

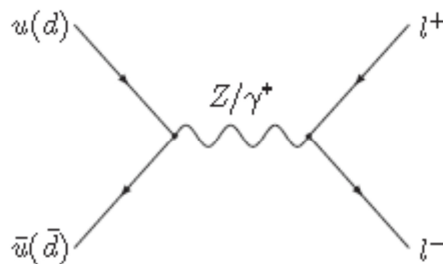
# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΝΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ATLAS

Στα μεγάλα πειράματα οι ερευνητές πρέπει να αναλύσουν εκατομμύρια γεγονότα και να επιλέξουν τα υποψήφια για την ανακάλυψη. Για το σκοπό αυτό δεν εξετάζουν ένα-ένα τα γεγονότα αλλά χρησιμοποιούν τεχνικές που θα μάθετε σε αυτή την άσκηση.

## Εισαγωγή

Αρχικά ας μιλήσουμε για την ανίχνευση του μποζονίου  $Z$  και συγκεκριμένα για την διάσπαση του σε ένα ζευγάρι (αντίθετου φορτίου) ηλεκτρονίων ή μιονίων. Το  $Z$  έχει μικρή πιθανότητα να πάει σε αυτά τα κανάλια διάσπασης (~3% στο καθένα) αλλά η υπογραφή που αφήνει στον ανιχνευτή είναι εύκολα παρατηρήσιμη και συγχρόνως, επειδή η μάζα του είναι μετρημένη καλά από επιταχυντές ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα προϊόντα διάσπασης για να βαθμονομήσουμε τον ανιχνευτή.

Ένα παράδειγμα διαγράμματος παραγωγής του  $Z$  από κουάρκ δίνεται στο σχήμα 1

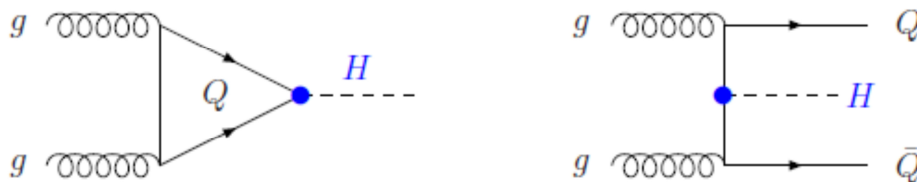


Σχ.1 Παράδειγμα παραγωγής του  $Z$  μποζονίου από αδρόνια

Το σχήμα χρησιμοποιεί την καμπυλωτή γραμμή  $Z/\gamma^*$  για να υποδηλώσει ότι εκτός από το  $Z$  παράγονται και δυνητικά φωτόνια σε μία ευρεία περιοχή μαζών (μηχανισμός Drell-Yan). Τα ζευγάρια αυτά των λεπτονίων από την διάσπαση των «δυνητικών» φωτονίων, που έχουν μάζες στην περιοχή της μάζας του  $Z$ , αποτελούν το λεγόμενο irreducible (μη-μειούμενο) υπόβαθρο, γιατί όλες οι κατανομές των κινηματικών μεταβλητών τους είναι παρόμοιες με το σήμα. Εκτός από αυτό το υπόβαθρο έχουμε και άλλα υπόβαθρα τα οποία μπορούμε να μειώσουμε (reducible) με κατάλληλη επιλογή περιορισμών (cuts). Ένα τέτοιο υπόβαθρο είναι τα ζεύγη λεπτονίων από  $W^+$  πίδακες (jets), όπου το  $W$  διασπάται σε ένα λεπτόνιο (+ένα νετρίνο) και κάποιο από τα βαριά κουάρκ-αντικουάρκ ( $b\bar{b}$  ή  $c\bar{c}$ ) διασπάται σε ένα λεπτόνιο (με την λεγόμενη ημιλεπτονική διάσπαση) και σε αντινετρίνο λεπτονίου και άλλα σωματίδια έτσι ώστε η τελική κατάσταση να είναι δύο λεπτόνια αντίθετου φορτίου. Παρόμοιο υπόβαθρο μπορεί να δώσει η παραγωγή δύο πιδάκων ή ενός ζευγαριού  $t\bar{t}$  κουάρκ. Στην συνέχεια θα δούμε πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις διαφορετικές κινηματικές κατανομές για να περιορίσουμε το υπόβαθρο κάτω από το  $Z$  μποζόνιο και συγχρόνως σαν το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης κριτηρίων για την «ανακάλυψη» του Higgs μποζονίου.

Το μποζόνιο Higgs ανακαλύφθηκε από τα πειράματα ATLAS και CMS τον Ιούλιο του 2012. Έχει μάζα  $\sim 125.5$  GeV και η ανακάλυψη του δημοσιεύθηκε στο Physics Letters B τον Σεπτέμβριο του 2012. Έτσι τέθηκε σε πέρας μια σχεδόν 50χρονη έρευνα για την ύπαρξη του, από τότε που ο Higgs και οι άλλοι εισήγαγαν τον Μηχανισμό Higgs για να εξηγήσουν γιατί τα στοιχειώδη σωματίδια/φορείς Z και W έχουν μη μηδενική μάζα.

Το Higgs στον LHC παράγεται κυρίως από διαγράμματα «σύντηξης δυο γκλουονίων», όπου το καθένα προέρχεται από το κάθε συγκρουόμενο πρωτόνιο, όπως στο Σχήμα 2

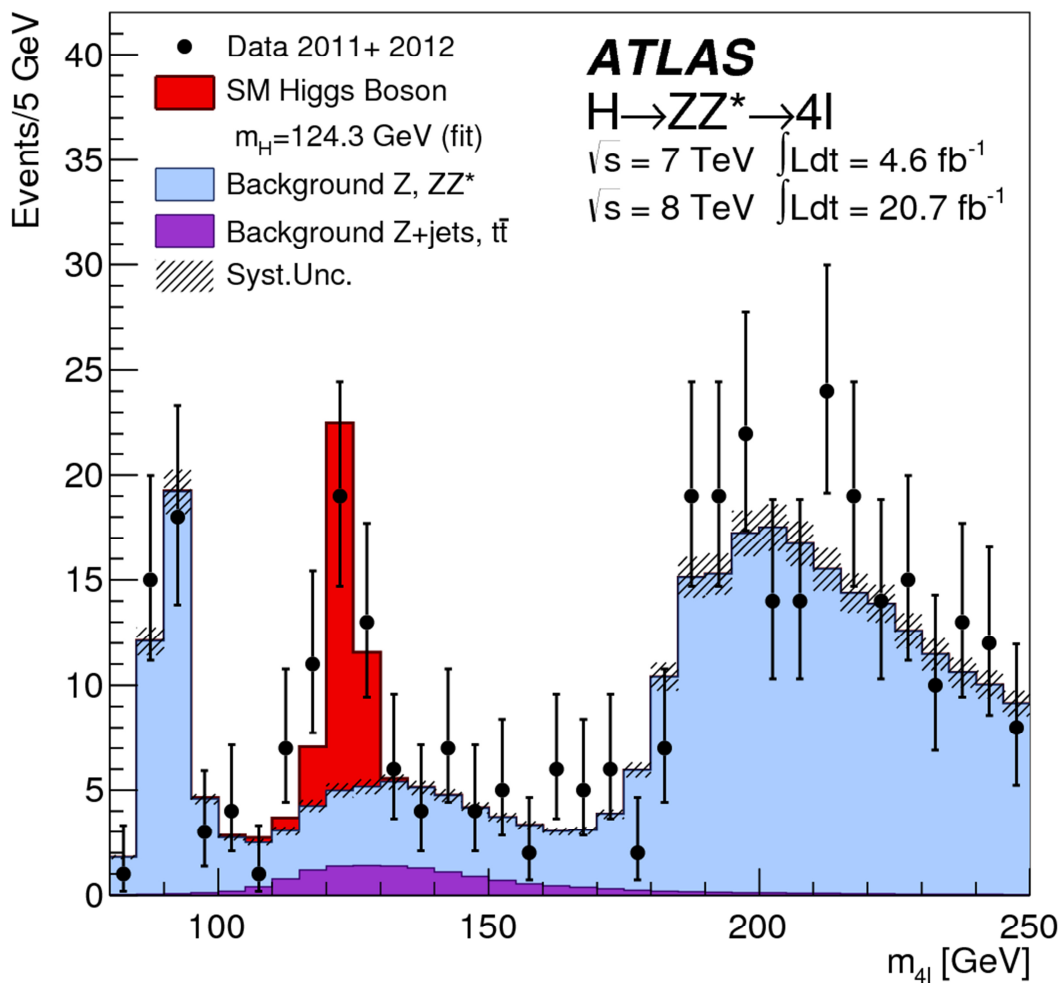


Σχ. 2 Παραγωγή Higgs σε αδρονικούς επιταχυντές από σύντηξη δυο γκλουονίων

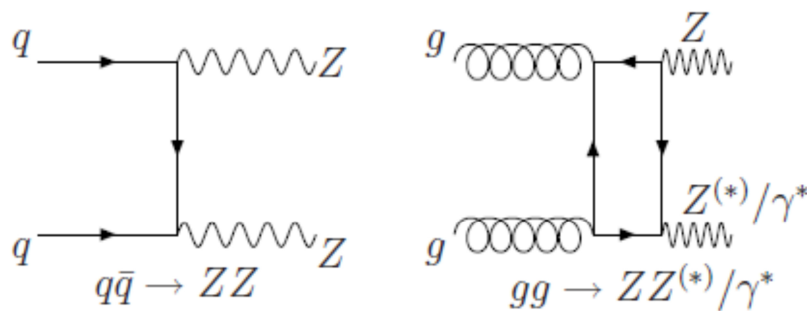
Ένας από τους ευκολότερους -για να ανιχνευθεί- τρόπους διάσπασης του Higgs είναι σε δυο μποζόνια Z. Στην συνέχεια το κάθε Z (όπως είδαμε στην αρχή) διασπάται σε δυο λεπτόνια αντίθετου προσήμου αλλά ίδιου είδους, οπότε έχουμε σαν παρατηρήσιμες τελικές καταστάσεις τα εξής:

- $H \rightarrow 2 e^+ + 2 e^-$
- $H \rightarrow 2 \mu^+ + 2 \mu^-$
- $H \rightarrow e^+ + e^- + \mu^+ + \mu^-$

Το Σχήμα 3 δείχνει την αναλλοίωτη μάζα των τεσσάρων λεπτονίων από τις μετρήσεις των δεδομένων, όπου φαίνεται μια κορυφή στα  $\sim 125$  GeV (μάζα Higgs) μαζί με την κατανομή του υποβάθρου (υπολογισμός ή εκτίμηση). Το κυρίως υπόβαθρο είναι από την κατευθείαν παραγωγή δυο Z, δηλαδή ενός ζευγαριού ZZ που όμως δεν προέρχονται από διασπάσεις του συντονισμού Higgs (όπως δείχνει το Σχήμα 4).



Σχ 3. Μάζα τεσσάρων λεπτονίων μετά τα cuts για ανάδειξη του σήματος

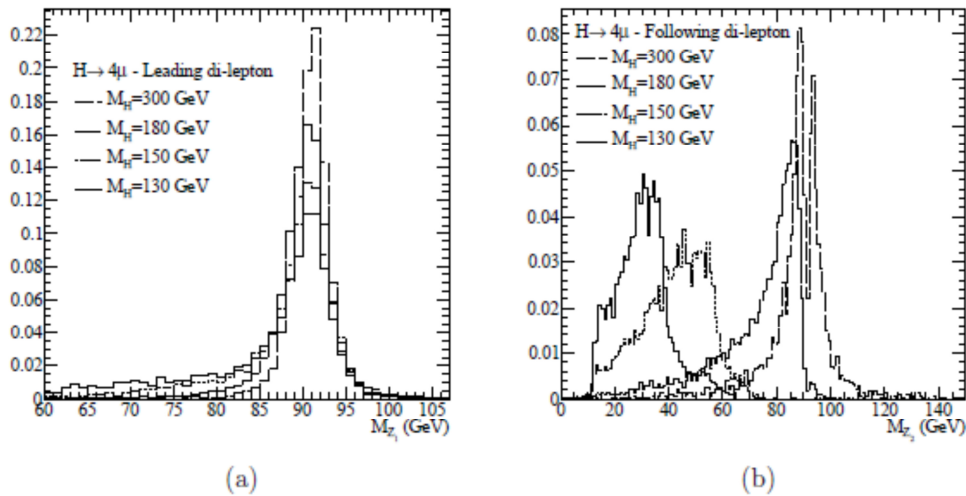


Σχ.4 Μηχανισμοί παραγωγής ZZ\* υποβάθρου

Επειδή το Higgs τώρα ξέρουμε ότι έχει μάζα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των δυο Z, λέμε ότι διασπάται σε ένα πραγματικό Z και σε ένα «δυναμικό» Z ( $Z^*$ ). Συνεπώς αν σχεδιάσει κανείς την κατανομή των μαζών του μεγαλύτερου (σε μάζα) ζευγαριού λεπτονίων αντίθετου προσήμου αλλά ίδιου είδους (ας την ονομάσουμε  $m_{12}$ ), η κατανομή θα έχει μια κορυφή κοντά στην μάζα του Z (Σχήμα 5a). Όμως η κατανομή των μαζών του άλλου ζευγαριού (ας την ονομάσουμε  $m_{34}$ ) θα έχει μια πλατιά κορυφή σε μάζες περίπου 30 GeV (Σχήμα 5b κατανομή για  $m_H \sim 130$  GeV), ενώ η συγκέντρωση γεγονότων σε μεγαλύτερες μάζες, εκεί δηλαδή όπου και τα δύο

Βελτιστοποίηση των κριτηρίων επιλογής γεγονότων για την ανακάλυψη νέας φυσικής με το πείραμα ATLAS

Z είναι πραγματικά, θα ίσχυε αν η μάζα του μποζονίου Higgs ήταν μεγαλύτερη ( $>180$  GeV). Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω θα χρησιμοποιήσουμε αυτές τις κατανομές για να διαχωρίσουμε το σήμα από το υπόβαθρο.



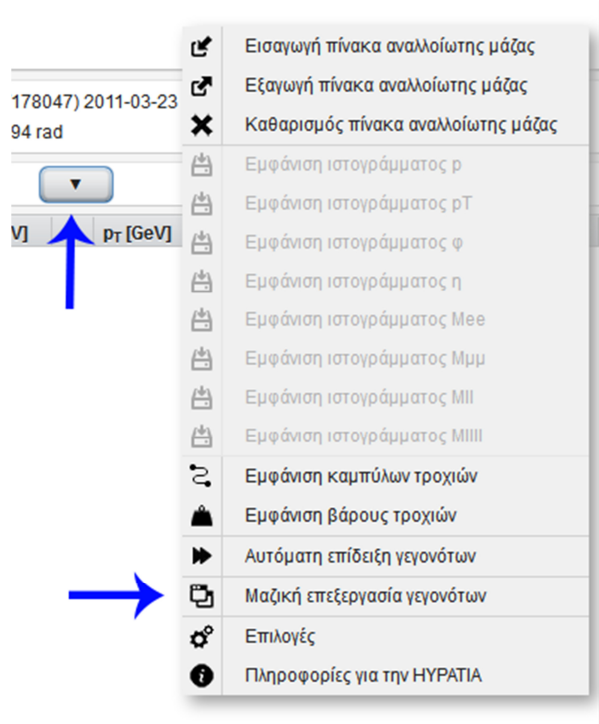
Σχ.5 Κατανομές μαζών δυο λεπτονίων αντίθετου πρόσημου και ίδιου είδους από προσομοιωμένα γεγονότα για διάφορες τιμές της μάζας του Higgs (a) για  $m_{12}$  και (b) για  $m_{34}$

Το υπόβαθρο  $ZZ^*$ , με τα δυο Z να διασπώνται σε δυο λεπτόνια το καθένα, αποτελεί το λεγόμενο irreducible (μη-μειούμενο) υπόβαθρο, γιατί όλες οι κατανομές των κινηματικών μεταβλητών είναι παρόμοιες με το σήμα. Εκτός από αυτό το υπόβαθρο έχουμε και άλλα υπόβαθρα τα οποία μπορούμε να μειώσουμε (reducible) με κατάλληλη επιλογή περιορισμών (cuts). Ένα τέτοιο υπόβαθρο είναι η παραγωγή Z+πίδακες (jets), όπου εκτός από τη διάσπαση του Z σε λεπτόνια έχουμε την παραγωγή ενός ζευγαριού βαρέων κουάρκ-αντικουάρκ ( $b\bar{b}$  ή  $c\bar{c}$ ) με το καθένα από αυτά τα κουάρκ να διασπάται σε ένα λεπτόνιο (με την λεγόμενη ημιλεπτονική διάσπαση) σε αντινετρίνο λεπτονίου και άλλα σωματίδια έτσι ώστε η τελική κατάσταση να είναι (όπως στο Higgs) τέσσερα λεπτόνια εκ των οποίων το ένα ζευγάρι να δίνει μάζα κοντά στην μάζα του Z.

Όμως εδώ οι διάφορες κατανομές διαφοροποιούνται (ελαφρά) από τις αντίστοιχες του Higgs και ο σκοπός της άσκησης σας θα είναι **να επιλέξετε τους βέλτιστους περιορισμούς (cuts) ώστε να καταπολεμήσετε/περιορίσετε το υπόβαθρο χωρίς να χάσετε πολύ σήμα**, δηλαδή -όπως λέγεται στην γλώσσα της ανάλυσης- **να βελτιστοποιήσετε το διαχωρισμό σήματος-υποβάθρου**.

## Οδηγίες για εκτέλεση

1. Τώρα που «είδατε» οπτικά μερικές δεκάδες γεγονότων είστε έτοιμοι να «τρέξετε» πολλές χιλιάδες γεγονότα έχοντας την HYPATIA σε «batch mode» δηλαδή «Μαζική επεξεργασία γεγονότων», ώστε να «κάνετε ανάλυση» του δείγματος όπως ακριβώς και οι ερευνητές.  
Την HYPATIA θα τη βρείτε στη διεύθυνση : [hypatia.iasa.gr/app](http://hypatia.iasa.gr/app)
2. Από το dropdown μενού (σχ.6) των επιλογών επιλέξτε το «Μαζική επεξεργασία γεγονότων»



Σχ.6 Dropdown menu επιλογών

Αμέσως θα εμφανιστεί το κυρίως παράθυρο όπου θα δουλέψετε για να αναλύσετε το σήμα σας, δηλαδή να βελτιστοποιήσετε τα κριτήρια επιλογής σας (cuts) ώστε να πετύχετε τον καλύτερο διαχωρισμό σήματος από υπόβαθρο (όπως εξηγήσαμε στην εισαγωγή).

3. Στο πάνω μέρος του παραθύρου επιλέξτε τα δείγματα που θα αναλύσετε (σχ.7)



Σχ.7 Παράθυρο επιλογής των δειγμάτων γεγονότων για ανάλυση

Επιλέξτε:

A) Για την μελέτη της διάσπασης του Z μποζονίου σε δύο λεπτόνια

ως **Signal = mini\_ll\_signal**

ως **Background = mini\_ll\_bkg** (είναι αθροισμένα υπόβαθρα από διάφορες πηγές)

και ως **Data = mini\_ll\_data** (πραγματικά δεδομένα από το πείραμα)

B) Για την μελέτη των διασπάσεων του Higgs σε τέσσερα λεπτόνια

ως **Signal = Mini\_H\_signal\_new**

ως **Background = Mini\_H\_background\_new**.

Το υπόβαθρο αυτό αποτελείται από το άθροισμα ZZ irreducible background συν το reducible Zb $\bar{b}$  με b $\bar{b}$   $\rightarrow$  e $^+$ e $^-$  ή  $\mu^+\mu^-$ , με τα δύο υπόβαθρα αθροισμένα σύμφωνα με τις αντίστοιχες πιθανότητες παραγωγής τους (ενεργές διατομές).

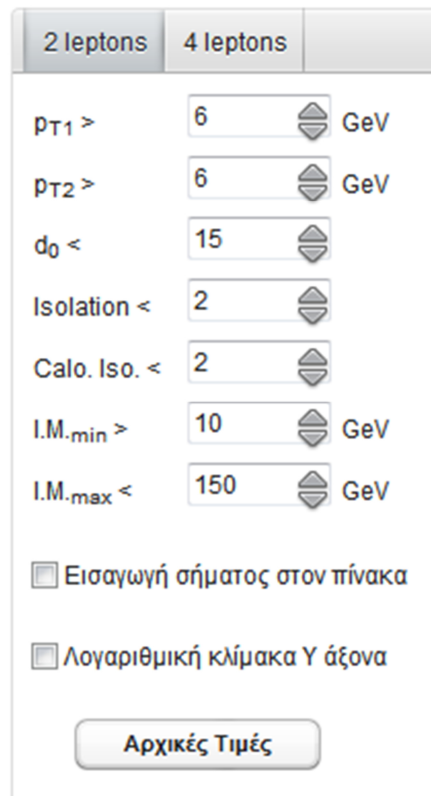
και ως **Data = mini\_4l\_data** (πραγματικά δεδομένα από το πείραμα που αντιστοιχούν στο 1/25 των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν στο Run I)

4. Επιλέξτε τι είδους ανάλυση θέλετε να κάνετε από τα 2 διαθέσιμα tabs (2 leptons για Z και 4 leptons για Higgs) πάνω αριστερά (σχ.8).



Σχ.8 Επιλογή ανάλυσης δυο ή τεσσάρων λεπτονίων

5. Τώρα είστε έτοιμοι για την κυρίως ανάλυση, δηλαδή να προσπαθήσετε με έξυπνο τρόπο να βάλετε τις κατάλληλες τιμές στις κινηματικές μεταβλητές που δίνονται στο αριστερό τμήμα του παραθύρου (σχ.9).



2 leptons	4 leptons	
$p_{T1} >$	20	GeV
$p_{T2} >$	15	GeV
$p_{T3} >$	6	GeV
$p_{T4} >$	6	GeV
$m_{12} >$	50	GeV
$m_{34} >$	2	GeV
$d_0 \mu <$	15	
$d_0 e <$	15	
Isolation <	2	
Calo. Iso. <	2	
I.M.min >	50	GeV
I.M.max <	500	GeV
<input type="checkbox"/> Εισαγωγή σήματος στον πίνακα		
<input type="checkbox"/> Λογαριθμική κλίμακα Υ άξονα		
<b>Αρχικές Τιμές</b>		

Σχ.9 Τμήμα επιλογής των cuts: (a)για δύο λεπτόνια και (b) για τέσσερα λεπτόνια

Οι επιλογές είναι οι εξής:

Στο αριστερό τμήμα του παραθύρου «Μαζική επεξεργασία γεγονότων» έχουμε επιλέξει για εσάς τις εξής κατανομές κινηματικών μεταβλητών

A) Δύο λεπτόνια

- Τις ορμές των δύο λεπτονίων που έχουν προεπιλεγεί και φτιάχνουν την αναλλοίωτη μάζα που μελετάμε (σήμα ή υπόβαθρο)  $P_{T1,2}$
- Η μεγαλύτερη παράμετρος κρούσης (βλ. Παράρτημα A) για ένα από τα δύο λεπτόνια ( $d_0$ ) του γεγονότος
- Το μεγαλύτερο (ή χειρότερο) κριτήριο απομόνωσης (βλ. Παράρτημα B) του λεπτονίου συγκριτικά με τις τροχιές άλλων φορτισμένων σωματιδίων σε ένα κοντινό κώνο.
- Το μεγαλύτερο (ή χειρότερο) κριτήριο απομόνωσης (βλ. Παράρτημα B) του λεπτονίου συγκριτικά με την κοντινή εναπόθεση ενέργειας στα καλορίμετρα.
- Επιλογή ελάχιστης (η μέγιστης) αναλλοίωτης μάζας των δύο λεπτονίων

B) Τέσσερα λεπτόνια

- Τις ορμές των τεσσάρων λεπτονίων που έχουν προεπιλεγεί και φτιάχνουν την αναλλοίωτη μάζα που μελετάμε (σήμα ή υπόβαθρο)  $P_{T1,2,3,4}$
- $m_{12}$  Μάζα του πρώτου ζευγαριού λεπτονίων πιο κοντά (σε τιμή) στην μάζα του Z
- $m_{34}$  Μάζα του δευτέρου ζευγαριού λεπτονίων πιο κοντά (σε τιμή) στην μάζα του Z
- Η μεγαλύτερη παράμετρος κρούσης (βλ. Παράρτημα A) για ένα από τα μύονια ( $d_{0\mu}$ ) ή ένα από τα ηλεκτρόνια ( $d_{0e}$ ) του γεγονότος
- Το μεγαλύτερο (ή χειρότερο) κριτήριο απομόνωσης (βλ. Παράρτημα B) ενός από τα λεπτόνια συγκριτικά με τις τροχιές άλλων φορτισμένων σωματιδίων σε ένα κοντινό κώνο.
- Το μεγαλύτερο (ή χειρότερο) κριτήριο απομόνωσης (βλ. Παράρτημα B) ενός από τα λεπτόνια συγκριτικά με την κοντινή εναπόθεση ενέργειας στα καλορίμετρα
- Επιλογή ελάχιστης (η μέγιστης) αναλλοίωτης μάζας των τεσσάρων λεπτονίων

Για ευκολία στην εκτέλεση της άσκησης έχουν προεπιλεγεί κάποια “default cuts”. Αυτά είναι ίσα με τις τιμές που βλέπετε στο σχ.9 μόλις πρωτοανοίξετε το παράθυρο «Μαζική επεξεργασία γεγονότων».

A) Για δύο λεπτόνια

- Οι ορμές λεπτονίων  $P_{T1,2} > 6$  GeV και 6 GeV αντίστοιχα
- $d_0$ /σφάλμα μέτρησης  $< 15$
- Κριτήριο απομόνωσης (isolation)/  $P_{T\text{λεπτονίου}}$  στις τροχιές  $< 2$
- Κριτήριο απομόνωσης στα καλορίμετρα (calo isolation)/  $P_{T\text{λεπτονίου}} < 2$
- Ελάχιστη αναλλοίωτη μάζα των δύο λεπτονίων  $> 10$  GeV
- Μέγιστη αναλλοίωτη μάζα των δύο λεπτονίων  $< 150$  GeV

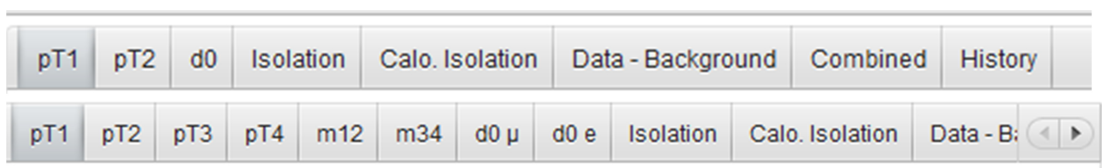
B) Για τέσσερα λεπτόνια

- Οι ορμές των τεσσάρων λεπτονίων  $P_{T1,2,3,4} > 20, 15, 6, 6$  GeV αντίστοιχα
- $m_{12} > 50$  GeV
- $m_{34} > 2$  GeV



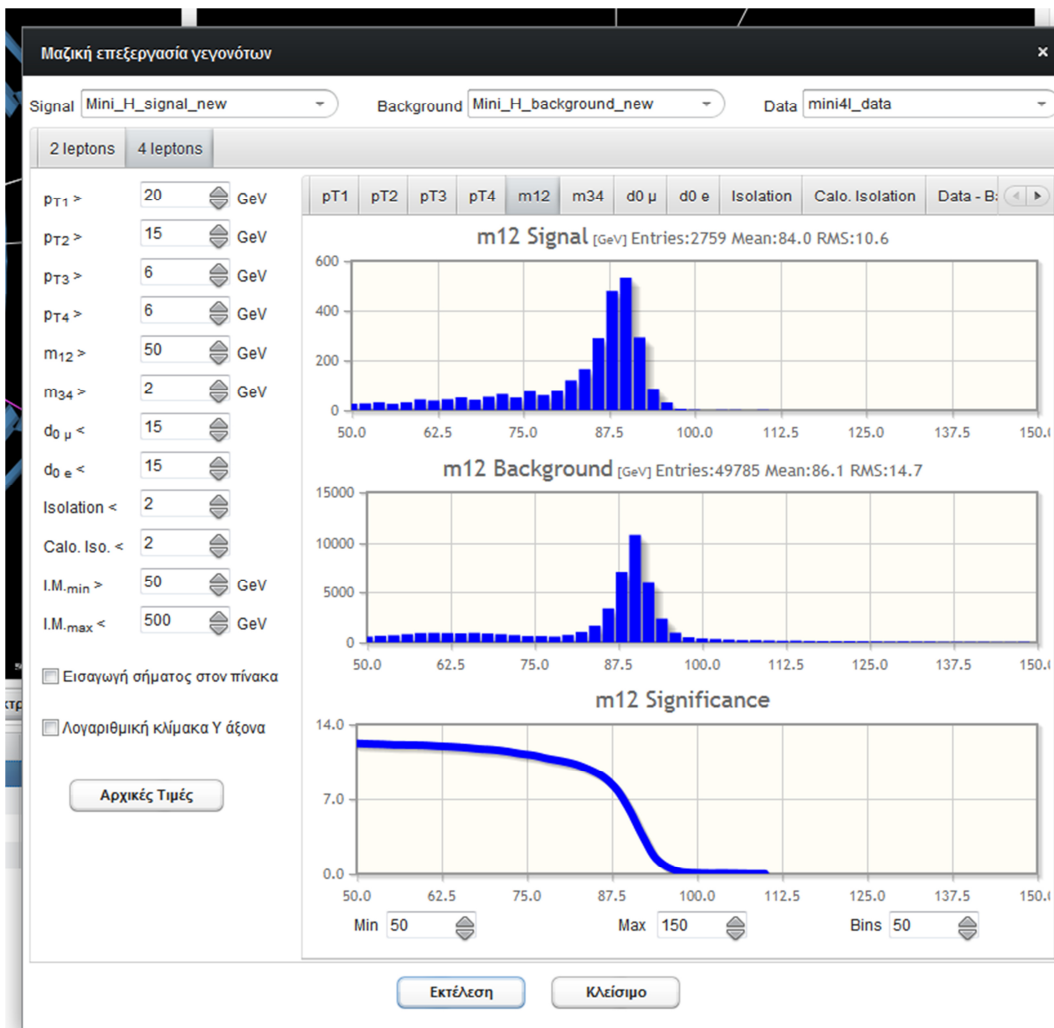
- $d_{0\mu}/\sigma_{\text{φάλμα μέτρησης}} < 15$
- $d_{0e}/\sigma_{\text{φάλμα μέτρησης}} < 15$
- Κριτήριο απομόνωσης (isolation) /  $P_{\text{Tλεπτονίου}} < 2$
- Κριτήριο απομόνωσης (isolation) στα καλορίμετρα /  $P_{\text{Tλεπτονίου}} < 2$
- Ελάχιστη αναλλοίωτη μάζα των τεσσάρων λεπτονίων  $> 50 \text{ GeV}$
- Μέγιστη αναλλοίωτη μάζα των τεσσάρων λεπτονίων  $< 500 \text{ GeV}$

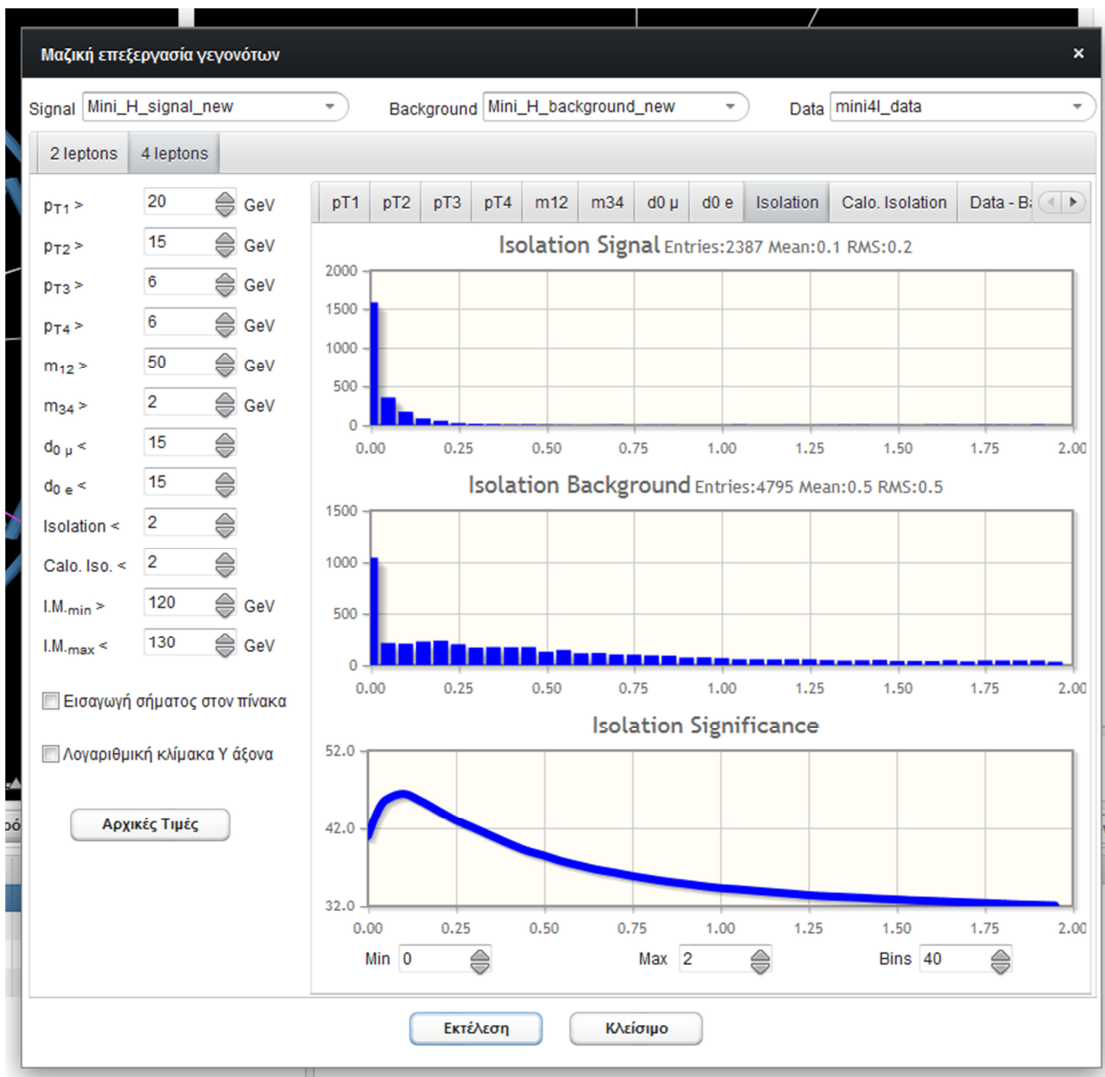
Για να βελτιστοποιήσετε τα cuts στις τιμές των ανωτέρω κατανομών θα χρησιμοποιήσετε μία μέθοδο παρόμοια με αυτή την οποία χρησιμοποίησαν και οι ερευνητές (μια από αυτές) για να οδηγηθούν στην ανακάλυψη του Higgs. Θα εξετάσετε την κατανομή της αντίστοιχης μεταβλητής επιλέγοντας την από την πάνω σειρά (σχ. 10) του παραθύρου «μαζική επεξεργασία γεγονότων»:



Σχ.10 Tabs επιλογής ιστογραμμάτων a) δύο λεπτονίων και b) Τεσσάρων λεπτονίων

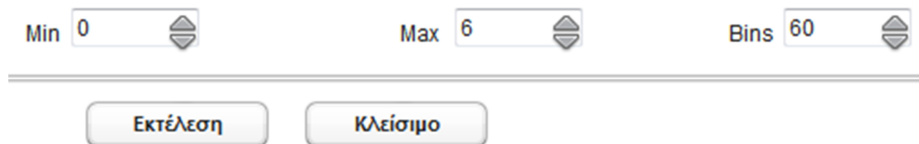
Όταν κάνετε κλικ σε οποιαδήποτε από αυτά τα tabs και μετά πατήστε το κουμπί «Εκτέλεση» θα εμφανιστούν τρία ιστογράμματα στο παράθυρο (σχ. 11). Το πρώτο είναι το ιστόγραμμα της μεταβλητής για το «σήμα», το δεύτερο το αντίστοιχο ιστόγραμμα για το «υπόβαθρο» και το τρίτο η καμπύλη που δείχνει την σημαντικότητα (βλ. Παράρτημα Γ) (significance) δηλαδή πόσο καλά ξεχωρίζουμε το σήμα από το υπόβαθρο, το οποίο θα σας βοηθήσει να ορίσετε την τιμή του cut.





Σχ.11 Παράθυρο σχεδίασης των ιστογραμμάτων ενός από τα cuts

Τα όρια των ιστογραμμάτων καθώς και τον αριθμό των ιστών (bins) μπορείτε να τα μεταβάλετε από τα edit boxes στο κάτω μέρος του παραθύρου (σχ. 11) και να ξανασχεδιάσετε τα ιστογράμματα πατώντας πάλι «Εκτέλεση». Όταν αλλάξετε κάποιο από τα cuts, πρέπει να ξαναπατήσετε «Εκτέλεση» για να δείτε τα νέα ιστογράμματα.



Σχ.11 Παράθυρο επιλογής των ορίων των ιστογραμμάτων

Ακόμη μπορείτε να διαλέξετε λογαριθμική παρουσίαση του y-άξονα των ιστογραμμάτων κάνοντας «τικ» στο κουτάκι που βρίσκεται κάτω από τα «cuts»

Λογαριθμική κλίμακα Y άξονα

## Βελτιστοποίηση των κριτηρίων επιλογής

Η ανάλυση σας θα γίνει ως εξής:

- Ελέγξτε ότι οι τιμές των μεταβλητών των κριτηρίων επιλογής (cuts) έχουν τις «default» τιμές και διαλέξτε μια από αυτές τις μεταβλητές για να βελτιστοποιήσετε την επιλογή. Σχεδιάστε τα αντίστοιχα ιστογράμματα του σχ. 11 για την μεταβλητή που μελετάτε.
- Σημειώστε επίσης ότι όσο πιο διαφορετικές μεταξύ τους είναι οι κατανομές (τα ιστογράμματα) του σήματος και του υπόβαθρου, τόσο πιο εύκολα μπορείτε να βρείτε μια τιμή της μεταβλητής και να ορίσετε το cut (είτε  $>$ , είτε  $<$ ) ώστε να «κόψετε/πετάξετε» όσο το δυνατόν περισσότερο υπόβαθρο και λιγότερο σήμα.
- Διαλέξτε την τιμή του cut η οποία μεγιστοποιεί την «σημαντικότητα» χωρίς όμως να κόβει μεγάλο ποσοστό του σήματος (η επιλογή αυτή είναι και θέμα εμπειρίας).
- Ελέγξτε πόσο αποτελεσματική ήταν η επιλογή σας σχεδιάζοντας την κατανομή «data-background». Εκεί πρέπει να έχετε όσο το δυνατόν περισσότερα γεγονότα σήματος και λιγότερα υποβάθρου (σε σύγκριση με όσα είχατε πριν εφαρμόσετε το νέο cut).
- Αφού διαλέξετε την τιμή του συγκεκριμένου cut την θέτετε στην αντίστοιχη θέση του σχ. 11 και προχωράτε να εξετάσετε την επόμενη μεταβλητή. Αφού βελτιστοποιήσετε όλες τις δυνατές μεταβλητές (αυτές του σχ.11) σχεδιάζετε την κατανομή «data-background» και την συγκρίνετε με την αρχική (με τις default τιμές των cuts).
- Αν είσαστε ικανοποιημένοι σταματάτε. Αν όχι κάνετε άλλη μια φορά την διαδικασία (iteration) ξεκινώντας από τις τιμές των cuts που μόλις έχετε καθορίσει.
- Ελέγξτε την πορεία των επιλογών εξετάζοντας το «history» tab, το οποίο υπολογίζει αυτόματα την σημαντικότητα σε κάθε βήμα.

## Υποδείξεις για την καλύτερη εκτέλεση της άσκησης:

Για δική σας ευκολία και για μικρότερη διάρκεια της άσκησης **δεν θα βελτιστοποιήσετε όλα τα cuts στο δεύτερο μέρος αλλά μόνο τα  $P_{T3,4}$ ,  $m_{34}$ ,  $d_{0\mu}$  και isolation** με την εξής σειρά:

- Ξεκινήστε από τα αρχικά cuts (δηλαδή με τα default cuts) στην περιοχή μαζών  $50 < m_{41} < 150 \text{ GeV}$  και διαλέξτε μια κατάλληλη τιμή του  $P_{T3}$ .
- Κρατώντας αυτή την τιμή του  $P_{T3}$ , διαλέξτε μία τιμή για το  $P_{T4}$
- Κρατώντας αυτές τις τιμές των  $P_{T3}$  και  $P_{T4}$  διαλέξτε μία τιμή για το  $m_{34}$
- Κρατώντας αυτές τις τιμές των  $P_{T3}$ ,  $P_{T4}$  και  $m_{34}$  διαλέξτε μία τιμή για το  $d_{0\mu}$
- Κρατώντας αυτές τις τιμές των  $P_{T3}$ ,  $P_{T4}$ ,  $m_{34}$  και  $d_{0\mu}$  διαλέξτε μία τιμή για το **isolation**

Μετά τα βήματα αυτά εκτιμήστε την αποτελεσματικότητα των cuts που επιλέξατε ελέγχοντας την τιμή της σημαντικότητας που δίνει το «history» για την περιοχή μαζών πολύ κοντά στην μάζα του Higgs δηλαδή  $120 < m_{41} < 130 \text{ GeV}$ . Είναι καλύτερα τα αποτελέσματα σας από ότι στο βήμα 1;

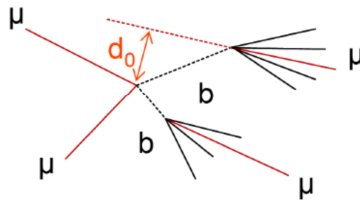
- Κρατήστε τις νέες τιμές ΟΛΩΝ των cuts και βελτιστοποιήστε πάλι κατά τα σειρά τα  $P_{T3}$ ,  $P_{T4}$ ,  $m_{34}$ ,  $d_{0\mu}$  και **isolation**. Δηλαδή ακολουθήστε πάλι τα βήματα 2-7 αλλά ξεκινώντας από διαφορετικές αρχικές τιμές των cuts.

## Ερωτήσεις

1. Αν σχεδιάσετε τα πραγματικά δεδομένα ( $ll\_data$ ) ξεκινώντας από πολύ χαμηλές μάζες  $m_{ll} > 2 \text{ GeV}$  τι παρατηρείτε σε αυτές τις χαμηλές μάζες (δεν μπορείτε να κάνετε το ίδιο με τα προσομοιωμένα δεδομένα ( $ll\_signal$ ) γιατί η δημιουργία τους ξεκινάει από μεγαλύτερες μάζες.
2. Στο ιστόγραμμα «combined» της μάζας των δύο λεπτονίων μετά τα καλύτερα cuts που βρήκατε, να συγκρίνετε τα data και το Monte Carlo σε περιοχή μαζών κοντά στο Z. Τι παρατηρείτε;
3. Ένα είδος υποβάθρου στα δύο λεπτόνια είναι αυτό από παραγωγή ζεύγους  $t\bar{t}$  κουάρκ. Ερευνήστε στην βιβλιογραφία πως μπορούν να παραχθούν τα δύο λεπτόνια σε αυτήν την περίπτωση. Τι ιδιότητες θα έχουν αυτά;
4. Σχεδιάστε την κατανομή μαζών από το ιστόγραμμα «data-background» για την περιοχή μαζών  $80 < m_{41} < 170 \text{ GeV}$  και συγκρίνετε την με αυτή του Σχ. 2. Είναι παρόμοιες; Σχολιάστε.
5. Αν ο αριθμός των γεγονότων σήματος στην περιοχή μαζών  $120 < m_{41} < 130 \text{ GeV}$  μετά από τα βέλτιστα cuts ήταν 100 φορές μικρότερος από αυτά που έχετε εσείς και ο αριθμός του υποβάθρου 20 φορές μικρότερος, ποιά θα ήταν η σημαντικότητα της ανακάλυψης;
6. Η σημαντικότητα, έτσι όπως την ορίζουμε αντιστοιχεί αριθμητικά σε αριθμό τυπικών αποκλίσεων της κανονικής κατανομής. Πόση πρέπει να είναι η αναμενόμενη σημαντικότητα, για να αποκλείσετε με πιθανότητα 95% κάποιο σήμα, το οποίο δεν εμφανίστηκε όταν εκτελέστηκε το πείραμα;

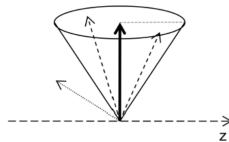
## Παράρτημα

**A:** Παράμετρος κρούσης ( $d_0$ ) είναι η κάθετη απόσταση της (δευτερεύουσας) κορυφής των λεπτονίων από το σημείο σύγκρουσης των δεσμών (πρωτεύουσα κορυφή) όπως στο σχήμα.



Αν τα κάποιο από τα λεπτόνια προέρχεται από διάσπαση b-κουάρκ (δηλαδή από υπόβαθρο jets ή t/b κουάρκ), τότε λόγω του πεπερασμένου (και όχι απειροστού) χρόνου ζωής του b-κουάρκ, η κορυφή που ορίζεται μπορεί να απέχει κάποια (πεπερασμένη) απόσταση από την πρωτεύουσα κορυφή, δηλαδή να είναι «μετατοπισμένη». Ενώ στην περίπτωση όπου όλα τα λεπτόνια προέρχονται από κατευθείαν διασπάσεις του/των Z τότε η κορυφή τους θα είναι πολύ κοντά (πρακτικά θα ταυτίζεται) με την πρωτεύουσα κορυφή. Αυτό είναι ένα cut που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για απόρριψη του υποβάθρου. Για την ακρίβεια χρησιμοποιούμε τιμές του  $d_0$  διαιρεμένου με το σφάλμα στην μέτρηση του. Στην περίπτωση της έρευνας για Higgs, επειδή η μέτρηση του  $d_0$  των ηλεκτρονίων και το μυνίων γίνεται με δυο διαφορετικούς τρόπους, στο σχ.9(b) δίνονται ξεχωριστά οι δύο τιμές.

**B:** Κριτήριο απομόνωσης είναι ένα μέτρο κατά πόσο το κάθε λεπτόνιο έχει κοντά του άλλα σωματίδια. Χρησιμοποιούμε ένα κριτήριο απομόνωσης που βασίζεται σε γειτονικές τροχιές (iso) και ένα που βασίζεται σε γειτονική εναπόθεση ενέργειας (calo iso). Παρ' όλο που και τα δύο δίνουν βασικά την ίδια πληροφορία επειδή αυτή προέρχεται από δύο διαφορετικούς ανιχνευτές (ανιχνευτής φορτισμένων τροχιών και καλορίμετρα) μπορεί να δώσει επί πλέον ικανότητα απόρριψης του υποβάθρου. Παίρνουμε ένα κώνο ανοίγματος περίπου  $30^\circ$  ( $20^\circ$ ) και αθροίζουμε τις εγκάρσιες ορμές των τροχιών (εκτός από το λεπτόνιο που εξετάζουμε) που είναι μέσα σε αυτόν τον κώνο ή τις γειτονικές ενέργειες στο καλορίμετρο -όπως στο παρακάτω σχήμα..



και τέλος διαιρούμε με την εγκάρσια ορμή του λεπτονίου που εξετάζουμε. Τα λεπτόνια από το υπόβαθρο, επειδή τουλάχιστον μπορεί να προέρχονται από διασπάσεις κουάρκ που οδηγούν σε πίδακες σωματιδίων, αναμένεται να είναι λιγότερο απομονωμένα από ότι το σήμα.

**Γ:** Σημαντικότητα (significance) είναι η τιμή του

$$significance = \sqrt{2 * \left( (S + B) * \ln \left( 1 + \frac{S}{B} \right) - S \right)}$$

Όπου S ο αριθμός γεγονότων σήματος μέχρι εκείνο το σημείο και B ο αριθμός γεγονότων του υποβάθρου μέχρι εκείνο τη σημείο. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της τόσο πιο στατιστικά σημαντική είναι η παρατήρηση.