

1. Untersuchen Sie unter <http://www.i2u2.org/elab/cms/event-display/> einige Ereignisse aus dem CMS-Detektor und klassifizieren Sie diese in
  1.  $Z \rightarrow ee$  und  $Z \rightarrow \mu\mu$ -Kandidaten
  2.  $W \rightarrow e\nu$  und  $W \rightarrow \mu\nu$ -Kandidaten
  3. Higgs-Kandidaten:  $h \rightarrow \gamma\gamma$  und  $h \rightarrow 4\ell$
  4. sonstige Ereignisse

Beginnen Sie mit den Beispiel-Ereignissen im Verzeichnis `collections/` und analysieren Sie dann die Ereignisse unter `masterclass-2014/masterclass_1.ig`.

*Hinweis:* Unter diesen Ereignissen befinden sich mindestens 3 Higgs-Kandidaten.

2. Diskutieren Sie, wie die Methode der invarianten Masse verwendet werden kann, um die Higgs-Masse in Prozessen der Form

$$pp \rightarrow H \rightarrow \ell^+ \ell^- Z^0 \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-, \quad \ell \in \{e, \mu\}, \quad \ell' \in \{e, \mu\}$$

zu messen. Hier zerfällt das Higgs-Boson in zwei geladene Leptonen (Elektronen oder Myonen) und ein  $Z$ -Boson; das  $Z$ -Boson seinerseits zerfällt in zwei geladene Leptonen.

3. Kann die Methode der invarianten Masse genutzt werden, um die Masse des  $W$ -Bosons im Prozess  $pp \rightarrow W^\pm \rightarrow \ell\nu$  zu messen? Hierbei ist  $\ell = e, \mu$  und  $\nu$  bezeichnet ein Neutrino.

*Hinweis:* Untersuchen Sie, inwieweit der Viererimpuls des (für ATLAS und CMS unsichtbaren) Neutrinos rekonstruiert werden kann.

4. Teilchenphysikalische Experimente an Elektron-Positron-Collidern haben mit deutlich weniger Untergrund zu kämpfen als die Experimente am LHC. Diskutieren Sie, warum bei den höchsten Energien dennoch Proton-Proton-Collider wie der LHC die Nase vorn haben. Berücksichtigen Sie dabei, dass die in Form von Synchrotronstrahlung abgestrahlte Leistung bei einem kreisförmigen Beschleuniger durch

$$P_{\text{sync}} = \frac{e^4}{3m^4c^3} E^2 B^2$$

gegeben ist. Hierbei ist  $E$  die Energie der beschleunigten Teilchen,  $m$  ihre Masse, und  $B$  die magnetische Flussdichte. (Im LHC ist  $B \simeq 8$  T.)

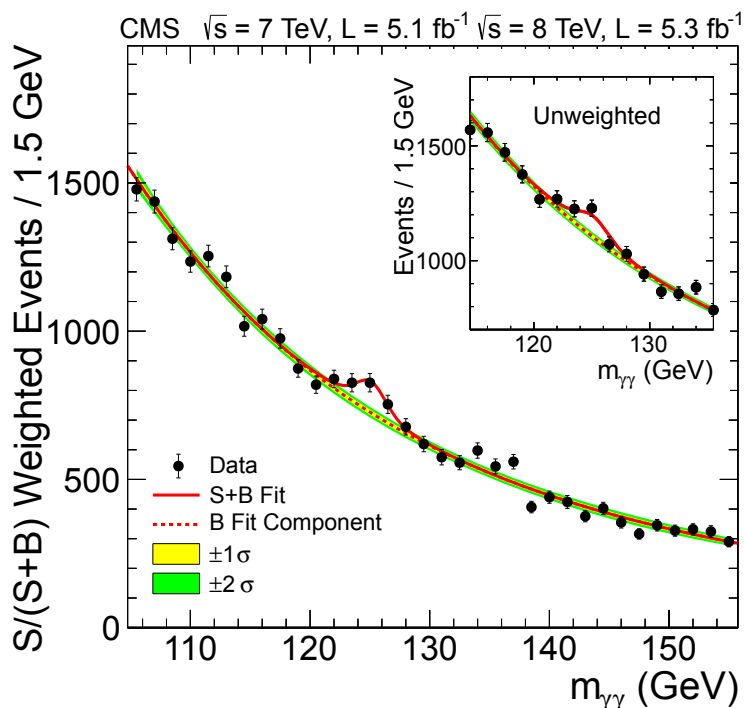
5. Bei der Suche nach neuen Teilchen spricht man oft von  $n$ - $\sigma$  Resultaten. Dazu berechnet man unter der Annahme, dass *keine* neuen Teilchen existieren, die Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass das Experiment durch zufällige Fluktuationen Daten liefert, die um mindestens so viel wie die tatsächlichen Messdaten vom Erwartungswert abweichen. Ist  $p$  kleiner als das  $n$ - $\sigma$ -Quantil der Normalverteilung, d.h.

$$p < 1 - \int_{-n}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-x^2/2] dx,$$

so spricht man von einem  $n$ - $\sigma$ -Resultat. Von einer "Entdeckung" spricht man erst, wenn ein Signal eine Signifikanz von mindestens  $5\sigma$  erreicht hat.

- (a) Welchem  $p$ -Wert entspricht ein  $5\sigma$ -Signal, d.h. wie wahrscheinlich ist es, rein durch statistische Fluktuationen des Untergrunds ein  $5\sigma$ -Signal zu erhalten?

- (b) Wie wahrscheinlich ist es, dass die ATLAS-Kollaboration im Jahr 2014 allein durch statistische Fluktuationen des Untergrunds ein  $5\sigma$ -Signal erhält? Beachten Sie, dass die ATLAS-Kollaborationen pro Jahr ca. 500 Resultate veröffentlicht. (Man spricht hier vom "Look Elsewhere"-Effekt.)
- (c) Schätzen Sie ab, welche statistische Signifikanz das Higgs-Signal in folgendem Plot hat, indem Sie die Anzahl der im Mittel vorhergesagten Ereignisse (gestrichelte Linie) im Bereich des Peaks mit der Anzahl der beobachteten Ereignisse (durchgezogene Linie) vergleichen. (Verwenden Sie die ungewichteten Daten aus dem kleinen Plot oben rechts.) Beachten Sie, dass die Anzahl der Ereignisse in jedem Bin einer Poisson-Verteilung folgt, die bei so vielen Ereignissen aber durch eine Gauß-Verteilung angenähert werden kann.



Beachten Sie außerdem, dass zufällige Fluktuationen des Untergrundes bei beliebiger invarianter Masse  $m_{\gamma\gamma}$  auftreten können (Look-Elsewhere-Effekt).

Vergleichen Sie Ihre Abschätzung der Signifikanz mit den von CMS angegebenen  $4.1\sigma$ . (Die Differenz rührt daher, dass in die CMS-Analyse neben der  $m_{\gamma\gamma}$ -Verteilung noch zahlreiche andere Messgrößen einfließen.)

### Collisions That Changed The World

