

Z bosons in ATLAS

Μετρήστε τη μάζα και χαρακτηριστικά συντονισμών που διασπώνται

σε e^+e^- ή σε $\mu^+\mu^-$

σε $\gamma\gamma$,

ή σε $e^+e^-e^+e^-$ ή $e^+e^-\mu^+\mu^-$ ή $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$

Κώστας Κορδάς, για το εργαστήριο Πυρηνικής ΙΙ (7ου εξαμήνου), ν. 2022-10-18

Ορισμοί και κωδικοί:

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις “της ομάδας σας” και “της τάξης σας” είναι στην ιστοσελίδα <http://cernmasterclass.uio.no/OPloT/>, στο Moderator. Κωδικοί: user: ippog, pass: imc

**** Για τις ερωτήσεις 1 και 2 (παράγραφοι 5.1.1 και 5.1.2) δουλεύετε με όλα τα γεγονότα από την ημερομηνία 18-Οκτωβρίου-2022 (“Comination plot - all institutes”) και όλα τα γεγονότα από 3-Δεκεμβρίου-2019 (πάντα στο Moderator, στο “Comination plot - all institutes”) με τους εξής ορισμούς:

* **“Η ομάδα σας”** είναι η φετινή τάξη σας 18-Οκτ-2022 (Moderator, στο “Comination plot - all institutes”) που είναι ~800 γεγονότα του ATLAS

* **“Η τάξη σας”** είστε όλα τα γεγονότα μαζί αναλυμένα κι από άλλες χρονιές (03-Δεκεμβρίου-2022, Moderator, στο “Comination plot - all institutes”) που είναι περισσότερα σε πλήθος (π.χ ~2500), δηλ. αρκετά περισσότερα από “της ομάδας σας” μόνο.

***** Για τις ερωτήσεις 3 και 4 (παράγραφοι 5.2 και 5.3) δουλέψτε μόνο με τα γεγονότα όλης “της τάξης σας”, δηλ. 03-Δεκ-2022, Moderator, “Combination plot – all institutes”.

Σκοπός άσκησης:

1. Να ταυτοποιήσουμε και να κατατάξουμε ως “σήμα” (signal) ή “υπόβαθρο” (background) κάθε ένα από τα ~50 γεγονότα στο σείτ που αναλύουμε (“γεγονός” = η σύγκρουση πρωτονίων στην καρδιά του ATLAS): να βρούμε δηλαδή τα γεγονότα όπου ίσως παράχθηκε μποζόνιο Z (ή κάτι που μοιάζει με Z) ή Higgs.
Τα ευρήματά μας συνδυάζονται αυτόματα με άλλων, και φτιάχνουμε έτσι δύο δείγματα γεγονότων: ένα από τα ευρήματα “της ομάδας μας”, και ένα μεγαλύτερο δείγμα από τα γεγονότα που ανέλυσε “όλη η τάξη μας” για να δούμε πιο καθαρά τι έχουν να μας πουν τα γεγονότα του ATLAS.
2. Με αυτά τα γεγονότα, να εξαγάγουμε συμπεράσματα για κάποιες φυσικές ποσότητες:
 1. να μετρήσουμε τη μάζα αυτού του σωματιδίου Z ή του Higgs. Όπου γράφουμε “Z”, εννοούμε το μποζόνιο Z ή κάποιο σωματίδιο που συμπεριφέρεται σαν το Z, αλλά δεν ξέρουμε τη μάζα του (μπορεί να είναι το J/ψ , το Υ , ή κάτι άγνωστο μέχρι τώρα, το Z').
 2. Να δούμε αν είναι πιο συχνές οι διασπάσεις σε ηλεκτρόνια ή σε μίονια. Και ξέροντας ότι πρέπει να είναι ίδιες όταν το πατρικό Z διασπάστηκε, να συμπεράνουμε κάτι για την απόδοση του ανιχνευτή στην ανίχνευση των ηλεκτρονίων ή των μιονίων.
 3. Να αποφανθούμε αν είδαμε το σωματίδιο Higgs στα δεδομένα που αναλύσαμε, ή αν τα γεγονότα που μετρήσαμε είναι συμβατά με το να προέρχονται από άλλες διαδικασίες, που μοιάζουν με το “σήμα” μας, αλλά είναι απλά υπόβαθρο.

4. Σχεδόν σε όλα τα ερωτήματα, ζητείται να δείτε πώς επηρεάζει τα συμπεράσματά σας το μέγεθος του δείγματος γεγονότων (δηλ., αν είναι ~250 ή ~500 γεγονότα) που αναλύετε κάθε φορά. Οπότε θα πρέπει να σχολιάσετε αν έχει όντως νόημα να συλλέγουμε περισσότερα γεγονότα ή όχι.

1) Υλικό:

1.1) Κύρια σελίδα:

<http://www.physicsmasterclasses.org/>

αριστερή στήλη -> Physics -> ATLAS

Greek: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/gr/index.htm> -> **Z** διαδρομές

1.2) Επίσης, διάφορα αρχεία με οδηγίες για τον τρόπο ταυτοποίησης σωματιδίων και γεγονότων και την καταχώρηση των μετρήσεων σε σύστημα online:

Στη σελίδα:

http://www.physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local_organisation&page=measurements#atlas

δείτε τα αρχεία στην παραrafo “Supporting material for the **Z-path**” .

2) Εννοιολογικό πλαίσιο:

2.1 Σήμα (signal):

$Z \rightarrow e^+ e^-$ και $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$, ή

$H \rightarrow \gamma\gamma$, ή $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$ ή $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$ ή $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

2.2 Υπόβαθρο (background):

- Υπόβαθρο είναι ένα γεγονός που έχει κάποια από τα χαρακτηριστικά του σήματος, αλλά είναι από άλλη διαδικασία.
- Βέβαια, ανάμεσα στα γεγονότα υποβάθρου μπορεί να είναι κάτι αρκετά ενδιαφέρον, αλλά όχι το σήμα μας. Για τη μέτρησή μας, εμείς βέβαια το κατατάσσουμε ως υπόβαθρο, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι αντικειμενικά αυτό το γεγονός δεν έχει κάτι ενδιαφέρον για κάποιον άλλον.

2.3 Γιατί κάνουμε ταυτοποίηση πολλών γεγονότων;

Ένα-ένα τα γεγονότα που ταυτοποιούμε μπορεί να μη μας λένε κάτι σημαντικό, γιατί έτσι κι αλλιώς δεν είμαστε ποτέ σίγουροι αν το γεγονός που έχουμε κατατάξει ως “σήμα” είναι στ’ αλήθεια σήμα και όχι υπόβαθρο. Αυτό που ξέρουμε είναι μόνο ότι έχει τα χαρακτηριστικά του σήματος. Όμως, πολλά γεγονότα μαζί μπορούν να μας πούν κάτι κι έτσι να χρησιμοποιηθούν για να “κάνουμε φυσική”, δηλαδή να εξάγουμε συμπεράσματα για τη φύση και να μετρήσουμε κάποια φυσική ποσότητα:

α) γιατί αν συλλέγουμε όντως γεγονότα σήματος αυτά θα φανούν πάνω από το υπόβαθρο, αρκεί να έχουμε μαζέψει αρκετά γεγονότα, και

β) γιατί όσο περισσότερες μετρήσεις έχουμε για κάποια ποσότητα, τόσο καλύτερα, δηλ., με μικρότερη αβεβαιότητα (ή αλλιώς σφάλμα) τη γνωρίζουμε.

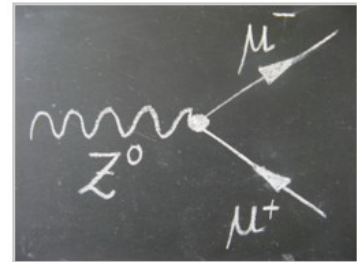
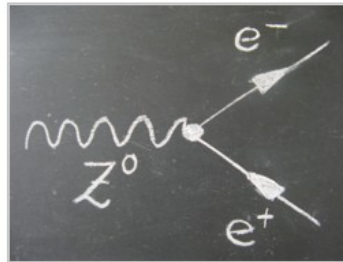
2.4 Διασπάσεις Z , J/ψ , Y ή Z' :

Θα βρούμε γεγονότα όπου

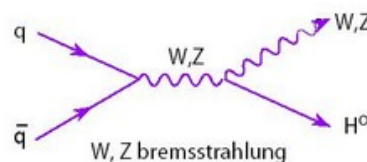
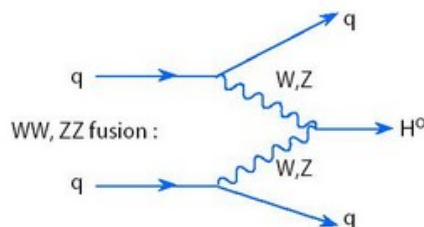
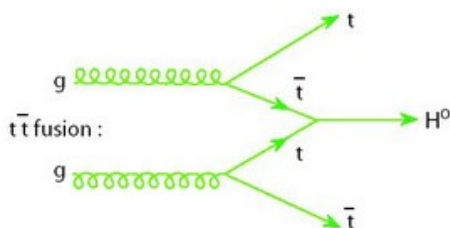
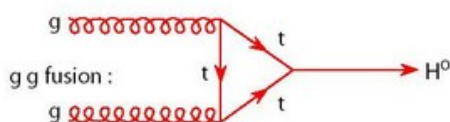
έχουμε την παραγωγή

Z και τη διάσπασή του

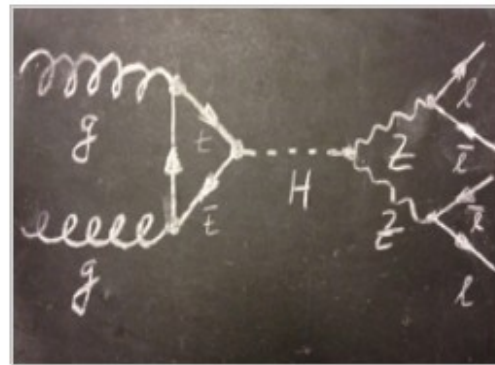
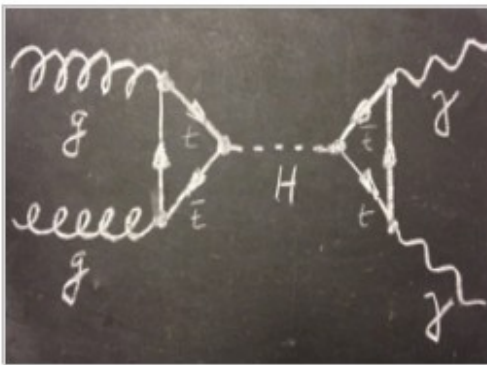
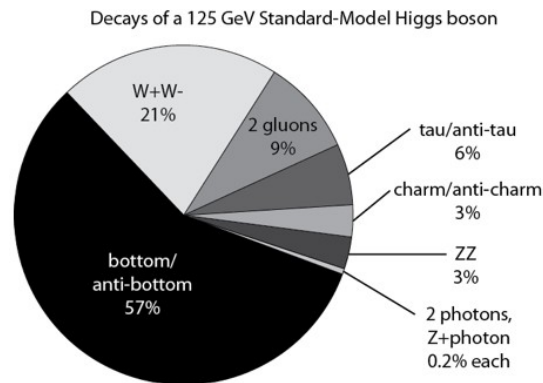
σε $Z \rightarrow e^+ e^-$ και $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



2.5 Παραγωγή σωματιδίων Higgs:



2.6 Διασπάσεις σωματιδίων Higgs:



2.7 Ταυτοποιούμε σωματίδια μέσω της μάζας τους: αν έχω μετρήσει ενέργεια και ορμή, έχω μετρήσει και τη μάζα του σωματιδίου

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$$

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}}{c}\right)^2}$$

$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

Η ενέργεια $E_Z = E_{e^-} + E_{e^+}$ και η ορμή $\vec{p}_Z = \vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}$ του σωματιδίου Z είναι γνωστές, διότι ο ανιχνευτής ATLAS έχει την ικανότητα να μετρήσει την ενέργεια και την ορμή των προϊόντων της διάσπασης του Z. Αυτό σημαίνει ότι έχεις ό,τι χρειάζεσαι για να υπολογίσεις την μάζα του Z, ή οποιουδήποτε άλλου σωματιδίου, όπως το J/ψ ή το Y, που διασπάται

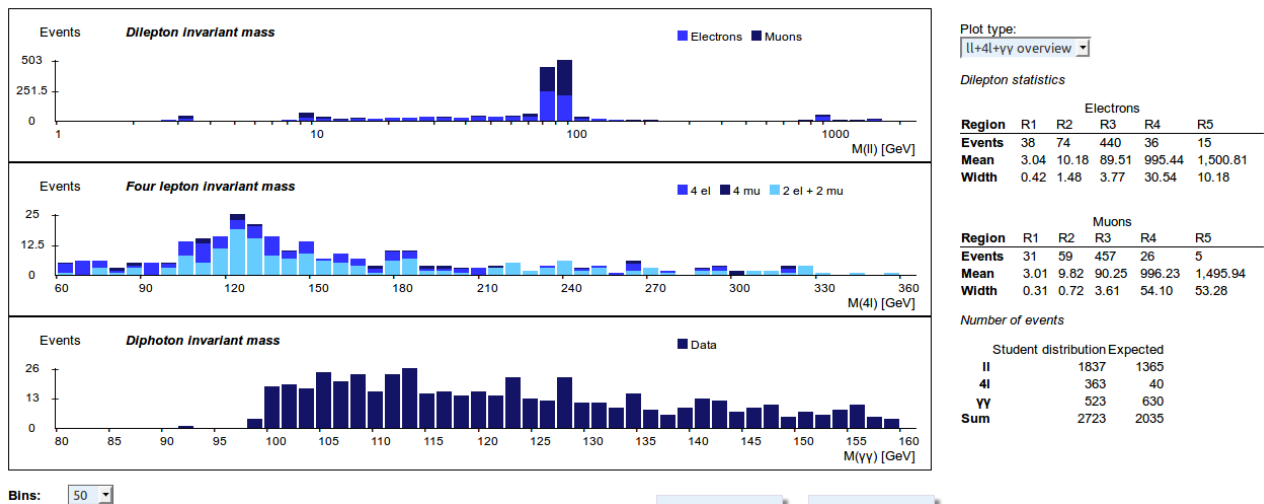
3) Επεξεργασία των δεδομένων:

Για το πώς ταυτοποιούμε διάφορα σωματίδια και γεγονότα στο πείραμα ATLAS, και για την ανάλυση των γεγονότων, δείτε μερικά παραδείγματα στο παράρτημα. Πλήρη περιγραφή των εργαλείων και της μεθόδου, παραδείγματα και οδηγίες έχετε στο υλικό που δίνεται στην παράγραφο 1 του παρόντος: δηλαδή πηγαίνετε στη σελίδα: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/gr/index.htm> -> **Z διαδρομές** και στο http://www.physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local_organisation&page=exercises#atlas δείτε τα αρχεία στην παραγραφο “Supporting material for the **Z-path**”

Βήματα εργασίας για την ανάλυση των δεδομένων:

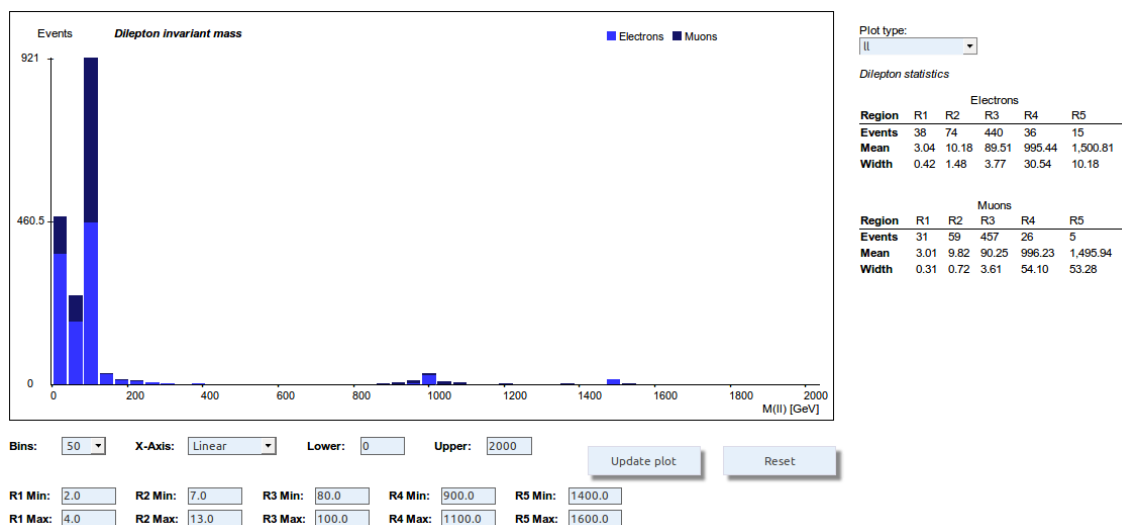
1. Ταυτοποιείτε κάθε ένα από τα 50 γεγονότα που σας δόθηκαν σαν υπόβαθρο ή
 - γεγονός-σήμα με ηλεκτρόνια, ή μίονια ($e^+ e^-$ ή $\mu^+ \mu^-$)
 - γεγονός-σήμα με δύο φωτόνια ($\gamma \gamma$), ή
 - γεγονός-σήμα με 4 λεπτόνια : $e^+ e^- e^+ e^-$ ή $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$ ή $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$
2. Για κάθε γεγονός-σήμα υπολογίζετε με την HYPATIA την αναλλοίωτη μάζα του συστήματος των δύο λεπτονίων ή των δύο φωτονίων ή των τεσσάρων λεπτονίων (ανάλογα με το γεγονός).
3. Έτσι, κάθε υποψήφιο γεγονός-σήμα συνεισφέρει σε ανάλογο ιστόγραμμα μαζών και στο τέλος βλέπουμε αν υπάρχει ένδειξη ότι “κάτι συμβαίνει” σε μια συγκεκριμένη μάζα. Ότι “κάτι συμβαίνει” το βλέπουμε με τη συγκέντρωση γεγονότων γύρω από κάποια συγκεκριμένη τιμή μάζας. Αν ναι, τότε έχουμε ένδειξη ότι έχει παραχθεί κάποιο “μητρικό” σωματίδιο που έχει μάζα περίπου αυτή την τιμή, και το οποίο διασπάστηκε στο “κανάλι” που χρησιμοποιήσαμε για το ιστόγραμμα ($e^+ e^-$ ή $\mu^+ \mu^-$ ή $\gamma \gamma$ ή $e^+ e^- e^+ e^-$ ή $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$ ή $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$).
4. Αφού τελειώσουμε την ανάλυση των 50 γεγονότων, εξάγουμε τις μάζες που μετρήσαμε σε ένα αρχείο. Το κάνουμε από την HYPATIA, από το pull-down menu, πάνω αριστερά (“**export invariant masses**”). Σώζουμε το αρχείο .txt στο Desktop.
5. Ανεβάζετε το αρχείο αυτό, που αντιστοιχεί στα 50 γεγονότα που αναλύσατε μόνοι σας, στο <http://cernmasterclass.uio.no/OPloT/> --> “**Student**” tab (user/pass: **ippog / imc**) -> π.χ., 2022 October 18, “Thessaloniki-1”, **Group 8, set A**, ή όποιο είναι το set που έχετε.
6. Βλέπετε τα ιστογράμματα που παράγονται από τα δικά σας 50 γεγονότα.
7. Στο “**Moderator**” tab της παραπάνω σελίδας (<http://cernmasterclass.uio.no/OPloT/combinationPage.php>), θα δείτε μαζί και τα γεγονότα της δική σας ομάδας (18-Οκτ-2022) και όλης της τάξης (3-Δεκ-2022), πάντα στο “Combination plot – all institutes”.
8. Για να δείτε τι σας λένε τα διάφορα ιστογράμματα που παράγονται από τα γεγονότα που αναλύσατε, μπορείτε να δείτε από παράγραφο 10 και μετά στο αρχείο **Guide for Tutors 2017** στην παράγραφο “Supporting material for the Z-path:” στη σελίδα http://physicsmasterclasses.org/index.php?cat=local_organisation&page=measurements Ή να δείτε μόνοι σας τα ιστογράμματα, και να ακολουθήσετε τις οδηγίες στην παράγραφο της “Γραπτής εργασίας”:

Για να έχετε μία εικόνα για το τί έχετε βρεί στις διάφορες κατηγορίες γεγονότων, δείτε πρώτα τα 3 ιστογράμματα μαζεμένα σε μια σελίδα, με το **Plot type: “ll+4l+γγ overview”**, που μοιάζει έτσι:



Μετά, μπορείτε να δείτε χωριστά την κάθε κατηγορία:

- Plot type: “ll”, δηλ. συνδυασμοί δύο λεπτονίων: $e^+ e^-$ ή σε $\mu^+ \mu^-$
 - ειδικά σε αυτό το ιστόγραμμα, έχει γίνει ήδη ανάλυση για το πόσα γεγονότα μετρήθηκαν σε κάθε περιοχή μαζών, και ποιά μέση τιμή και ποιά RMS υπολογίζεται από αυτά τα γεγονότα στην κάθε περιοχή. Αυτό που θα δείτε είναι κάτι τέτοιο:



- Plot type: “4l”, δηλ. συνδυασμοί τεσσάρων λεπτονίων: $e^+ e^- e^+ e^-$ ή $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$ ή $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$
- Plot type: “γγ”, δηλ. συνδυασμοί δύο φωτονίων: $\gamma\gamma$

Σημείωση, στα ιστογράμματα 4l, και γγ μπορείτε να δείτε τόσο τα γεγονότα που μετρήσατε “Analyzed data (real data)”, Student distribution”, όσο και προσομοίωση “simulated data” που αντιστοιχούν σε κάποιο αριθμό γεγονότων προς ανάλυση (ο αριθμός γεγονότων είναι ανάλογος αυτού που λέμε “ολοκληρωμένη φωτεινότητα”, σε μονάδες 1/επιφάνεια, όπου η μονάδα επιφάνειας που χρησιμοποιούμε είναι το barn, με $1b = 100 \text{ fm}^2$):

Plot type:
4l

Higgs simulated data:

- ☐ 2 fb⁻¹
☐ 10 fb⁻¹
☐ 25 fb⁻¹

Analyzed data (real data):

- ☐ No data
☒ Student distribution
☐ Expected distribution

Plot type:
γγ

Signal and background (simulated data):

- ☒ No data
☐ 0.1135 fb⁻¹
☐ 2 fb⁻¹
☐ 10 fb⁻¹
☐ 25 fb⁻¹

Analyzed data (real data):

- ☐ No data
☒ Student distribution
☐ Expected distribution

4) Γραπτή Εργασία:

Σημείωση: Κατ' αρχάς, για να έχετε μιά εικόνα για το τί έχετε βρεί στις διάφορες κατηγορίες γεγονότων, δείτε πρώτα τα 3 ιστογράμματα μαζεμένα σε μια σελίδα, με το “Plot Type $ll+4l+\gamma\gamma$ overview” (και τα αντίστοιχα σχόλια στο αρχείο pdf παραπάνω στην παράγραφο 3, βήμα 9).

A. Η **εισαγωγή στην εργασία σας** να έχει στην αρχή λίγα λόγια για τα εξής:

1. Τί προσπαθούμε να μετρήσουμε (κοιτάξτε τα εισαγωγικά "σκοπός της άσκησης" σ' αυτό εδώ το φυλλάδιο)
2. Πώς ταυτοποιούμε μόνια, ηλεκτρόνια και φωτόνια στον ATLAS και γενικά σε τέτοια πειράματα (κοιτάξτε τις διαφάνειες στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου, τα φυλλάδια στις ιστοσελίδες που σας δίνουμε, και την ιστοσελίδα "Z διαδρομές")
3. Πώς κατατάσσουμε (ελάχιστα λόγια) τα γεγονότα που αναλύουμε σε γεγονότα-σήματος με J/ψ , Y , Z , Z' , Higgs
4. Να βάλετε το διάγραμμα με τα 3 ιστογράμματα μαζεμένα σε μια σελίδα (“plot type $ll+4l+\gamma\gamma$ overview”) και από τη δικής σας ομάδας (~250 γεγονότα) και από όλα τα γεγονότα της τάξης σας (~500 γεγονότα) που σας δίνει μια γρήγρη εικόνα για το τί έχετε βρεί στις διάφορες κατηγορίες γεγονότων (" ll " , " $4l$ ", " $\gamma\gamma$ ").

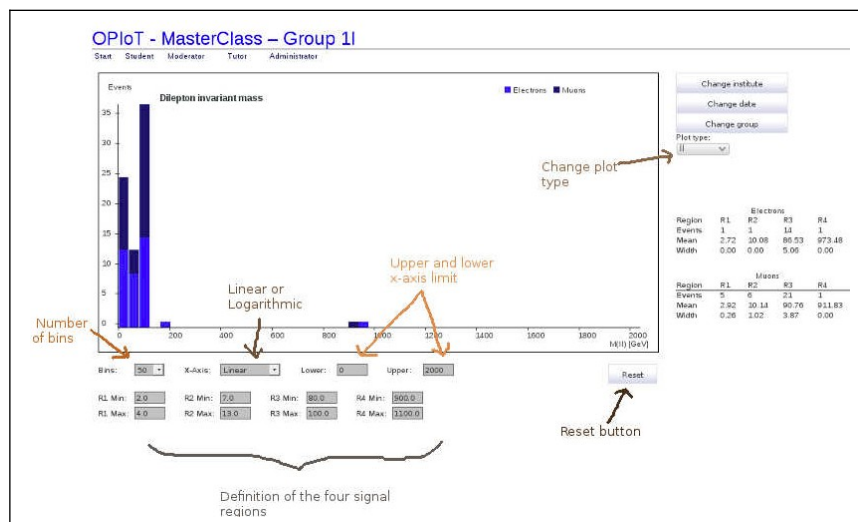
B. Κατόπιν, **να απαντήσετε στα 4 ερωτήματα παρακάτω**, γράφοντας το συμπέρασμα που βγάξετε από την ανάλυση που σας ζητάει κάθε ερώτημα και χωρίς να ξεχάσετε να βάλετε τα αντίστοιχα ιστογράμματα και πίνακες: της δικής σας ομάδας και με όλα τα γεγονότα της τάξης σας. Σχεδόν σε όλα τα ερωτήματα σας ζητείται να δείτε πώς επηρεάζει τα συμπεράσματά σας το μέγεθος του δείγματος γεγονότων (δηλ., αν είναι ~250 ή ~500 γεγονότα) που αναλύετε κάθε φορά. Οπότε θα πρέπει να σχολιάσετε αν έχει όντως νόημα να συλλέγουμε περισσότερα γεγονότα ή όχι.

5) Ανάλυση των δεδομένων και ερωτήματα

5.1 Για τα γεγονότα με 2 λεπτόνια, από τα διαγράμματα “II” (Plot type II)

Στα δεξιά του ιστογράματος στην ιστοσελίδα με τα αποτελέσματα της ομάδας σας και όλης της τάξης, έχετε πίνακα με τα στατιστικά για τέσσερες (4) περιοχές μαζών (R1: 2-4 GeV, R2: 7-13 GeV, R3: 80-100 GeV, και R4: 900-1100 GeV). Όπως βλέπετε και στο σχήμα παρακάτω, το ιστόγραμμα αυτό τα δείχνει όλα, από 0 έως 2000 GeV. Μπορείτε όμως να επικεντρωθείτε σε μικρότερη περιοχή αλλάζοντας τα όρια κάτω από το ιστόγραμμα, εκεί που λέει X-axis “Lower” και “Upper”.

Το ιστόγραμμα είναι χωρισμένο σε “κουτάκια” (bins) κατά τον άξονα των μαζών (x). Ο άξονας y δείχνει αριθμό γεγονότων σε κάθε bin. Όταν έχουμε Bins=50, και όρια ιστογράμματος από 0 έως 2000 GeV, σημαίνει ότι το κάθε bin έχει εύρος 2 GeV, οπότε το πρώτο bin είναι από 0 έως 2 GeV, το δεύτερο bin από 2 έως 4 GeV κ.ο.κ. Όταν επικεντρώνεστε σε κάποια περιοχή μαζών, μπορεί τα 50 bins να σας φαίνονται πολλά: μπορείτε να αλλάζετε τον αριθμό των bins όπως νομίζετε.



5.1.1: Ερώτηση 1 [3 μονάδες]

Μέτρηση της μάζας των πατρικών σωματιδίων. Μάζα, εύρος και χρόνος ζωής του Z.

Χρησιμοποιώντας τα γεγονότα της ομάδας σας να βρείτε σε ποιές μάζες παρατηρείτε τα 4 σωματίδια J/ψ, Y, Z και Z'. Οι αντίστοιχες μάζες στη βιβλιογραφία είναι 3.1 GeV, 10 GeV, και 91.2 GeV για τα J/ψ, Y και Z αντίστοιχα, ενώ το σωματίδιο Z' δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία, αλλά το αναμένουμε μάνω από τα ~1000 GeV (σημείωση: έχουμε βάλει προσομοιωμένα γεγονότα Z' μέσα στο δείγμα γεγονότων που αναλύσατε).

- 1α) Δώστε σε πίνακα τη μέση τιμή (m) της μάζας (“mean”) και το σφάλμα (σ_m) στη μέση τιμή για κάθε πατρικό σωματίδιο. Δώστε επίσης τα εύρη (width) των κατανομών.
 - Δώστε τρεις απαντήσεις για τη μέση τιμή της μάζας και το σφάλμα της, και τρεις απαντήσεις για το εύρος κάθε κατανομής μαζών, χρησιμοποιώντας:
 - πρώτα, μόνο τα γεγονότα με ηλεκτρόνια,

- μετά, μόνο τα γεγονότα με μίονια
 - και τέλος, όλα όλα τα γεγονότα μαζί, αδιακρίτως αν είναι ηλεκτρόνια ή μίονια.
- **1β) Ειδικά για το Z, βρείτε τη διαφορά μαζών που μετράτε από γεγονότα $Z \rightarrow e^+ e^-$ και $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$** και δικαιολογείστε το συνδυασμό όλων των γεγονότων, αδιακρίτως αν είναι με ηλεκτρόνια ή μίονια, για τη μέτρηση αυτών των χαρακτηριστικών του πατρικού σωματιδίου Z.
 - Είναι η διαφορά συμβατή με μηδέν; Δηλαδή, είναι οι δύο τιμές που συγκρίνατε συμβατές μεταξύ τους;
 - Δικαιολογείται λοιπόν ο συνδυασμός όλων των γεγονότων, αδιακρίτως αν είναι ηλεκτρόνια ή μίονια, για τη μέτρηση αυτών των χαρακτηριστικών του Z;
 - Γιατί το κάνουμε αυτό; Δηλαδή, τι κερδίζουμε αν συνδυάσουμε και τα γεγονότα ηλεκτρονίων και τα γεγονότα μιονίων μαζί;
 - **1γ) Επαναλάβετε τα παραπάνω για τα γεγονότα όλης της τάξης σας.** Κερδίσατε κάτι χρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο δείγμα γεγονότων όσον αφορά τη μέτρηση της μάζας και του εύρους; Περιμένατε το αποτέλεσμα; Γιατί;
 - **1δ) Υπολογίστε το χρόνο ζωής του Z.** Γνωρίζοντας ότι το εύρος στη μάζα ενός σωματιδίου, αντικατοπτρίζει την αβεβαιότητα στην ενέργειά του, και έτσι συνδέεται με το χρόνο ζωής του σωματιδίου μέσω της σχέσης $\Gamma \tau = \hbar \rightarrow \tau = \hbar / \Gamma$, όπου Γ το εύρος του σωματιδίου, υπολογίστε το χρόνο ζωής του Z, θεωρώντας ότι το εύρος που παρατηρείτε είναι γηγενές χαρακτηριστικό του Z, και όχι αποτέλεσμα της πεπερασμένης πειραματικής ακρίβειας στη μέτρηση των ορμών των προϊόντων του Z.

Σημείωση 1: οι αριθμοί μετρούμενων γεγονότων δίνονται σε πίνακα δίπλα από το ιστόγραμμα, για 4 περιοχές: R1, R2, R3 και R4. Κάθε περιοχή καλύπτει ένα από τα σωματίδια J/ψ , Y , Z , και Z'

Σημείωση 2: Αν συνδυάσετε δύο μετρήσεις x_1 και x_2 για να πάρετε μία μέση τιμή $\langle x \rangle$, τότε αν έχετε χρησιμοποιήσει διαφορετικό πλήθος γεγονότων (N_1) για να πάρετε την τιμή x_1 , απ' ό,τι για να πάρετε την τιμή x_2 (που την έχετε βρεί χρησιμοποιώντας N_2 γεγονότα), τότε δεν είναι σωστό να πάρετε την απλή μέση τιμή $\langle x \rangle = (x_1 + x_2)/2$

για να πείτε τί έχετε μάθει από το σύνολο των $N_1 + N_2$ γεγονότων. Πιό σωστό είναι να ληφθεί υπ' όψιν την τιμή x_1 και την x_2 ανάλογα με το ποσοστό των γεγονότων αντιπροσωπεύουν, οπότε να πάρετε την “ζυγισμένη μέση τιμή” (“weighted average”) των x_1 και x_2 :

$$\langle x \rangle = (N_1 \cdot x_1 + N_2 \cdot x_2) / (N_1 + N_2).$$

Να εφαρμόσετε αυτό το “ζυγισμένο μέσο όρο” για τα means (m) ώστε να πάρετε την αντιπροσωπευτική τιμή από το σύνολο των γεγονότων (ηλεκτρόνια και μίονια μαζί), και να κάνετε σωστή μετάδοση σφαλμάτων για να δώσετε και το σφάλμα στο ζυγισμένο μέσο όρο.

*** Γενικότερα, το σωστό είναι να ληφθεί υπ' όψιν την τιμή x_1 και την x_2 ανάλογα με το σφάλμα που έχει κάθε μέτρηση x_1 και x_2

$$\langle x \rangle = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} x_1 + \frac{\frac{1}{\sigma_2^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} x_2$$

και το σφάλμα στο μέσο όρο είναι σ_{1+2} , από εδώ:

$$\frac{1}{\sigma_{1+2}^2} = \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}$$

(Δείτε τις τελευταίες διαφάνειες από την παρουσίαση της άσκησης).

Σημείωση 3: Αν κάνετε N μετρήσεις για κάποια ποσότητα, και από κάθε μέτρηση έχετε σφάλμα σ , τότε το σφάλμα στη μέση τιμή της ποσότητας που μετράτε με τις N μετρήσεις είναι $\sigma/\sqrt{N}$, όπου $\sqrt{N}$ είναι η τετραγωνική ρίζα του N. Οπότε, αν έχετε μια κανονική κατανομή (“Gaussian”), με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ , και θεωρήσετε ότι κάθε μέτρηση που έχει συνεισφέρει στο ιστόγραμμα έχει σφάλμα σ , τότε το σφάλμα στη μέση τιμή μ είναι $\sigma/\sqrt{N}$, όπου N είναι ο αριθμός των γεγονότων από τα οποία φτιάχτηκε η κατανομή.

*** Εδώ θεωρήστε ότι η τυπική απόκλιση σ είναι ίση με το RMS ή το εύρος (width) της κατανομής.

5.1.2: Ερώτηση 2 [2 μονάδες]:

Μελέτη της πιθανότητας για διάσπαση του Z σε μόνια, σε σχέση με διάσπαση σε ηλεκτρόνια.

Τα παρακάτω ερωτήματα να τα απαντήσετε για τα γεγονότα της ομάδας σας, και για τα γεγονότα της τάξης σας.

2α) Εύρεση του R με τιμές της βιβλιογραφίας: Οι μέχρι τώρα μετρήσεις παγκοσμίως έχουν δείξει ότι το ποσοστό των διασπάσεων του Z σε $e^+ e^-$ είναι ίδιο με το ποσοστό των διασπάσεων σε $\mu^+ \mu^-$. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή των μέχρι σήμερα πειραμάτων είναι: $(3.363 \pm 0.004)\%$ και $(3.366 \pm 0.007)\%$, για $Z \rightarrow e^+ e^-$, και για $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$, αντίστοιχα. Ποιά είναι η παγκόσμια μέση τιμή του $R = (\text{ποσοστό διασπάσεων σε ηλεκτρόνια}) / (\text{ποσοστό διασπάσεων σε μόνια})$; Η θεωρία θέλει ίσο ποσοστό διασπάσεων σε $e^+ e^-$ και $\mu^+ \mu^-$, δηλαδή $R=1$. **Είναι συμβατή η τιμή του R από τη μέχρι τώρα της βιβλιογραφία, με τη θεωρία που προβλέπει $R=1$;**

2β) Εύρεση του R από τις δικές σας μετρήσεις: Για την περιοχή R3, γύρω από τη μάζα του Z. **Βρείτε το λόγο R του αριθμού των γεγονότων σε ηλεκτρόνια προς τα μόνια, και δώστε την τιμή του R και το σφάλμα του σ_R :** $(\text{Αριθμός γεγονότων με } e^+ e^-) / (\text{Αριθμός γεγονότων με } \mu^+ \mu^-) = R \pm \sigma_R$

Μπορείτε να πείτε από τις μετρήσεις σας (μόνο με τα γεγονότα της ομάδας σας, και μετά με όλα τα γεγονότα όλης της τάξης) ότι ο λόγος αυτός, R, είναι συμβατός με τη θεωρητική τιμή $R=1$;

Αν όχι, η αιτία μπορεί να είναι ότι ναι μεν το Z διασπάται με ίδια πιθανότητα σε $e^+ e^-$ και σε $\mu^+ \mu^-$, όμως η απόδοση του ανιχνευτή μας στην εύρεση των ηλεκτρονίων είναι διαφορετική από την απόδοση στην εύρεση των μιονίων. Δεχόμενοι αυτό το σκεπτικό, τι συμπαιρένετε: ο ATLAS είναι πίο αποδοτικός για τη μέτρηση των παραγόμενων ηλεκτρονίων ή πίο αποδοτικός για τα μόνια;

Σημείωση: Όταν έχετε μετρήσει N γεγονότα, το σφάλμα σ αυτό τον αριθμό είναι η τετραγωνική ρίζα του N ($= \sqrt{N}$), οπότε γράφετε: $N \pm \sqrt{N}$. Έχετε έναν τέτοιο όρο στον αριθμητή για τα γεγονότα με ηλεκτρόνια, και έναν όρο στον παρονομαστή για τα γεγονότα με μόνια. Στο λόγο τους

πρέπει να κάνετε μετάδοση σφαλμάτων όπως ξέρετε από π.χ., το εργαστηριακό βιβλίο Ατομικής φυσικής του 3ου εξανήνου.

2γ) Βρείτε το λόγο R για την περιοχή του Z' (περιοχή R4, γύρω από τα 1000 GeV):

$$(\text{Αριθμός γεγονότων με } e^+ e^-) / (\text{Αριθμός γεγονότων με } \mu^+ \mu^-) = R \pm \sigma_R$$

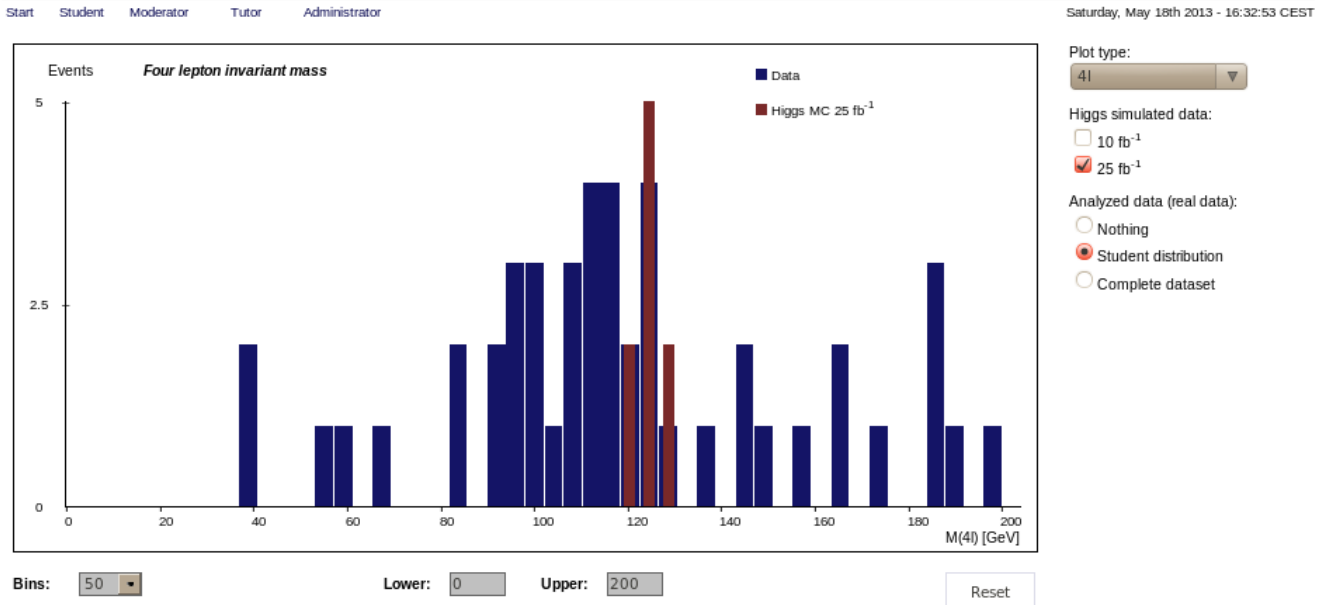
Θεωρήστε και πάλι ότι θεωρητικά οι διασπάσεις του Z' σε $e^+ e^-$ και σε $\mu^+ \mu^-$ είναι ισοπίθανες. Τι δείχνουν τα γεγονότα σας επ'αυτού; Είναι ο λόγος R συμβατός με 1;

Τι λένε τώρα τα γεγονότα σας για το αν ο ATLAS έχει διαφορετική απόδοση για την εύρεση ηλεκτρονίων και μιονίων που προέρχονται από μητρικό σωματίδιο τόσο μεγάλης μάζας, όπως το Z'; (και άρα και τα προϊόντα ηλεκτρόνια και μίονια έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από ό,τι τα ηλεκτρόνια και τα μίονια από τη διάσπαση του Z).

5.2 Για τα γεγονότα με 4 λεπτόνια, από τα διαγράμματα “4l” (Plot type 4l)

Το παρακάτω ιστόγραμμα είναι σαν κι αυτό από το “Moderator” όπου θα έχει όλα γεγονότα που ανέλυσε η τάξη σας.

OPlot - MasterClass – Combination for all institutes on 2013-04-23



5.2.1: Ερώτηση 3 [3 μονάδες]:

Στα γεγονότα με 4 λεπτόνια, παρατηρείτε την παραγωγή Higgs ή αυτά που βλέπετε είναι απλά υπόβαθρο;

3α) Κοιτώντας το αντίστοιχο ιστόγραμμα με τα γεγονότα της ομάδας σας μόνο, έχετε ένδειξη ότι υπάρχει το σωματίδιο Higgs με μάζα ~125 GeV ;
Με το ιστόγραμμα με όλα τα γεγονότα της τάξης σας, έχετε ένδειξη;

Για να απαντήσετε ακολουθήστε τα επόμενα:

Είναι πολύ βασικό να έχετε ένα μοντέλο για το πόσοι είναι οι τυχαίοι συνδυασμοί εκεί που νομίζεται ότι βλέπετε συγκέντρωση γεγονότων.

Ας πούμε ότι σας φαίνεται ότι υπάρχει μια συγκέντρωση γεγονότων γύρω στα 125 GeV. Φυσικά, αυτά τα γεγονότα προέρχονται και από το σήμα μας, το Higgs, και από τους τυχαίους συνδυασμούς. Ας πούμε ότι μετράμε $N_{\text{ολ}}$ γεγονότα στην περιοχή 120-130 GeV. Τότε αυτά μπορούμε να τα γράψουμε σαν το άθροισμα $N_{\text{ολ}} = N_{\text{σ}} + N_{\text{β}}$, όπου $N_{\text{σ}}$ είναι τα γεγονότα σήματος, και $N_{\text{β}}$ είναι οι τυχαίοι συνδυασμοί, που τους λέμε "υπόβαθρο" ή "background" και τους συμβολίζουμε με $N_{\text{β}} = N_{\text{background}}$.

Πόσα από τα $N_{\text{ολ}}$ νομίζετε ότι είναι τυχαίοι συνδυασμοί; Δηλαδή είναι το υπόβαθρο $N_{\text{β}}$;

Αν ο αριθμός γεγονότων, $N_{\text{ολ}}$, που βλέπετε γύρω στα 125 GeV είναι συμβατός αυτά που περιμένετε από το υπόβαθρο, $N_{\text{β}}$, τότε αυτή η συγκέντρωση γεγονότων γύρω στα 125 GeV μπορεί απλά να είναι ένα "παίξιμο" του υποβάθρου, και να σας ξεγελάει.

Για να εκτιμήσετε το Nb, κάντε το εξής:

Πάρτε την περιοχή 120-130 GeV να είναι η περιοχή που περιμένετε να εμφανιστεί το σήμα σας (το Higgs). Επίσης θεωρήστε τις παλαιές περιοχές 100-115 GeV και 135-160 GeV για να μοντελοποιήσετε το υπόβαθρο (αυτές οι περιοχές βρίσκονται στο πλάι της περιοχής σήματος, και γι' αυτό τις λέμε "sidebands"). Ό,τι βρίσκεται στις παλαιές περιοχές θεωρούμε ότι είναι υπόβαθρο. Μετρήσετε πόσα γεγονότα βλέπετε εκεί και θεωρήστε ότι η κατανομή τους συναρτήσει της μάζας είναι ομοιόμορφη. Οπότε, αν π.χ., μετρήσετε 21 γεγονότα στις πλαϊνές περιοχές αυτό σημαίνει ότι βλέπετε 21 γεγονότα υποβάθρου σε μια περιοχή εύρους 40 GeV ($= 115-100 + 160-135 = 15 + 25 = 40$ GeV). Οπότε στην περιοχή σήματος, 120-130 GeV, που έχει εύρος 10 GeV, και άρα είναι 4 φορές μικρότερη από τα 40 GeV των sidebands, περιμένετε $N_b = 21/4 = 5.25$ γεγονότα υποβάθρου. Αυτή είναι η καλύτερη εκτίμηση που έχετε για το μέσο όρο του αριθμού γεγονότων υποβάθρου, Nb, στην περιοχή 120-130 GeV. Προσέξτε: το Nb που βρίσκετε με αυτόν τον τρόπο είναι μια εκτίμηση για το τι κάνει η φύση κατά μέσο όρο στην περιοχή του σήματος, οπότε δεν είναι κατ' ανάγκη ακέραιος αριθμός.

Όπως ξέρετε από το εργαστήριο πυρηνικής του 5ου εξαμήνου από τις ασκήσεις με τον Geiger, όταν η φύση έχει κατά μέσο όρο μ γεγονότα, τότε ο αριθμός γεγονότων που θα βλέπω στα διάφορα πειράματά μου ακολουθεί κατανομή Poisson με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση $RMS = \sqrt{\mu}$. Έτσι, αν κάνουμε μία μόνο μέτρηση και μετράμε N γεγονότα, τότε η καλύτερή μας εκτίμηση για το τι κάνει η φύση κατά μέσο όρο είναι $N \pm \sqrt{N}$ γεγονότα. Βάζουμε δηλαδή την τυπική απόκλιση σ_N στην τιμή του N ίση με $\sqrt{N}$, δηλαδή $\sigma_N = \sqrt{N}$ (όπως πρέπει για μια κατανομή Poisson). Λέμε λοιπόν ότι αν κάνουμε μια άλλη μέτρηση, τότε τα γεγονότα που περιμένουμε να μετρήσουμε θα είναι ένας αριθμός εκεί γύρω: $N \pm \sqrt{N}$ γεγονότα.

Στο παραπάνω παράδειγμα λοιπόν, που μετρήσατε 21 γεγονότα υποβάθρου, η εκτίμησή σας για το τι κάνει κατά μέσο όρο η φύση είναι $21 \pm \sqrt{21}$. Αυτή η εκτίμηση όμως είναι για μια περιοχή που είναι 4 φορές μεγαλύτερη από την περιοχή σήματος, οπότε πρέπει να τη διαιρέσετε με το 4.

Έτσι έχετε μια **εκτίμηση για τη μέση τιμή του υποβάθρου Nb στην περιοχή του σήματος**, ίση με:

$$\langle N_b \rangle \pm \sigma_{\langle N_b \rangle} = (21 \pm \sqrt{21}) / 4 = (21 \pm 4.58) / 4 = 5.3 \pm 1.1,$$

όπου το αποτέλεσμα δίνεται με ακρίβεια ενός δεκαδικού αφού το σφάλμα είναι μεγάλο.

Όταν λοιπόν έχουμε μια πρόβλεψη $\langle N_b \rangle \pm \sigma_{\langle N_b \rangle}$ για το πόσα γεγονότα υποβάθρου αναμένουμε κατά μέσο όρο στο δείγμα γεγονότων που μελετήσαμε, τότε, για να πούμε ότι έχουμε ένδειξη ότι υπάρχει Higgs, πρέπει τα γεγονότα που παρατηρούμε στην περιοχή που αναμένουμε το σήμα (δηλαδή τα συνολικά γεγονότα Nολ στην περιοχή 120-130 GeV) να μην μπορούμε να τα εξηγήσουμε μόνο με τα γεγονότα υποβάθρου.

Ένδειξη ότι υπάρχει και το σήμα (το Higgs) έχουμε όταν το Nολ γίνεται "σημαντικά μεγαλύτερο" από το $\langle N_b \rangle$. Τότε λέμε ότι δεν μπορούμε να εξηγήσουμε το Nολ μόνο με τη συνεισφορά του υποβάθρου, και έτσι έχουμε "κάτι" που συνεισφέρει στον ολικό αριθμό γεγονότων και τα κάνει "ξεμυτίζουν" από το υπόβαθρο. Λέμε ότι αυτό το "κάτι" είναι ένα νέο σήμα, το Higgs, το οποίο εκτιμούμε ότι είναι $N_s = N_{\text{ολ}} - \langle N_b \rangle$.

Πόσο "σημαντικά μεγαλύτερο" από το $\langle N_b \rangle$ πρέπει να είναι το Nολ για να πούμε ότι έχουμε ένδειξη ότι στα γεγονότα που μετρήσαμε παράχθηκε και κάτι καινούργιο; Ελέγχουμε την υπόθεση ότι η φύση δουλεύει μόνο με υπόβαθρο Nb: ελέγχουμε δηλαδή αν το Nολ που παρατηρούμε εξηγείται από αυτή την υπόθεση. Αν όχι, τότε λέμε ότι δε στέκει η υπόθεση ότι η φύση δουλεύει μόνο με υπόβαθρο (και έτσι λέμε ότι στο Nολ συνεισφέρει και κάτι πέραν του υποβάθρου, κι έτσι παρατηρούμε την εμφάνιση κάποιου καινούργιου "σήματος").

*** Ξέρουμε ότι το υπόβαθρο N_b στα διάφορα πειράματα που κάνουμε κατανέμεται με κατανομή Poisson με μέση τιμή $\langle N_b \rangle$. Επειδή στην Poisson $RMS = \sqrt{\langle N_b \rangle}$, λέμε προσεγγιστικά ότι το N_b κατανέμεται Γκαουσιανά με μέση τιμή $\langle N_b \rangle$ και σίγμα $\sigma_{N_b} = \sqrt{\langle N_b \rangle}$. (Θα δουλέψουμε έτσι, αγνοώντας από εδώ και πέρα ότι το $\langle N_b \rangle$ δεν το ξέρουμε με άπειρη ακρίβεια, αλλά το ξέρουμε με ακρίβεια $\sigma_{\langle N_b \rangle}$). Οπότε κοιτάμε πόσο μακριά από τη μέση τιμή $\langle N_b \rangle$ είναι το $N_{ολ}$ που παρατηρήσαμε στο ένα πείραμα που κάναμε (το πείραμά μας είναι η καταμέτρηση των γεγονότων $N_{ολ}$ που έχουν μπροστά μας). Τη "σημαντικότητα" της διαφοράς $N_{ολ} - \langle N_b \rangle$ τη μετράμε σε μονάδες $\sigma_{N_b} = \sqrt{\langle N_b \rangle}$.

Έτσι λέμε ότι διαφορά είναι ίση με $0.1 \sigma_{N_b}$ ή $3 \sigma_{N_b}$ ή $5 \sigma_{N_b}$ ή $7 \sigma_{N_b}$ κλπ. Και έτσι λέμε ότι:

- i) όταν το $N_{ολ} - N_b$ είναι $3 \sigma_{N_b}$ ("τρία σίγμα") παραπάνω από το 0, έχουμε ένδειξη ότι κάτι καινούργιο συνεισφέρει στα γεγονότα μας (στα $3 \sigma_{N_b}$ έχουμε πιθανότητα ~ 2 στα 1000 να είναι το παίξιμο – fluctuation – του υποβάθρου που μας έδωσε στο πείραμά μας $N_{ολ}$ γεγονότα). Η εκτιμώμενο σήμα είναι: $N_s = N_{ολ} - \langle N_b \rangle$ γεγονότα.
- ii) όταν το $N_{ολ}$ είναι $5 \sigma_{N_b}$ ("πέντε σίγμα") παραπάνω από το N_b , είμαστε σίγουροι ότι κάτι καινούργιο συνεισφέρει στα γεγονότα μας (στα $5 \sigma_{N_b}$ έχουμε πιθανότητα ~ 2 στα 10 εκατομμύρια να είναι το παίξιμο του υποβάθρου που μας έδωσε τα παρατηρούμενα $N_{ολ}$ γεγονότα, οπότε γι αυτό λέμε ότι είναι απίθανο να είναι πια το υπόβαθρο που μας ξεγελάει κι έτσι βγάνουμε στον κόσμο και λέμε ότι ανακαλύψαμε κάτι καινούργιο). Το εκτιμώμενο σήμα είναι ίσο με $N_s = N_{ολ} - \langle N_b \rangle$ γεγονότα, και λέμε ότι το N_s είναι σημαντικά διαφορετικό από το 0 (με σημαντικότητα $> 5 \sigma_{N_b}$).
- i) Αν είναι λιγότερο από $3 \sigma_{N_b}$, τότε ξέρουμε ότι μπορεί να είναι και το παίξιμο του υποβάθρου που μας έδωσε τα παρατηρούμενα $N_{ολ}$ γεγονότα, οπότε λέμε ότι δεν έχω ένδειξη για κάτι καινούργιο και απλά περιμένουμε να μαζέψουμε περισσότερα γεγονότα και να επανεκτιμήσουμε την κατάσταση τότε. (δηλ, το $N_s = N_{ολ} - \langle N_b \rangle$ είναι συμβατό με την τιμή 0 στα $< 3\sigma$, όπως λέμε.).

Εσάς, πόσα σ_{N_b} μακριά είναι το $N_{ολ}$ από το $\langle N_b \rangle$; Ανάλογα με την απάντηση έχετε:

" $< 3\sigma$: δεν έχω ένδειξη", " $> 3\sigma$: έχω ένδειξη" ή " $> 5\sigma$: έχω ανακάλυψη" ενός σήματος.

Δείγμα γεγονότων	Εκτίμηση για τον αριθμό γεγονότων υποβάθρου ($\langle N_b \rangle$) στην περιοχή του σήματος (120 – 130 GeV)	Πλήθος γεγονότων που μετράτε στην περιοχή σήματος: $N_{ολ}$	Περίσσεια γεγονότων πάνω από το αναμενόμενο υπόβαθρο : $N_{ολ} - \langle N_b \rangle$. Δώστε τη διαφορά, τόσο σε αριθμό, όσο και σε μονάδες σίγμα ($\sigma_{N_b} = \sqrt{\langle N_b \rangle}$). Π.χ. $N_{ολ} - \langle N_b \rangle = 12.4$ γεγονότα, με $\sigma_{N_b} = 3.1$ -> $N_s = 4 \sigma_{N_b}$ από τα 0 (μηδέν) γεγονότα	Ένδειξη για Higgs;
Η Ομάδα σας μόνο				
Όλοι				

3β) Τώρα απαντήστε πάλι το παραπάνω ερώτημα (3α), αλλά θα απαντήσετε με βάση τις πιθανότητες από κατανομή Poisson, αντί για τις πιθανότητες από Γκαουσιανή κατανομή.

Πιο πάνω κάνατε ουσιαστικά το εξής: θεωρήσατε την κατανομή του υποβάθρου Nb να είναι μια Γκαουσιανή (Gaussian, "κανονική" ή "normal" κατανομή) με μέση τιμή $\langle Nb \rangle$ και σίγμα = $\sigma_{Nb} = \sqrt{\langle Nb \rangle}$. Η αλήθεια είναι ότι κάθε κατανομή που περιγράφει τον αριθμό παρατηρούμενων γεγονότων είναι κατανομή **Poisson**. Μια Poisson με μέση τιμή μ έχει RMS(=σίγμα) που είναι $\sigma = \sqrt{\mu}$.

[ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Γι' αυτό όταν παρατηρούμε N γεγονότα, λέμε ότι η φύση μας έδωσε αυτή την παρατήρηση N γεγονότων από μια κατανομή Poisson με μέση τιμή N (αφού έχουμε μόνο μία παρατήρηση, αυτή είναι η καλύτερη εκτίμησή μας για τη μέση τιμή με την οποία δουλεύει η φύση...), η οποία Poisson, όπως όλες οι Poisson, έχει **RMS = $\sqrt{\langle N \rangle}$**].

Όταν λοιπόν θέλω να κάνω την ερώτηση: αν κατά μέσο όρο περιμένω μ γεγονότα (όχι κατ' ανάγκη ακέραιο αριθμό, γιατί μπορεί το μ αυτό να το έχω υπολογίσει ως μέση τιμή κάποιων παρατηρήσεων), ποιά είναι η πιθανότητα να κάνω ένα πείραμα και να μετρήσω n γεγονότα; (το n είναι φυσικά ακέραιος θετικός αριθμός, γιατί ή θα μετρήσω 0 γεγονότα, ή 1, ή 2, ή 3 κλπ.).

Η κατανομή των n είναι Poisson και η πιθανότητα αυτή είναι: **$P(n | \mu) = (\mu^n e^{-\mu}) / n!$**

(πάλι αγνοούμε ότι το $\mu = \langle Nb \rangle$ δεν το ξέρουμε με άπειρη ακρίβεια, αλλά το ξέρουμε με ακρίβεια $\sigma_{\langle Nb \rangle}$)
Π.χ, αν έχουμε μέση τιμή $\mu = 5.25$ γεγονότα, η πιθανότητα να κάνουμε πείραμα και να δούμε $n=10$ γεγονότα, είναι: $P(10 | 5.25) = (5.25^{10} e^{-5.25}) / 10! = 2.3 \cdot 10^{-2} = 2.3\%$

Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η πιθανότητα να κάνουμε μέτρηση και να δούμε όσα είδαμε (n) ή και παραπάνω γεγονότα:

οπότε θέλουμε την πιθανότητα: **$P(n | \mu) + P(n+1 | \mu) + P(n+2 | \mu) + \dots + P(\text{άπειρο} | \mu)$** .

Επειδή εδώ έχω άπειρο πλήθος όρων, συμφέρει να υπολογίσω το εξής:

$$1 - [P(0 | \mu) + P(1 | \mu) + \dots + P(n-1 | \mu)],$$

γιατί $P(0 | \mu) + P(1 | \mu) + \dots + P(\text{άπειρο} | \mu) = 1 = 100\%$ πιθανότητα να βρώ n από 0 έως άπειρο.

Μπορείτε να το υπολογίσετε μόνοι σας, ή και να το βάλετε σε online calculator. π.χ:

<https://www.easycalculation.com/statistics/poisson-distribution.php>

Εκεί δίνει δύο απαντήσεις: στο "Poisson distribution" δίνει το **$P(n | \mu)$**

και στο "Cumulative Poisson Distribution" δίνει το **$P(0 | \mu) + \dots + P(n | \mu)$**

Οπότε από αυτά μπορείτε εύκολα να βρείτε την πιθανότητα που μας ενδιαφέρει:

$$P(n | \mu) + P(n+1 | \mu) + \dots + P(\text{άπειρο} | \mu)$$

Αυτή η πιθανότητα μας λέει αν μπορούμε να εξηγήσουμε τα γεγονότα που παρατηρούμε ως παίξιμο του υποβάθρου και μόνο. Αν αυτή η πιθανότητα είναι πολύ μικρή, τότε λέμε ότι είναι απίθανο να είναι το υπόβαθρο που έτυχε να δώσει το συνολικό Νολ που παρατηρούμε. Οι τιμές πιθανότητας που χρησιμοποιούμε είναι αυτές που αναφέραμε στο ερώτημα, 3α: αυτές που αντιστοιχούν στα 3σ ή 5σ μιας Γκαουσιανής: ανάλογα με την πιθανότητα $1 - [P(0 | \mu) + P(1 | \mu) + \dots + P(n-1 | \mu)]$, λέω: "πιθανότητα $> 1.35 \cdot 10^{-3}$: δεν έχω ένδειξη για τίποτα παραπάνω από το υπόβαθρο",
"πιθανότητα $< 1.35 \cdot 10^{-3}$: έχω ένδειξη για συνεισφορά ενός σήματος",
"πιθανότητα $< 2.35 \cdot 10^{-7}$: είμαι σίγουρος ότι έχω συνεισφορά σήματος -> ανακάλυψη σήματος!"

Βάλτε λοιπόν τα αποτελέσματά σας στον παρακάτω πίνακα και ξαναβγάλτε συμπέρασμα για το αν βλέπετε Higgs ή όχι, τώρα που χρησιμοποιείτε την πιθανότητα υπολογισμένη με κατανομή Poisson.

Δείγμα γεγονότων	Εκτίμηση για τον αριθμό γεγονότων υποβάθρου ($\langle N_b \rangle$) στην περιοχή του σήματος (120 – 130 GeV)	Πλήθος γεγονότων που μετράτε στην περιοχή σήματος: Νολ	Πιθανότητα να κάνουμε μια μέτρηση και να δούμε Νολ γεγονότα ή και παραπάνω, όταν η φύση δουλεύει με μέση τιμή $\langle N_b \rangle$	Ένδειξη για Higgs;
Η Ομάδα σας μόνο				
Όλοι				

Στο όριο της μεγάλης μέσης τιμής μ , η προσέγγιση της Poisson σαν Γκαουσιανής είναι καλός, και αυτό θα το κάνετε στα γεγονότα Higgs $\rightarrow \gamma \gamma$ σε παρακάτω ερώτημα. Το κάνατε ήδη στο προηγούμενο ερώτημα, 3α, μόνο που αν δεν είχατε N_b πάνω από ~ 15 , τότε δεν είναι καλή η προσέγγιση της Poisson σαν Γκαουσιανής.

3γ) Κάντε τα εξής για να καταλάβετε ότι δεν είναι καθόλου εύκολο να δείτε το Higgs:

Διαλλέξτε "Higgs simulated data" 10 fb^{-1} και "Analyzed data (real data)" Nothing και δείτε πώς θα φαινόταν το Higgs με μάζα 125 GeV σ' αυτό το ιστόγραμμα αν δεν υπήρχαν καθόλου γεγονότα υποβάθρου να σας μπρερδέουν. Πόσα γεγονότα Higgs είναι στο διάγραμμα (περίπου); Αν διαλλέγατε 25 fb^{-1} αντί για 10 fb^{-1} , πόσα γεγονότα Higgs μετράτε (περίπου); Τα νούμερα " 10 fb^{-1} " και " 25 fb^{-1} " είναι η "ολοκληρωμένη φωτεινότητα" (integrated luminosity) η οποία μας δίνει μία μέτρηση του πόσες πολλές συγκρούσεις πρωτονίων αναλύουμε για να κάνουμε τις μετρήσεις μας: ο αριθμός των δεδομένων στο δείγμα που εξετάζουμε είναι ευθέως ανάλογος με την ολοκληρωμένη φωτεινότητα.

Σημείωση: για τα προσομοιωμένα γεγονότα ("simulated data") δίνεται ο μέσος αριθμός γεγονότων που περιμένουμε, οπότε αυτός ο αριθμός μπορεί να μην είναι ακέραιος (μπορεί π.χ. κάποιος να σας πεί ότι περιμένουμε 8.4 γεγονότα κατά μέσο όρο). Βέβαια, ο αριθμός γεγονότων που παρατηρούμε όταν κάνουμε μία μέτρηση είναι πάντα ακέραιος αριθμός (0,1,2,3 κλπ γεγονότα). Όμως ο μέσος όρος πολλών μετρήσεων μπορεί να είναι ένας μη-ακέραιος αριθμός, Πχ., Αν δύο πειράματα μέτρησαν 3 και 4 γεγονότα αντίστοιχα, τότε ο μέσος όρος είναι 3.5 γεγονότα. Οπότε μην σας παραξενεύει που ο αναμενόμενος αριθμός γεγονότων μπορεί να είναι μη-ακέραιος αριθμός.

3δ) Τώρα κάντε το ίδιο με το γ) πιο πάνω, αλλά να αντί για το συνδυασμό

"Higgs simulated data" 10 fb^{-1} και "Analyzed data (real data)" Nothing, βάλτε

"Higgs simulated data" 10 fb^{-1} και "Analyzed data (real data)" Student distribution

Τι παρατηρείτε; Είναι εύκολο να δείτε το Higgs τώρα; Γιατί ναι ή γιατί όχι;

Αν αλλάξετε το "Higgs simulated data" 10 fb^{-1} σε 25 fb^{-1} (μόνο το 25 fb^{-1} και το Student distribution να είναι επιλεγμένα) τι παρατηρείτε; Σας φαίνεται πιο εύκολη η ανακάλυψη του Higgs τώρα; Γιατί ναι ή γιατί όχι; Πόσα γεγονότα έχει μετρήσει η τάξη σας στα 3 bins που είναι το προσομοιωμένο Higgs;

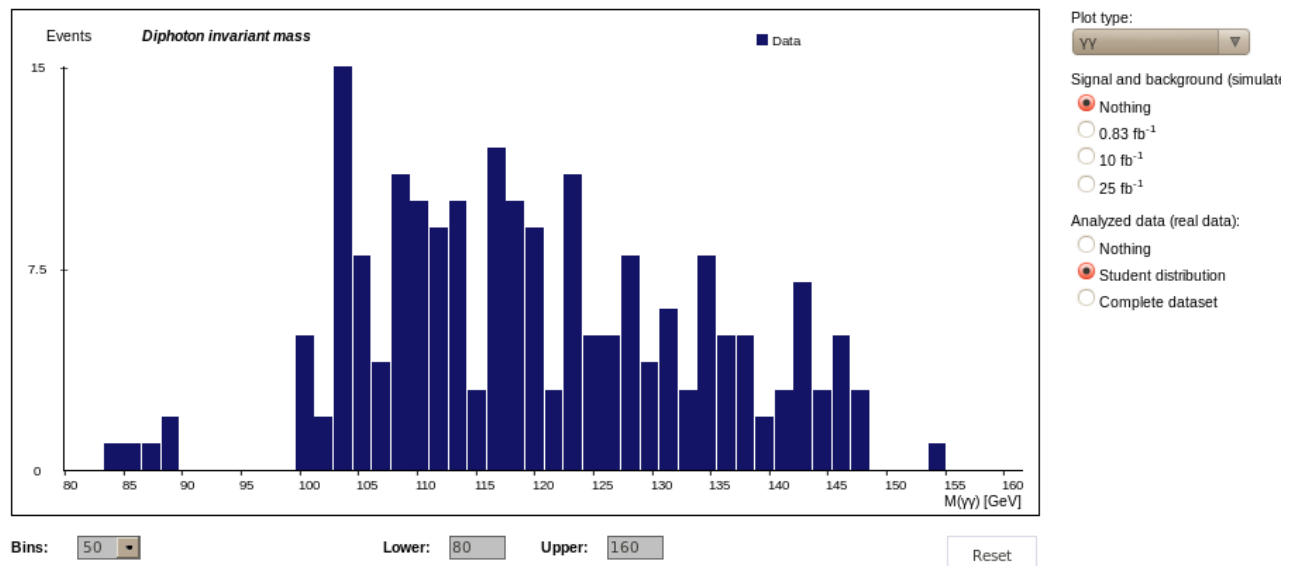
5.3 Για τα γεγονότα με δύο φωτόνια από τα διαγράμματα “γγ” (Plot type γγ)

Το παρακάτω ιστόγραμμα είναι από το “Moderator” και έχει όλα γεγονότα που ανέλυσε η τάξη σας.

OPloT - MasterClass – Combination for Thessaloniki_undegrad on 2013-04-23

Start Student Moderator Tutor Administrator

Friday, May 17th 2013 - 21:14:46 CEST



5.3.1 Ερώτηση 4 [2 μονάδες]:

4α) Κοιτώντας το αντίστοιχο ιστόγραμμα με τα γεγονότα της ομάδας σας μόνο, νομίζετε, έτσι απλά κοιτώντας το ιστόγραμμα, ότι έχετε ένδειξη ότι υπάρχει το σωματίδιο Higgs με μάζα ~125 GeV ;

Από εδώ και πέρα χρησιμοποιήστε μόνο το ιστόγραμμα με ΟΛΑ τα γεγονότα της τάξης. Κοιτώντας τα γεγονότα της τάξης σας (μόνο το "student distribution" να είναι επιλεγμένο στα δεξιά του ιστογράμματος, ενώ το "Signal and background (simulated...)" να είναι στο "Nothing"), νομίζετε ότι έχετε ένδειξη για Higgs με μάζα 125 GeV;

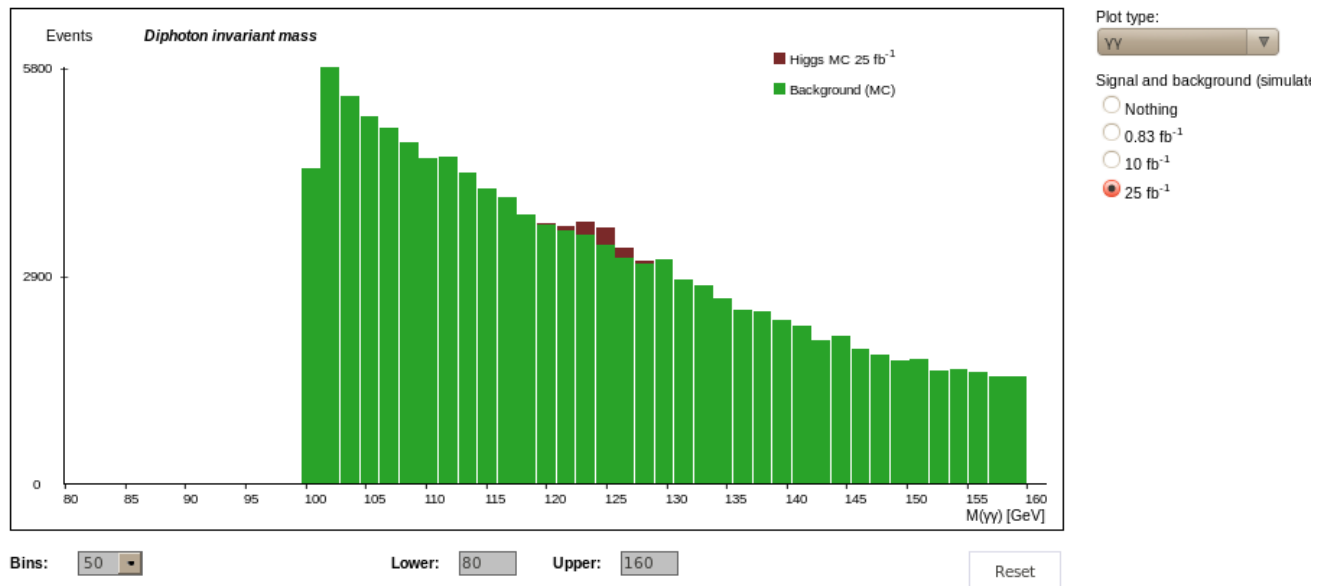
Για να δείτε ότι δεν είναι εύκολο να δείτε το Higgs, κάντε το εξής:

Διαλέξτε "Signal and background (simulated...)" 25 fb⁻¹ όπως στο πιο κάτω ιστόγραμμα και δείτε ότι πάνω σε ένα πολύ μεγάλο πλήθος από γεγονότα υποβάθρου (με πράσινο χρώμα) έρχονται να προστεθούν και μερικά γεγονότα από Higgs (με κεραμυδί χρώμα). Σε ποιά περιοχή εμφανίζονται τα γεγονότα από Higgs;

OPlot - MasterClass – Combination for Thessaloniki_undegrad on 2013-04-23

Start Student Moderator Tutor Administrator

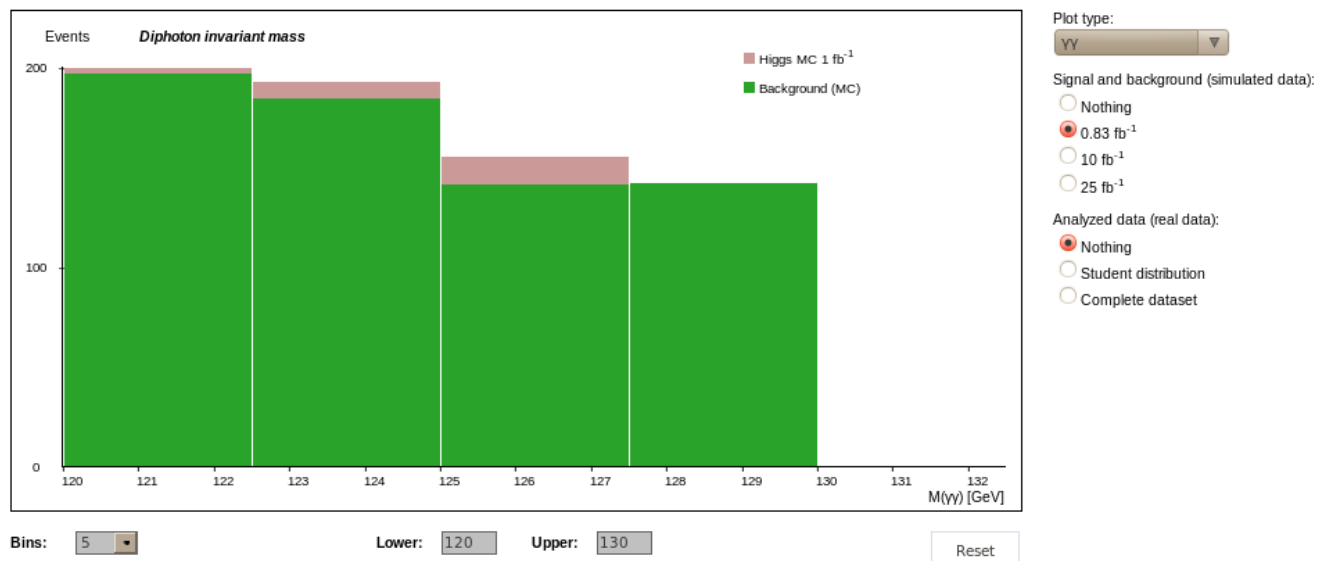
Friday, May 17th 2013 - 21:15:28 CEST



OPlot - MasterClass – Combination for all institutes on 2013-04-23

Start Student Moderator Tutor Administrator

Saturday, May 18th 2013 - 17:27:04 CEST



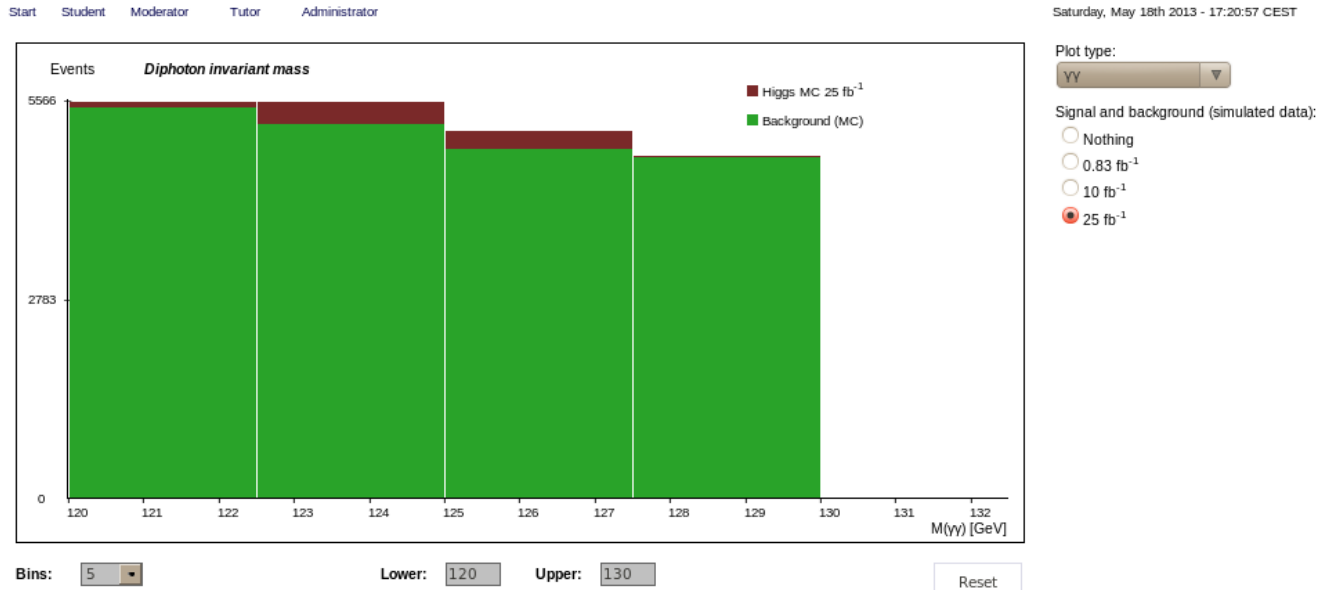
4β) Τώρα να μετρήσετε αν υπάρχει σ' αυτά τα προσομοιωμένα γεγονότα ένδειξη ότι υπάρχει το σωματίδιο Higgs.

Επιλέξτε 2 fb⁻¹ για την ολοκληρωμένη φωτεινότητα του προσομοιωμένου δείγματος γεγονότων, και επικεντρώστε το ιστόγραμμα στην περιοχή 120-130 GeV με βήμα 2.5 GeV (Bins=5), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κοιτάξτε τα 3 αριστερά bins και με ένα χαρτί μιλιμετρέ ή ένα χάρακα αντιστοιχείστε πόσα χιλιοστά αντιστοιχούν στα π.χ. 200 γεγονότα του αριστερού bin. Μετά μετρώντας το ύψος κάθε bin και γνωρίζοντας την αντιστοιχία, καταγράψτε για τα 2 μεσαία bins (122.5-127.5 GeV) πόσα γεγονότα υποβάθρου και πόσα γεγονότα Higgs ("σήμα") βλέπετε σε κάθε bin χωριστά,

αλλά και το άθροισμα των 2 bins. Ας πούμε ότι αναμένουμε $\langle N_b \rangle$ γεγονότα υποβάθρου και $\langle N_s \rangle$ γεγονότα σήματος (Higgs). Αν κάνατε πείραμα θα αναμένατε λοιπόν $N_{\text{ολ}} = \langle N_s \rangle + \langle N_b \rangle$ γεγονότα, που προέρχονται και από υπόβαθρο και από σήμα.

Για να υπολογίσετε αν έχετε ελπίδες να δείτε το αναμενόμενο $\langle N_s \rangle$ πάνω από το αναμενόμενο υπόβαθρο $\langle N_b \rangle$, θα δουλέψετε σαν να είχατε πραγματικά δεδομένα όπου θα μετρούσατε $N_{\text{ολ}} (= \langle N_s \rangle + \langle N_b \rangle)$ γεγονότα, και έχοντας μια εκτίμηση για το $\langle N_b \rangle$ θα υπολογίζατε αν η διαφορά $N_{\text{ολ}} - \langle N_b \rangle$ είναι σημαντικά διαφορετική από το 0.

OPloT - MasterClass – Combination for all institutes on 2013-04-23



Ακολουθώντας τη λογική του ερωτήματος 3α (παράγραφος 4.3.1), συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα και γράψτε στην προτελευταία στήλη πόσα $\sigma_{N_b} = \sqrt{\langle N_b \rangle}$ μακριά είναι το $N_{\text{ολ}}$ από το $\langle N_b \rangle$ [αλλιώς διατυπωμένο: πόσα σ_{N_b} πάνω από το 0 είναι το πιθανό $N_s (= N_{\text{ολ}} - N_b)$]. Δώστε την απάντηση για κάθε δείγμα γεγονότων (2, 10 και 25 fb^{-1}) και γράψτε στην τελευταία στήλη " $<3\sigma$: δεν έχω ένδειξη", " $>3\sigma$: ένδειξη" ή " $>5\sigma$: ανακάλυψη".

Καλύτερεύουν ή χειροτερεύουν τα πράγματα όσο μεγαλώνει το δείγμα γεγονότων που αναλύουμε; Με βάση αυτά, είναι λογικό ή όχι ότι η ανακοίνωση για την ανακάλυψη του Higgs δεν έγινε στον πρώτο μήνα λειτουργίας του LHC, αλλά έγινε αρκετά αργότερα; Τι νομίζεται ότι περίμεναν οι φυσικοί για να ανακοινώσουν την ανακάλυψη του Higgs;

Δείγμα (fb^{-1})	Αριθμός γεγονότων υποβάθρου ($\langle N_b \rangle$) κι από τα 2 bins (122.5 – 127.5 GeV)	Αναμενόμενο άθροισμα γεγονότων: $\langle N_b \rangle + \langle N_s \rangle = N_{\text{ολ}}$	Περίσσεια γεγονότων πάνω από το αναμενόμενο υπόβαθρο : $N_{\text{ολ}} - \langle N_b \rangle$. Δώστε τη διαφορά αυτή, τόσο σε αριθμό, όσο και σε μονάδες σίγμα ($\sigma_{N_b} = \sqrt{\langle N_b \rangle}$). Π.χ. $N_{\text{ολ}} - \langle N_b \rangle = 12.4$ γεγονότα, με $\sigma_{N_b} = 3.1 \Rightarrow N_s = 4$ σ_{N_b} από τα 0 (μηδέν)	Ένδειξη για Higgs;
2				
10				
25				

ΣΗΜΕΙΩΣΗ #1:

Έχετε υπ' όψιν σας ότι κάθε φορά που το δείγμα των δεδομένων μας μεγαλώνει, *αυξάνει ανάλογα* και ο αριθμός των γεγονότων: και των γεγονότων σήματος (Higgs) και του υποβάθρου, οπότε και ο ολικός αριθμός.

Οπότε:

αν σε δείγμα γεγονότων που αντιστοιχεί σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα (integrated luminosity) 0.82fb^{-1} έχουμε

N_s : αριθμός γεγονότων Higgs

N_b : αριθμός γεγονότων υποβάθρου

(N_b+N_s) : και τα δύο μαζί,

τότε, όταν πάρουμε ένα δείγμα 10fb^{-1} γεγονότων, που αντιστοιχεί σε $10/0.82 (= 12.2)$ φορές περισσότερες συγκρούσεις πρωτονίων (και άρα σε 12.2 φορές μεγαλύτερο δείγμα γεγονότων), θα πρέπει σ' αυτό το μεγαλύτερο δείγμα να έχουμε περίπου $10/0.82 = 12.2$ φορές περισσότερα γεγονότα όλων των τύπων, δηλαδή:

$12.2 * N_s$: αριθμός γεγονότων Higgs

$12.2 * N_b$: αριθμός γεγονότων υποβάθρου

$12.2 * (N_b+N_s)$: και τα δύο μαζί

Προσέξτε λοιπόν να μην κάνετε λάθος και μετράτε και στις 3 περιπτώσεις (0.82 , 10 και 25fb^{-1}) πάντα τον ίδιο αριθμό γεγονότων περίπου!

==> Προσέξτε ότι το μέγιστο στον άξονα y (που δείχνει τον αριθμό των γεγονότων) αυξάνει ανάλογα με την “ολοκληρωμένη φωτεινότητα” (integrated luminosity) του δείγματος γεγονότων. Έτσι πχ. ο αριθμός όλου του τύπου γεγονότων που βρίσκουμε σε ένα δείγμα των 25fb^{-1} είναι περίπου 2.5 φορές περισσότερα από αυτά που βρίσκουμε σε ένα δείγμα των 10fb^{-1} .

ΣΗΜΕΙΩΣΗ #2:

Υπάρχουν καλύτεροι προσεγγιστικοί τύποι από το $(N_{\text{ολ}} - \langle N_b \rangle) / \sqrt{\langle N_b \rangle}$ που χρησιμοποιήσαμε στην εργασία αυτή για να υπολογίσουμε τη “σημαντικότητα” μιας παρατήρησης ως προς την υπόθεση ότι αυτό που παρατηρείτε ($N_{\text{ολ}}$) είναι μόνο υπόβαθρο N_b . Αυτοί οι τύποι παίρνουν υπ' όψιν τους το στατιστικό παίξιμο όχι μόνο του υποβάθρου αλλά και του παρατηρούμενου πλήθους γεγονότων $N_{\text{ολ}}$.

Και επίσης ότι η μέση τιμή για το υπόβαθρο $\langle N_b \rangle$ δεν είναι γνωστό με άπειρη ακρίβεια, αλλά η εκτίμηση της μέσης τιμής του υποβάθρου έχει σφάλμα $\sigma_{\langle N_b \rangle}$.

Κώστας Κορδάς

Παράρτημα: Παραδείγματα γεγονότων

Για μια γρήγορη ματιά στον τρόπο ταυτοποίησης των διαφόρων τύπων γεγονότων, δείτε:_

http://cernmasterclass.uio.no/2013/webpages/material/cheat-sheet_en.pdf

Παράδειγμα παρακάτω: ταυτοποίηση σωματιδίων Z που έχουν διασπεί σε $e^+ e^-$ ή σε $\mu^+ \mu^-$

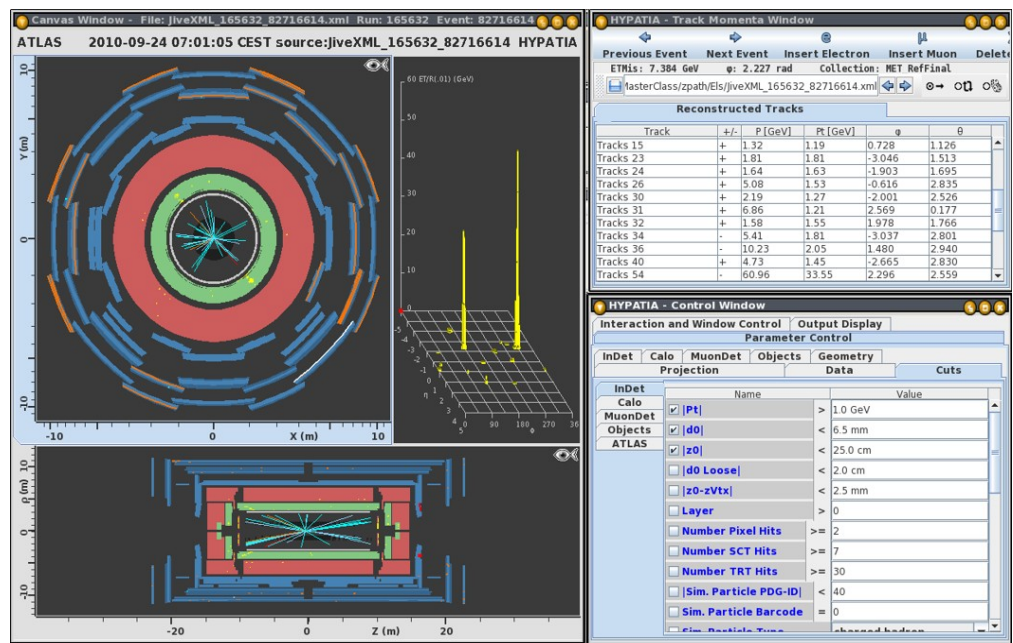
Για να ταυτοποιήσετε ένα γεγονός ως γεγονός-σήμα εφαρμόστε τα ακόλουθα κριτήρια. **Ένα γεγονός, είναι πράγματι υποψήφιο γεγονός-σήμα, αν:**

- έχει δύο ίδιου τύπου λεπτόνια με αντίθετο φορτίο (δηλαδή, ηλεκτρόνιο-ποζιτρόνιο ή μόνιο-αντιμόνιο),
- που παρουσιάζονται απομονωμένα, δηλαδή ΟΧΙ μέσα σε ΠΙΔΑΚΑ σωματιδίων (“jet”), και
- κάθε ένα λεπτόνιο έχει εγκάρσια ορμή (Pt) μεγαλύτερη από 5 GeV/c.

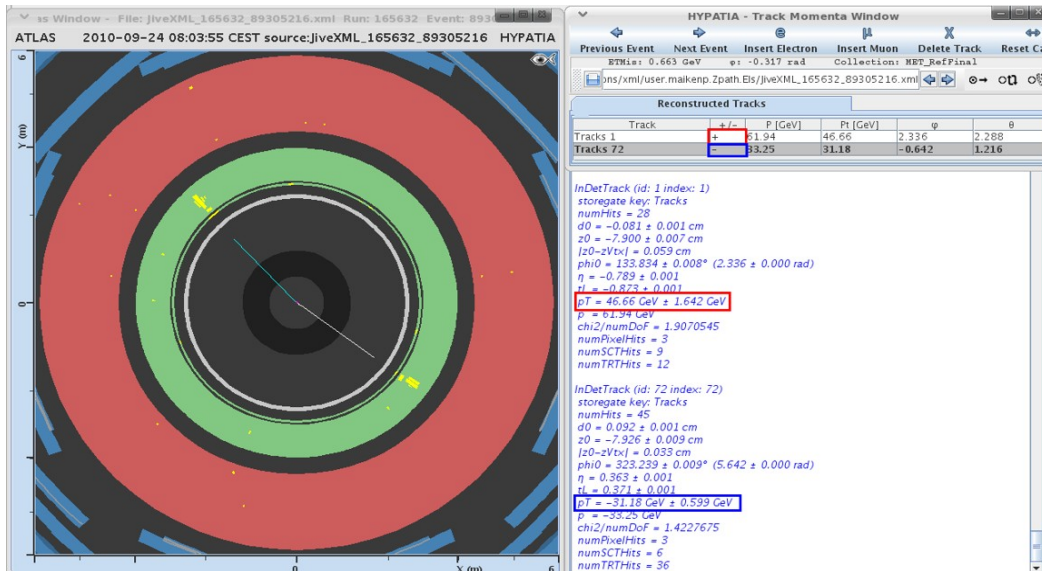
Μόνο αν όλα τα κριτήρια πληρούνται, τότε μπορεί στο γεγονός αυτό να δημιουργήθηκε ένα σωματίδιο Z, οπότε είναι ένα υποψήφιο γεγονός-σήματος.

Σημείωση για τα γεγονότα υποβάθρου:

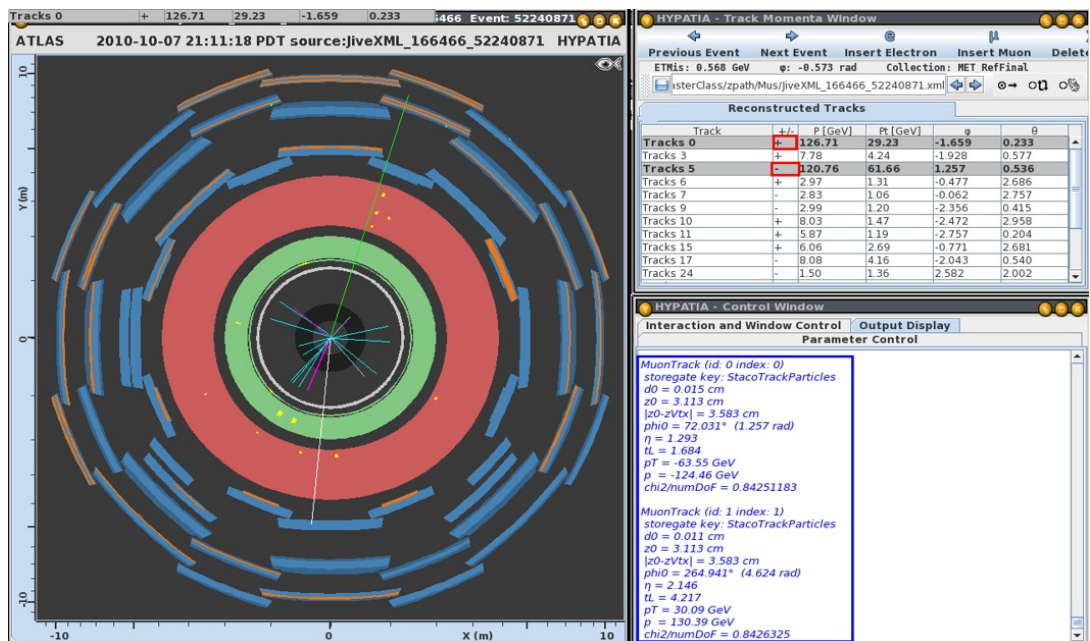
- Μπορεί ένα γεγονός υποβάθρου να είναι ένα γεγονός $W^- \rightarrow e^- \nu$ ή $W^- \rightarrow \mu^- \nu$, όπου βλέπετε ένα (1) μόνο ενεργητικό λεπτόνιο ($P_t > 15$ GeV) και μεγάλη ελλείπουσα ενέργεια ($E_{\text{miss}} > 15$ GeV) από το διαφεύγον νεutrino.
- Μπορεί όμως σε ένα γεγονός να παράχθηκαν δύο W, δηλαδή: $pp \rightarrow W^+ W^-$.
Ή, ακόμα πιο ενδιαφέρον, σε ένα γεγονός να παράχθηκε ένα Higgs που στη συνέχεια διασπάστηκε σε δύο W, δηλαδή: $pp \rightarrow H \rightarrow W^+ W^-$, όπου τα δύο W να είναι τα προϊόντα ενός σωματιδίου Higgs!
Κι έτσι να έχετε 2 λεπτόνια (ένα από κάθε W) και μεγάλη ελλείπουσα ενέργεια από τα δύο νεutrino των W που διαφεύγουν.
 - Αν τα δύο λεπτόνια είναι ίδιου τύπου (δηλ., $e^+ e^-$ ή $\mu^+ \mu^-$) τότε έχετε ήδη κατάξει το γεγονός αυτό ως υποψήφιο σήμα (Z). Αν όμως τα δύο λεπτόνια είναι διαφορετικά (δηλ., $e^+ \mu^-$ ή $\mu^+ e^-$) κάτι τέτοιο δεν θα μπορούσε να έρχεται από την αποσύνθεση ενός Z, οπότε το κατατάξετε σίγουρα ως υπόβαθρο. Αλλά αν έχει και αρκετή ελλείπουσα ενέργεια, τότε μπορεί να είναι $H \rightarrow W^+ W^-$, οπότε καταγράψτε το: είναι βέβαια “υπόβαθρο” για τη μέτρηση που είχατε κατά νού και έτσι δεν θα το χρησιμοποιήσετε, αλλά μπορεί αυτό τελικά να σας πάει στη Στοκχόλμη!



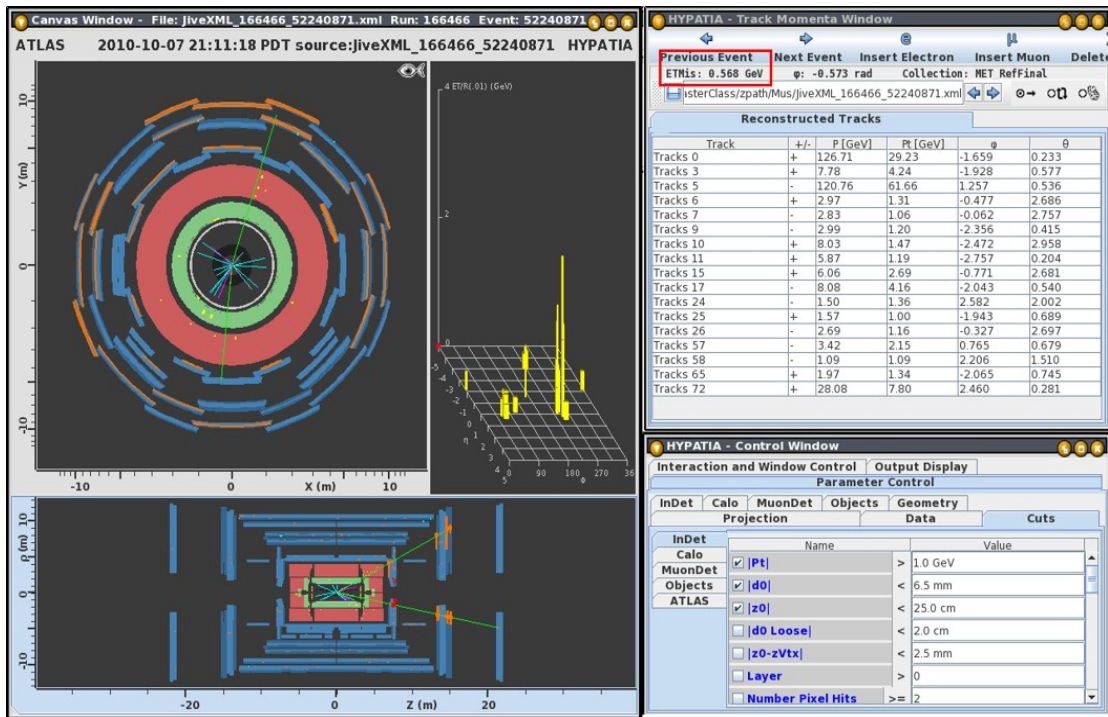
α) Σήμα:
 $Z \rightarrow e^+ e^-$



1. Τα ηλεκτρόνια φαίνονται στον καλορίμετρο σαν απομονωμένες εναποθέσεις ενέργειας (“κίτρινοι πύργοι”),
2. Η θέση τους σε συντεταγμένες η-φ φαίνονται στο πάνω δεξιό γράφημα (“lego plot”). Το φ στο δισδιάστατο αυτό διάγραμμα δίνεται σε μοίρες, ενώ στον πίνακα με τα χαρακτηριστικά κάθε τροχιάς, δίνεται σε rad.
3. Στο κάτω αριστερό γράφημα, φαίνεται η περιοχή “βαρρέλι” (“barrel region”) και τα “καπάκια” (“endcaps”) του ανιχνευτή. Η περιοχή “βαρέλι” είναι χοντρικά $-1.3 < \eta < 1.3$. Σε μεγαλύτερες τιμές του $|\eta|$, είναι τα “καπάκια” του ανιχνευτή. Στο γράφημα x-y (πάνω αριστερά) φαίνεται μόνο το βαρρέλι.
4. Κάνοντας κλικ στην τροχιά που πηγαίνει προς την εναπόθεση ενέργειας στον καλορίμετρο (την τροχιά τη βλέπω στις δύο όψεις, x-y στο πάνω αριστερό γράφημα, και p-z στο κάτω αριστερό γράφημα). Κάνοντας κλικ επιλέγεται μία από τις γραμμές στον πίνακα με τα χαρακτηριστικά των τροχιών (πάνω δεξιά). Και ανάποδα: αν κάνετε κλικ σε κάποια γραμμή του πίνακα, επιλέγεται η αντίστοιχη τροχιά στα γραφήματα πάνω αριστερά, και κάτω αριστερά.

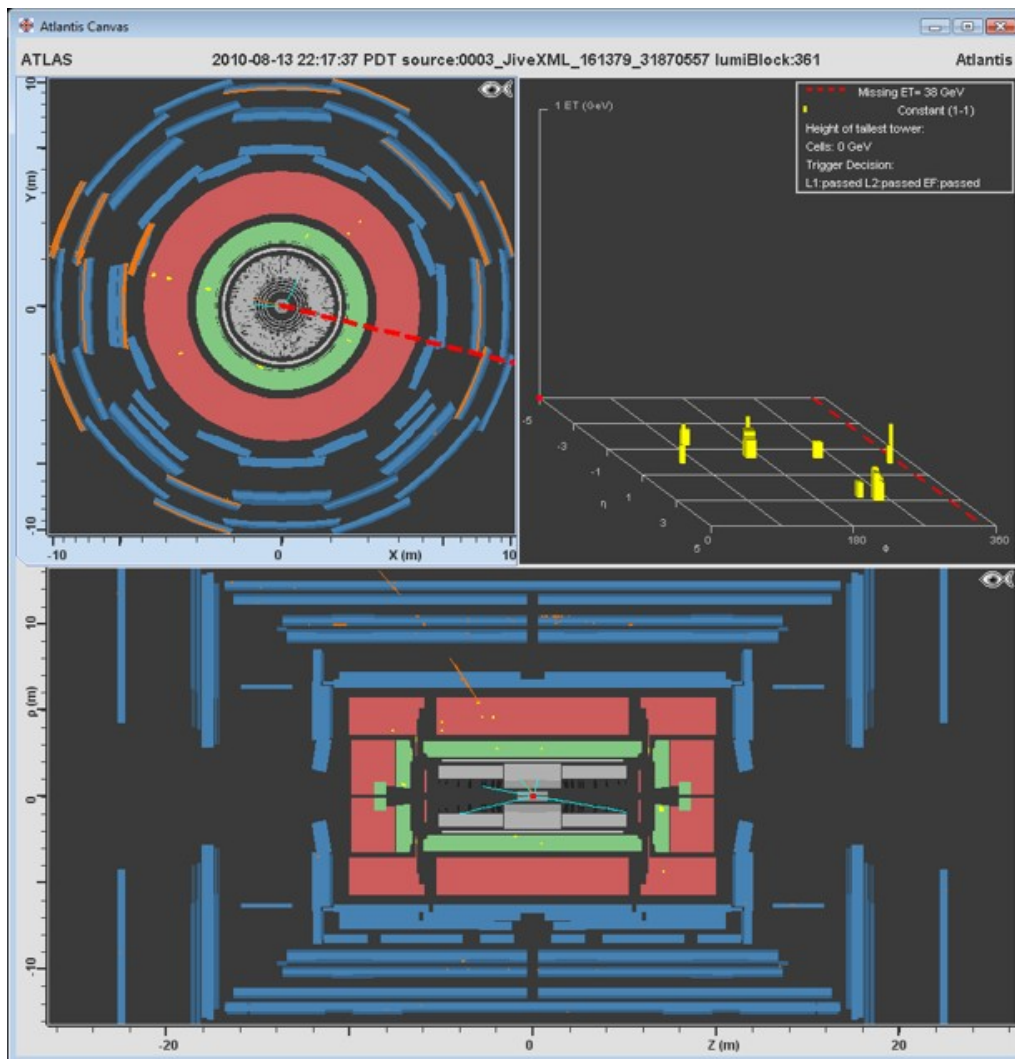


β) Σήμα:
 $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



1. Τα μόνια τα βλέπουμε στους μιονικούς ανιχνευτές, σαν δύο τροχιές σωματιδίων. Πολύ εύκολα στο κάτω αριστερό γράφημα.
2. Η θέση τους σε συντεταγμένες η φαίνονται κοιτώντας στο κάτω αριστερά γράφημα (εδώ είναι και τα δύο στα καπάκια του ανιχνευτή, άρα σε $|\eta| > 1.3$, και μάλιστα και τα δύο σε $z > 0$, οπότε σε $\eta > 0$).
3. Πάλι μπορούμε να επιλέγουμε τις τροχιές τους κάνοντας κλικ στην τροχιά στα αριστερά γραφήματα ή στην πληροφορία στον επάνω δεξιά πίνακα.

γ) Υπόβαθρο: $W^- \rightarrow \mu^- \nu$



1. Στο κάτω γράφημα βλέπουμε μόνο ένα μόνιο, στην περιοχή βαρρέλι.
2. Δεν υπάρχει δεύτερο μόνιο, άρα δεν θα μπορούσε να είναι $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$
3. Παρατηρούμε όμως ότι υπάρχει ελλείπουσα (ή διαφεύγουσα) ενέργεια “missing ET = 38 GeV” επάνω δεξιά. Η ενέργεια αυτή αναπαριστάται με μια διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στα γραφήματα. Έχουμε εμπιστοσύνη ότι ξέρουμε ότι η αρχική ορμή στο “εγκάρσιο” επίπεδο κατά τη σύγκρουση των πρωτονίων ήταν μηδέν (επίπεδο $x-y$ = εγκάρσιο ως προς τον άξονα z που είναι η δέσμη των πρωτονίων που συγκρούονται). Και επίσης εμπιστευόμαστε ότι η ορμή διατηρείται και μετά, άρα τα τελικά προϊόντα πρέπει να έχουν άθροισμα ορμών μηδέν στο εγκάρσιο επίπεδο. Μετράμε και κοιτάμε πόση ορμή μας λείπει και προς ποιά κατεύθυνση, για έχουμε άθροισμα μηδέν. Αυτό που μας λείπει είναι η ελλείπουσα (ή διαφεύγουσα) ενέργεια “missing ET”, προφανώς λόγω κάποιου νετρίνου που δεν ανιχνεύουμε.