothese oder
- Signal plus Hintergrund (s + b)-Hypothese.

Idee: Führe wie folgt einen Hypothesentest durch.

- Definiere eine Testgröße als Funktion von s und b.
- *m_H* taucht als Parameter dieser Funktion auf.
- Wert der Funktion unterscheidet zwischen wenig und sehr signalartig.
- Entdeckung oder Ausschluss kann im Rahmen einer Signifikanz bestimmt werden.
- Vermeide fälschliche Entdeckung eines nicht vorhandenen Signals! (Fehler erster Art)
- Vermeide fälschlichen Ausschluss eines vorhandenen Signals! (Fehler zweiter Art)

Likelihood-Quotient

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Neyman-Pearson-Theorem

Beste Testgröße (Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Fehler erster und zweiter Art) ist

$$q(m_H) := \frac{\mathcal{L}(s(m_H) + b; n)}{\mathcal{L}(b; n)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{L}(\mu; n) := \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$
Likelihood-Quotient

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelinood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Neyman-Pearson-Theorem

Beste Testgröße (Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Fehler erster und zweiter Art) ist

$$q(m_H) := \frac{\mathcal{L}(s(m_H) + b; n)}{\mathcal{L}(b; n)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{L}(\mu; n) := \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}.$$

- $\mathcal{L}(\mu; n)$ ist Poisson-Wahrscheinlichkeit.
- Vorteil von $q(m_H)$: Bei N unabhängigen Messungen leicht verallgemeinerbar zu

$$Q(m_H) = \prod_{i=1}^N q_i(m_H)$$

Likelihood-Quotient

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Neyman-Pearson-Theorem

Beste Testgröße (Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Fehler erster und zweiter Art) ist

$$q(m_H) := \frac{\mathcal{L}(s(m_H) + b; n)}{\mathcal{L}(b; n)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{L}(\mu; n) := \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$

- $\mathcal{L}(\mu; n)$ ist Poisson-Wahrscheinlichkeit.
- Vorteil von $q(m_H)$: Bei N unabhängigen Messungen leicht verallgemeinerbar zu

$$\begin{aligned} \mathcal{Q}(m_H) &= \prod_{i=1}^N q_i(m_H) \\ \iff -2\ln(\mathcal{Q}) &= 2s_{\text{tot}} - 2\sum_{i=1}^N n_i \ln\left(1 + \frac{s_i}{b_i}\right) = 2s_{\text{tot}} - \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \,. \end{aligned}$$

• Gewichtete Summe über Ereigniszahlen.

Likelihood-Quotient

Neyman-Pearson-Theorem

Beste Testgröße (Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Fehler erster und zweiter Art) ist

$$q(m_H) := \frac{\mathcal{L}(s(m_H) + b; n)}{\mathcal{L}(b; n)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{L}(\mu; n) := \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}.$$

- $\mathcal{L}(\mu; n)$ ist Poisson-Wahrscheinlichkeit.
- Vorteil von q(m_H): Bei N unabhängigen Messungen leicht verallgemeinerbar zu

$$\begin{aligned} \mathcal{Q}(m_H) &= \prod_{i=1}^N q_i(m_H) \\ \iff -2\ln(\mathcal{Q}) &= 2s_{\text{tot}} - 2\sum_{i=1}^N n_i \ln\left(1 + \frac{s_i}{b_i}\right) = 2s_{\text{tot}} - \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \,. \end{aligned}$$

- Gewichtete Summe über Ereigniszahlen.
- Interpretation:

Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (p.d.f.)



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (p.d.f.)



p.d.f. gibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung von $-2 \ln Q$ an.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

p.d.f. von (s+b)- und (b)-Experiment

• Simulation wie eben, nur mit Signal liefert



 p.d.f.'s der beiden Hypothesen geben Aufschluss über "Entscheidungsvermögen" des Detektors.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Signal-Background Separation Power I



- Leichtes Higgs bedeutet höherer Wirkungsquerschnitt bei Produktion
 Signal und Hintergrund besser trennbar.
- Schweres Higgs bedeutet weniger Ereignisse ⇒ schlechte Trennbarkeit.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Signal-Background Separation Power II

- Erwartungswerte der p.d.f. geben Aufschluss über "Separation Power".
- Hier zusätzlich geplottet: Künstliches (m_H = 115 GeV)-Signal auf den Hintergrund. Man sieht:
 - Breites Minimum um 115 GeV herum,
 - Entsprechung mit (s+b)-Hypothese bei $m_H = 115$ GeV.



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

LEP-Ergebnisse



- Breites Minimum bei $m_H \sim 115 118$ GeV.
- Schnitt mit der (s+b)-Erwartung bei m_H ~ 116 GeV.

• • • • • • • • • • • •

-

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

LEP-Ergebnisse



- Breites Minimum bei $m_H \sim 115 118$ GeV.
- Schnitt mit der (s+b)-Erwartung bei m_H ~ 116 GeV.

Ergebnis:

 Möglichkeit eines SM-Higgsbosons in diesem Bereich, aber mit weniger als 2σ Signifikanz.

A B A B A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

イロト イヨト イヨト イヨト

LEP-Ergebnisse der einzelnen Experimente



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

LEP-Ergebnisse der einzelnen Experimente



 Nur ALEPH-Experiment sieht Signal (3σ Signifikanz).

- Tatsächlich nur im 4-Jet-Kanal sichtbar.
- Andere Detektoren können (s+b)-Hypothese nicht bestätigen.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

イロト イ団ト イヨト イヨト

크

Confidence Levels I





Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quofient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Confidence Levels I





• Dann ist 1 - CL_b ein Maß für die Plausibilität der (b)-Hypothese, denn

$1 - CL_b$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein reines (b)-Experiment eine mehr (s+b)-artige Likelihood produziert als die gemesse, ist gerade $1 - CL_b$.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quofient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Confidence Levels I





• Dann ist 1 - CL_b ein Maß für die Plausibilität der (b)-Hypothese, denn

$1 - CL_b$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein reines (b)-Experiment eine mehr (s+b)-artige Likelihood produziert als die gemesse, ist gerade $1 - CL_b$.

• Es gilt
$$\langle 1 - CL_b \rangle_b = 0, 5$$
 und

$$\begin{cases} 1 - CL_b < 0.5 \implies \text{Überfluktuation} \\ 1 - CL_b > 0.5 \implies \text{Unterfluktuation} \end{cases}$$

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Confidence Levels II

• Umgekehrte Frage: Wie plausibel ist die (s+b)-Hypothese?



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

3

Confidence Levels II

• Umgekehrte Frage: Wie plausibel ist die (s+b)-Hypothese?



• Man hat CL_{s+b} als Maß für die Plausibilität der (s+b)-Hypothese.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

Confidence Levels II

• Umgekehrte Frage: Wie plausibel ist die (s+b)-Hypothese?



- Man hat CL_{s+b} als Maß für die Plausibilität der (s+b)-Hypothese.
- ABER: Dies ist nicht das Confidence Level CL_s des Signals! \longrightarrow Relative Fluktuationen des Hintergrunds

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• • • • • • • • • • • • •

Confidence Levels II

• Umgekehrte Frage: Wie plausibel ist die (s+b)-Hypothese?



- Man hat CL_{s+b} als Maß für die Plausibilität der (s+b)-Hypothese.
- ABER: Dies ist nicht das Confidence Level CL_s des Signals! \longrightarrow Relative Fluktuationen des Hintergrunds
- CLs ist nicht direkt messbar man definiert

$$CL_s := \frac{CL_{s+b}}{CL_b}$$
.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Teilchenentdeckung und -ausschluss

- Teilchen*entdeckung* heißt $(1 CL_b)$ hinreichend klein.
- Teilchen*ausschluss* heißt *CL_s* hinreichend klein.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Teilchenentdeckung und -ausschluss

- Teilchen *entdeckung* heißt $(1 CL_b)$ hinreichend klein.
- Teilchen*ausschluss* heißt *CL_s* hinreichend klein.

Definition / Konvention

• Ein Teilchen gilt als entdeckt, falls

$$1 - CL_b \leq 5, 7 \cdot 10^{-7} \qquad (\stackrel{\wedge}{=} 5\sigma).$$

• Die Existenz eines Teilchens gilt als ausgeschlossen, falls

 $CL_s \leq 0,05$ (95% Confidence Level).

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

1 – CL_b bei LEP I

• Kombinierte LEP-p.d.f.'s für $m_H = 116$ und 110 GeV:



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• Kombinierte LEP-p.d.f.'s für $m_H = 116$ und 110 GeV:





• $1 - CL_b = 0,099$

 $1 - CL_b$ bei LEP I

- Mit ca. 9,9% Wahrscheinlichkeit würde reines (b)-Experiment so (s+b)-artig aussehen.
- Higgs mit 116 GeV möglich, aber weniger als 2σ Signifikanz.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

• Kombinierte LEP-p.d.f.'s für $m_H = 116$ und 110 GeV:



• $1 - CL_b = 0,099$

 $1 - CL_b$ bei LEP I

- Mit ca. 9,9% Wahrscheinlichkeit würde reines (b)-Experiment so (s+b)-artig aussehen.
- Higgs mit 116 GeV möglich, aber weniger als 2σ Signifikanz.



- Deutlich inkompatibel mit (s+b)-Hypothese.
- $CL_s \longrightarrow 0$.
- Kein Higgs mit 110 GeV.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

イロト イ団ト イヨト イヨト

1 – CL_b bei LEP II



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

1 – CL_b bei LEP II



- Wieder: Kompatibilität mit Higgs bei ~ 116 GeV,
- aber Signifikanz kleiner als 2σ .

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

1 – CL_b bei LEP II



- Sesitivität von LEP für 3σ -Nachweis reicht nur bis $m_H = 115$ GeV.
- Entsprechend für 2σ -Nachweis nur bis $m_H = 116$ GeV.

Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

A B A B A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

Die "Exclusion Power" von LEP

• Der entscheidende Plot der LEP-Higgssuche:



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

A B A B A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

Die "Exclusion Power" von LEP

• Der entscheidende Plot der LEP-Higgssuche:



Eventgewichte und Spaghetti Plots Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Confidence Levels Ergebnisse von LEP

Die "Exclusion Power" von LEP

• Der entscheidende Plot der LEP-Higgssuche:



Ergebnis

- LEP schließt bei 95% CL ein SM-Higgsboson mit einer Masse unter 114,4 GeV aus.
- Die Sensitivität reichte aus, um ein Higgs mit 115,3 GeV auszuschließen.

A B A B A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 B
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

Higgs-Physik am LEP I FP

• Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

• • • • • • • • • • • •

W-Masse

- Bisher weltweit \sim 0 direkte Higgsfunde.
- Einzige direkte Aussage: m_H > 114, 4 GeV (LEP)

イロト イ団ト イヨト イヨト

크

W-Masse

- Bisher weltweit \sim 0 direkte Higgsfunde.
- Einzige direkte Aussage: m_H > 114, 4 GeV (LEP)

ABER

Wert der Higgsmasse hat Einfluss auf elektroschwache Observablen!

W-Masse

- Bisher weltweit \sim 0 direkte Higgsfunde.
- Einzige direkte Aussage: m_H > 114, 4 GeV (LEP)

ABER Wert der Higgsmasse hat Einfluss auf elektroschwache Observablen! • Strahlungskorrekturen zur W-Masse durch W[±] W[±] W[±] W[±] W[±]

• • • • • • • • • • • • •

W-Masse

- Bisher weltweit \sim 0 direkte Higgsfunde.
- Einzige direkte Aussage: m_H > 114, 4 GeV (LEP)

ABER

Wert der Higgsmasse hat Einfluss auf elektroschwache Observablen!

• Strahlungskorrekturen zur W-Masse durch



Man erhält

$$m_{W}^{2} = \frac{m_{Z}^{2}}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\sqrt{2} \pi \alpha}{G_{F} m_{Z}^{2}} \frac{1}{1 - \Delta r}} \right)$$

mit elektroschwachen Korrekturen Δr .

Elektroschwache Korrekturen

Korrekturen Δr bestehen aus

• QED-Korrekturen $\Delta \alpha$ aus laufender elektromagnetischer Kopplung α .

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >
Elektroschwache Korrekturen

Korrekturen Δr bestehen aus

- QED-Korrekturen $\Delta \alpha$ aus laufender elektromagnetischer Kopplung α .
- QCD-Korrekturen Δr_{QCD} durch Polarisationsgraphen mit umlaufendem $t\bar{b}$ -Paar

$$\Delta r_{\text{QCD}} = \frac{\cos^2 \theta_W}{\sin^2 \theta_W} \frac{3G_F}{8\pi^2 \sqrt{2}} m_t^2 + \dots$$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Elektroschwache Korrekturen

Korrekturen Δr bestehen aus

- QED-Korrekturen $\Delta \alpha$ aus laufender elektromagnetischer Kopplung α .
- QCD-Korrekturen Δr_{QCD} durch Polarisationsgraphen mit umlaufendem $t\bar{b}$ -Paar

$$\Delta r_{ ext{QCD}} = rac{\cos^2 heta_w}{\sin^2 heta_w} \, rac{3G_F}{8\pi^2 \sqrt{2}} \, m_t^2 + \dots \, .$$

• Higgssektor-Korrekturen Δr_{Higgs} durch obige Schleifengraphen

$$\Delta r_{\rm Higgs} = \frac{3\sqrt{2} \, G_F \, m_W^2}{16\pi^2} \, \left(\ln \frac{m_H^2}{m_W^2} - \frac{5}{6} \right)$$

Elektroschwache Korrekturen

Korrekturen Δr bestehen aus

- QED-Korrekturen $\Delta \alpha$ aus laufender elektromagnetischer Kopplung α .
- QCD-Korrekturen Δr_{QCD} durch Polarisationsgraphen mit umlaufendem $t\bar{b}$ -Paar

$$\Delta r_{ ext{QCD}} = rac{\cos^2 heta_w}{\sin^2 heta_w} \, rac{3G_F}{8\pi^2 \sqrt{2}} \, m_t^2 + \dots \, .$$

• Higgssektor-Korrekturen Δr_{Higgs} durch obige Schleifengraphen

$$\Delta r_{\text{Higgs}} = \frac{3\sqrt{2} \, G_F \, m_W^2}{16\pi^2} \, \left(\ln \frac{m_H^2}{m_W^2} - \frac{5}{6} \right)$$

Insgesamt

$$\Delta r = \Delta lpha + C_{
m QCD} \cdot m_t^2 + C_{
m Higgs} \cdot \ln rac{m_H^2}{m_W^2}$$

Elektroschwache Korrekturen

Korrekturen Δr bestehen aus

- QED-Korrekturen $\Delta \alpha$ aus laufender elektromagnetischer Kopplung α .
- QCD-Korrekturen Δr_{QCD} durch Polarisationsgraphen mit umlaufendem $t\bar{b}$ -Paar

$$\Delta r_{ ext{QCD}} = rac{\cos^2 heta_w}{\sin^2 heta_w} \, rac{3G_F}{8\pi^2 \sqrt{2}} \, m_t^2 + \dots \, .$$

• Higgssektor-Korrekturen Δr_{Higgs} durch obige Schleifengraphen

$$\Delta r_{\text{Higgs}} = \frac{3\sqrt{2} \, G_F \, m_W^2}{16\pi^2} \, \left(\ln \frac{m_H^2}{m_W^2} - \frac{5}{6} \right)$$

Insgesamt

$$\Delta r = \Delta lpha + C_{ ext{QCD}} \cdot m_t^2 + C_{ ext{Higgs}} \cdot \ln rac{m_H^2}{m_W^2}$$

• Abhängigkeit von Top-Masse erhelblich stärker als von Higgs-Masse.

• Daher: Fit von m_H mit großer Unsicherheit behaftet.

Higgsmassen-Fit

• Präzisionsmessungen (von LEP u.a.) zeigen aktuell

 $m_{W} = (80, 398 \pm 0, 025) \text{ GeV}$ $m_{t} = (171, 2 \pm 2, 1) \text{ GeV}$

イロト イ団ト イヨト イヨト

크

Higgsmassen-Fit

• Präzisionsmessungen (von LEP u.a.) zeigen aktuell

 $m_W = (80, 398 \pm 0, 025) \text{ GeV}$ $m_t = (171, 2 \pm 2, 1) \text{ GeV}$

• Damit bekommt man durch χ^2 -Fits den

Higgsmassen-Bereich

Das SM-Higgs-Boson hat bei 68% Confidence Level eine Masse von

$$m_{H}=88^{+53}_{-35}~{
m GeV}$$
 .

Higgsmassen-Fit

• Präzisionsmessungen (von LEP u.a.) zeigen aktuell

 $m_W = (80, 398 \pm 0, 025) \text{ GeV} \ m_t = (171, 2 \pm 2, 1) \text{ GeV}$

• Damit bekommt man durch χ^2 -Fits den

Higgsmassen-Bereich

Das SM-Higgs-Boson hat bei 68% Confidence Level eine Masse von

$$m_{H}=88^{+53}_{-35}~{
m GeV}$$
 .

Außerdem gilt bei 95% CL

 $m_{H} < 196 \,\,{
m GeV}$.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

Übersicht

Theoretische Schranken

- Trivialitätsgrenze
- Vakuumstabilitätsgrenze

Higgs-Physik am LEP I FP

• Higgs-Produktion und -Zerfall bei LEP

Experimentelle Schranken durch LEP

- Eventgewichte und Spaghetti Plots
- Likelihood-Quotient und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Confidence Levels
- Ergebnisse von LEP

4 Schranken aus elektroschwachen Fits

Zusammenfassung

Higgs-Massenschranken

Theoretische MassenschrankenVoraussetzung: SM sei gültig bei Energien bis zur Planck-Skala.Dann gilt130 GeV $\leq m_H \leq 200$ GeV.

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

æ

Higgs-Massenschranken

Theoretische Massenschranken

Voraussetzung: SM sei gültig bei Energien bis zur Planck-Skala.

Dann gilt

 $130 \text{ GeV} \leq m_H \leq 200 \text{ GeV}.$

Experimentelle Massenschranken

• Direkte Beobachtung bei LEP liefert Nullresultat. Daraus

 $m_H > 114, 4 \text{ GeV}$.

• Indirekte Beobachtung aus elektroschwachen Präzisionsdaten liefert

 $m_H = 88^{+53}_{-35} \text{ GeV}$ sowie $m_H < 196 \text{ GeV}$.

< ロ > < 同 > < 三 > < 三 > -

Higgs-Massenschranken

Theoretische Massenschranken

Voraussetzung: SM sei gültig bei Energien bis zur Planck-Skala.

Dann gilt

 $130 \text{ GeV} \leq m_H \leq 200 \text{ GeV}.$

Experimentelle Massenschranken

• Direkte Beobachtung bei LEP liefert Nullresultat. Daraus

 $m_H > 114, 4 \text{ GeV}$.

• Indirekte Beobachtung aus elektroschwachen Präzisionsdaten liefert

 $m_H = 88^{+53}_{-35} \text{ GeV}$ sowie $m_H < 196 \text{ GeV}$.

Fazit Good luck, LHC!