

# Entdeckung des Top Quarks

## Handout

von Alexis Descroix

Seit der Entdeckung des Bottom Quarks in 1977 in Fermilab (Chicago) hat man versucht für das Bottom einen Partner zu finden. Erst die Theorie und auch experimentelle Nachweise haben Zeichen angedeutet, dass es ein geben soll.

Fast 20 Jahre waren dann nötig, um einen richtigen Beweis im Jahr 1995 in Fermilab um seine Existenz zu zeigen. Verschiedene Hindernisse mussten durch technischen Fortschritt überschritten werden, um das schwerste und trotzdem das versteckteste Quark – ein der letzten Lücken im Standard-Modell - zu entdecken.

### Warum muss es ein Top geben?

Weil es ein Bottom gibt, muss es ein Top geben. In 1973 haben Kobayashi und Maskawa die Cabibbo's Matrix zu 3·3-Dimensional vergrößert, um die CP-Verletzung zu erklären. Daher haben sie ein Quark Paar (noch nicht Bottom und Top genannt) eingeführt. Natürlich bedeutet es nicht, dass dies richtig sein musste, sondern dass man so die Materie beschreiben kann und, dass man ein Partner für Bottom finden muss, wenn man die Existenz des Bottoms beweisen kann. Tatsächlich, um keine Symmetrie zu verletzen, nach der GSW-Theorie, müssen alle Leptonen durch ein gefärbtes Quark-Dublett begleitet werden.

Dies gilt für den theoretischen Grund. Ein experimenteller Grund ist die Tatsache, dass Bottom, nach der CKM-Matrix in einem ohne-Top Standard Model (wobei Bottom dann ein Isospin Singulett ist) mit einer unvernachlässigbaren Wahrscheinlichkeit leptonisch zerfallen kann. Dies wurde durch genaue Messungen ausgeschlossen. Später wurde es noch durch Messungen von einer Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie in der  $e^+ e^- \rightarrow b \bar{b}$  Reaktion bestätigt.

$$A = \frac{N^F - N^B}{N^F + N^B}$$

Dies misst die Asymmetrie in den Bottomzerfällen, wobei  $N^F(N^B)$  für die Anzahl der Fermionen (Antifermionen) die in der Richtung des Elektrons zerfallen, steht. Es muss keine Asymmetrie geben, wenn Bottom ein Isospin Singulett ist. Man hat aber eine unvernachlässigbare Asymmetrie gemessen  $-(22,8 \pm 6,0 \pm 2,5)\%$  dann muss es ein Top geben.

### Wie tritt das Top auf?

Wegen seine hohe Masse muss man Teilchen bei sehr hoher Energie stoßen, um Top zu erzeugen. In Fermilab durch Protonen-Antiprotonen Stößen mit einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 1,96$  TeV hat man das geschafft.

Man erzeugt Top entweder als Paar durch Quarksvernichtung oder durch Gluonenvernichtung oder allein durch schwache Wechselwirkung. In TeVatron wird das Top besonders (85%) als Paar durch Quarksvernichtung erzeugt mit dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma = 6,8_{-2,4}^{+3,6}$  pb.

Die Häufigkeit des Solo-Top Kanals ist zu klein, um benutzt zu werden.

## Wie zerfällt das Top und wie erkennt man das Top?

Wegen seiner hohen Masse zerfällt das Top sehr schnell ( $\sim 10^{-25}$ s) und kann dann sich nicht mit anderen Quarks durch starke Wechselwirkung Mesonen oder Hadronen auftreten. Normalerweise erzeugen alle Quarks ein Hadronisierungsjet („Jet“ weiter genannt) in den man wichtige Informationen verliert (Spin, Parität, usw ...). Mit dem Top werden solche Messungen verfügbar.

Das Top zerfällt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in Bottom und W-Boson  $t \rightarrow b + W$ . Wie oben beschrieben zerfällt das Top sehr schnell. Deswegen kann man das Top nur durch Erkennung seiner Spur beobachten: Das Bottom erzeugt ein Jet, und das W zerfällt auch und erzeugt entweder 2 Quarks oder ein Lepton mit seinem Neutrino.

$$b \rightarrow \text{Jet } b \text{ und } W^{\pm} \rightarrow l + \nu \text{ oder } W^{\pm} \rightarrow q + \bar{q}$$

Das Top wird immer als Paar erzeugt, das heißt dass es immer 2 Bottoms und 2 W-Bosonen in einem Top Ereignis gibt.

Abhängig von dem Zerfall des W-Bosons wird man 3 verschiedene Kanäle beobachten:

- dileptonischer Kanal, wenn beide W-Bosonen als Leptonen zerfallen
- lepton + Jet Kanal, wenn ein W als Lepton und das andere als Quarks zerfallen
- hadronischer Kanal, wenn beide W-Bosonen als Quarks zerfallen

Man wird dann Filter benutzen, um einen besonderen Kanal zu auswählen:

- im Dileptonischen Kanal erwartet man:
  - 2 Leptonen
  - Energieverlust (wegen der Neutrinos, die nur indirekt messbar sind)
  - 2 Bottom-Jets
- im Lepton + Jet Kanal:
  - 1 Lepton
  - Energieverlust
  - 2 Bottom-Jets + 2 Jets
- im Hadronischen Kanal:
  - 2 Bottom-Jets + 4 Jets

Den letzten Kanal hat man weniger zur Entdeckung benutzt, weil er viel mehr Jets enthält. Das Problem mit den Jets ist, dass sie sehr komplex aussehen und, dass sie sehr oft mit dem Untergrund verwechselt werden.

## Untergrund? Warum? Wie hoch? Wie sich vom Untergrund befreien (b-Tagging)?

Warum hat man so lang gebraucht, um die Entdeckung des Tops behaupten zu können? Weil die Statistik seiner Erzeugung in Fermilab zu niedrig ist und, weil die Wahrscheinlichkeit, dass man mit anderen Ereignissen verwechselt sehr hoch ist. Alle diese Ereignisse, die sehr ähnlich im Detektor nach dem Gesuchten aussehen, nennt man „Untergrund“. Man hat besonderen technischen Fortschritt gebraucht, um sich vom Untergrund „befreien“ zu können.

## SVX und SLT b-Tagging

SVX (Secondary Vertex Detektor) ermöglicht die Erkennung der Bottom-Jets. Die Bottoms fließen  $\sim 10^{-12}$ s als Meson und dann zerfallen und erzeugen einen Jet: man kann Unterschied in den Ursprüngen beobachten, die typische Bottom sind. Damit kann man die Bottom-Jets erkennen und damit die Erkennung der Top Ereignisse verbessern. Dafür muss man sehr kleine Bahnen messen können. Dies benötigte damals einen neuen Detektor: SVX.

SLT (Soft Leptonic Tagging) ermöglicht auch die Erkennung der Bottom-Jets. Durch Messung von im Jet erzeugten Jets, die dann einen kleineren Impuls tragen, kann man Bottom-Jets tag'en und dadurch Top Ereignisse besser erkennen können.

Die Bestimmung des Untergrunds wird durch Monte-Carlo, anhand von theoretischen Rechnungen und parallelen Messungen durchgeführt. Man kann damit sagen, ob das Topsignal etwas mehr als nur der Untergrund ist, den man in solchem Energiebereich erwartet.

## Wie rekonstruiert man die Masse des Tops?

Ein wichtiger Parameter des Tops, den man zu messen braucht ist die Masse des Tops. Wenn man das schafft, die gesamte Energie und Impuls der Teilchen, die man beobachtet, zu rechnen, kann man die Ruhemasse rekonstruieren. Durch Energie- und Impulserhaltungssatz geht man zur Ruhemasse des Tops. Dann muss man die rekonstruierte Masse an der Summe: Untergrund+Monte-Carlo Simulation des Topsignals (das heißt das erwartete Signal für ein Top, das eine gewisse Masse hat) anpassen. Die bestimmte Masse die man publiziert hat wurde mit Likelihood-Methode berechnet: man variiert den Wert der simulierten Masse bis der Unterschied mit dem gemessenen Signal minimal wird.

Man hat damals eine Ruhemasse von:  $m_t = 176 \pm 8 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$  (mit statistischem und systematischem Fehler) bestimmt.

## Ausblick

Weitere Messungen im Topsignal haben die Bestimmungen der Topmasse sehr verbessert. Der nächste Beginn des LHC Teilchenbeschleunigers am CERN (Genf) wird die Forschung in diesem Bereich verstärken, weil die Schwerpunktsenergie (ca. 14 TeV) wird dann genau im Energiebereich der Topserzeugung kommen. Dann wird man das nicht nur probieren, das Top zu finden, sondern auch seine Kopplung (durch seine Erzeugung oder seinen Zerfall) mit neuer Physik beobachten können. Das sehr erwartete Higgs-Boson, deren Masse im Bereich der Topmasse steht, sollte dort auftreten, entweder zerfällt das Higgs als Top oder in Gegenteil, abhängig von der Masse des Higgs-Bosons. Man könnte auch eine 4. schwerere Familie von Quarks und neue Eichbosonen entdecken.