

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



Μέτρηση της ενεργού διατομής για την
παραγωγή ενός W μποζονίου και δύο b
quarks σε συγκρούσεις
πρωτονίων στον ανιχνευτή CMS

Measurement of the production cross
section of a W boson in association with
two b quarks in proton-proton collisions at
CMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Κανελλοπούλου Πέλλα

Επιβλέπων: Κουσουρής Κωνσταντίνος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στηρίζεται στην ανάλυση δεδομένων που συλλέχθηκαν από τον ανιχνευτή του πειράματος Compact Muon Solenoid (CMS). Στόχος είναι η μέτρηση της ενεργού διατομής για την παραγωγή ενός W μποζονίου και δύο b κουαρκς από συγκρούσεις πρωτονίων ενέργειας $\sqrt{s} = 13$ TeV στο κέντρο μάζας. Επιπλέον, τα δεδομένα που αναλύθηκαν αντιστοιχούν σε luminosity 35.922 fb^{-1} .

λέξεις κλειδιά : ενεργός διατομή, $W + \text{jets}$, ανακατασκευασμένη μάζα

Abstract

This diploma thesis is based on the analysis of data collected by the Compact Muon Solenoid Detector (CMS). The aim is to measure the production cross section of a W boson in association with two b quarks from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in the center of mass.

In addition, the data analyzed correspond to luminosity 35.922 fb^{-1} .

key words : cross section, $W + \text{jets}$, transverse mass

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Κουσουρή, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής, για την ανάθεση της διπλωματικής, τη συνεχή καθοδήγηση καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Τσιπολίτη, Καθηγητή της σχολής, για την ένταξή μου στην ομάδα του καθώς και για τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια των εβδομαδιαίων συναντήσεων της ομάδας. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τράια Νικόλαο, Καθηγητή της σχολής και μέλος της τριμελούς επιτροπής.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την Ειρήνη Σιαμάρκου, μεταπτυχιακή φοιτήτρια της σχολής, η οποία με βοήθουσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου αφιερώνοντας ατελείωτες ώρες για την επίλυση αποριών μου στο ROOT. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας, τον Θοδωρή Χατζησταύρου και την Άννα Ζαχαροπούλου για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Νίκο και Εύη, για την ηθική και υλική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια καθώς και την αδερφή μου Αθανασία. Και ένα μεγάλο ευχαριστώ φυσικά σε όλους μου τους φίλους για τη συμπαράσταση και τη στήριξη.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
1 Εισαγωγή και Επισκόπηση.....	7
1.1 Πορεία για την ανακάλυψη των δομικών λίθων της ύλης..	7
1.2 Κατηγορίες των στοιχειωδών σωματιδίων.....	8
1.3 Το καθιερωμένο πρότυπο – Standard Model.....	9
2 Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής – The Large Hadron Collider – LHC.....	12
2.1 Πειράματα.....	14
2.2 Compact Muon Solenoid (CMS).....	14
2.2.1 Ο μαγνήτης (Superconducting Solenoid).....	15
2.2.2 Ο καταγραφέας τροχιών (Tracker).....	16
2.2.3 Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο (ECAL).....	16
2.2.4 Το αδρονικό καλορίμετρο (HCAL).....	17
2.2.5 Το σύστημα μιονίων.....	18
2.2.6 Το σύστημα συντεταγμένων του CMS.....	18
2.3 Ελλείπουσα εγκάρσια ορμή.....	19
2.4 Αδρονικοί πίδακες (jets).....	20
2.5 Ανακατασκευή των jets.....	21
2.6 Ωκυτότητα (Rapidity).....	21
3 Ανάλυση.....	23
3.1 Wbb διεργασία.....	24
3.2 Διεργασίες Υποβάθρου.....	25
3.3 Προσομοιώσεις Monte Carlo	25
3.4 Μεταβλητές	27
3.5 Ανακατασκευή του W μποζονίου.....	28
3.5.1 Σύστημα σκανδαλισμού (triggering system).....	28
3.5.2 Επίπεδα του συστήματος σκανδαλισμού.....	29
3.6 Υπολογισμός ενεργού διατομής	30
3.7 Μέθοδος προσαρμογής (fit)	34
3.8 Αποτελέσματα pre – fit , post – fit	37
3.9 Υπολογισμός ενεργού διατομής	38
3.10 Συσχέτιση μεταξύ του σήματος και του υποβάθρου	39
4 Σύνοψη – Συμπεράσματα.....	43
5 Παράρτημα.....	44
6 Βιβλιογραφία.....	54

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή και Επισκόπηση

Η σωματιδιακή φυσική είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μελέτη της εξέλιξης του σύμπαντος. Πιστεύουμε ότι η αρχή του σύμπαντος οφείλεται σε μια «μεγάλη έκρηξη»-διαστολή μιας ενεργειακής φουσαλίδας, κατά την οποία δημιουργήθηκαν όλοι οι τύποι των σωματιδίων – κουαρκ, λεπτόνια και κβάντα. Υπόλειμμα της μεγάλης έκρηξης είναι το σημερινό διαστελλόμενο σύμπαν, του οποίου η θερμοκρασία ελαττώνεται. Η έρευνά μας λοιπόν προς υψηλότερες ενέργειες είναι μία αντιστροφή στο χρόνο, προς τις πολύ αρχικές φάσεις της δημιουργίας που καθόρισαν τα χαρακτηριστικά του σύμπαντος που παρατηρούμε σήμερα.

Η Φυσική Υψηλών Ενέργειών ασχολείται κυρίως με τη μελέτη των θεμελιακών συστατικών της ύλης καθώς και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Το μοντέλο το οποίο περιγράφει τα στοιχειώδη σωματίδια καθώς και τις δυνάμεις με τις οποίες αυτά αλληλοεπιδρούν ονομάζεται καθιερωμένο πρότυπο (Standard Model, SM). Εν συνέχεια θα γίνει μία πιο λεπτομερής περιγραφή του καθιερωμένου προτύπου.

1.1 Πορεία για την ανακάλυψη των δομικών λίθων της ύλης

Από τα διάφορα σωματίδια που έχουν παρατηρηθεί μέχρι σήμερα, μόνο μερικά έχουν βρεθεί ελεύθερα στη φύση. Τα περισσότερα από τα ελεύθερα αυτά σωματίδια παράχθηκαν και παρατηρήθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία. Η κοσμική ακτινοβολία ήταν η πιο σπουδαία πηγή για τη μελέτη των διαφόρων σωματιδίων. Σήμερα, η ύπαρξη μεγάλων επιταχυντών μας δίνει τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε μέσω των πειραμάτων σκέδασης μία πληθώρα από νέα σωματίδια, τα περισσότερα από τα οποία είναι πολύ ασταθή για να υπάρξουν ελεύθερα στη φύση. Τα νέα αυτά σωματίδια παρατηρούνται στα προϊόντα μιας αντίδρασης σωματιδίων.

Σε ένα πείραμα σκέδασης έχουμε επιτάχυνση του ενός ή και των δύο αρχικών σωματιδίων τα οποία στη συνέχεια θα συγκρουστούν. Μετά τη σύγκρουση, τα προϊόντα της σκέδασης, η γωνία σκέδασης, η ενεργός διατομή και μερικά άλλα στοιχεία είναι ποσότητες που

ανιχνεύονται και μετρούνται, και από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες.

1.2 Κατηγορίες των στοιχειωδών σωματιδίων

Ένας πρώτος χωρισμός των σωματιδίων, ανάλογα με το σπιν τους, είναι σε **φερμιόνια** και **μποζόνια**. Τα πρώτα έχουν σπιν ημιακέραιο, ενώ τα δεύτερα έχουν σπιν ακέραιο. Σε ένα δεύτερο χωρισμό τα σωματίδια ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης στην οποία μετέχουν χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται εκείνα τα σωματίδια που μπορούν, εκτός των άλλων αλληλεπιδράσεων, να μετέχουν και σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα σωματίδια που δεν μετέχουν καθόλου σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις αλλά μόνο σε άλλου είδους αλληλεπιδράσεις. Τα σωματίδια της πρώτης κατηγορίας ονομάζονται **αδρόνια**, ενώ τα σωματίδια της δεύτερης κατηγορίας **λεπτόνια**.

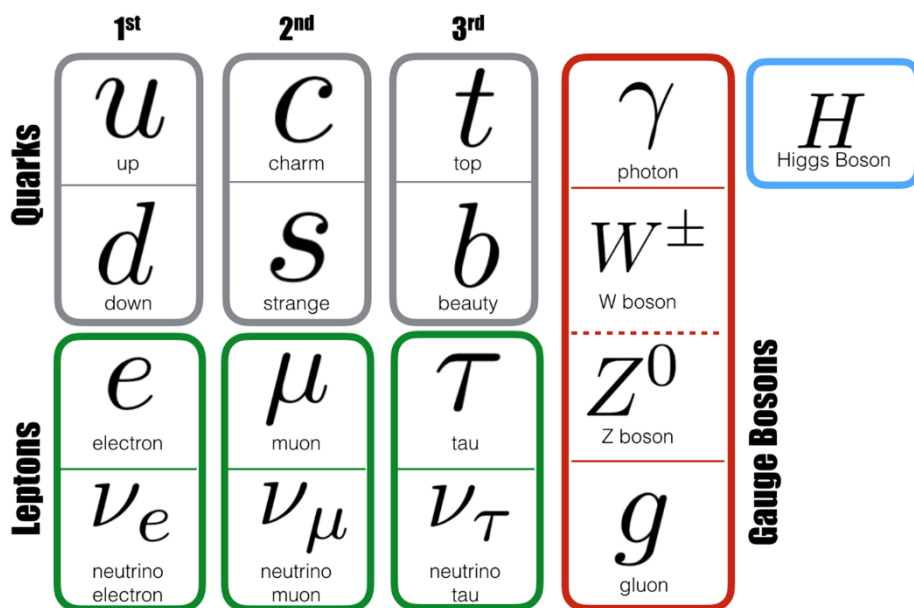
Τα αδρόνια χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες. Τα **βαρυόνια**, που είναι φερμιόνια και είναι τα πιο βαριά αδρόνια, και τα **μεσόνια** που είναι μποζόνια. Το βαρυόνιο είναι ένα σύνθετο υποατομικό σωματίδιο που αποτελείται από τρία κουάρκ (σε αντιδιαστολή με τα μεσόνια, που αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ).

Πίνακας 1.1 : Οι οικογένειες των quark

Quarks		
1^η γενιά	up (u)	down (d)
2^η γενιά	charm (c)	strange (s)
3^η γενιά	top (t)	bottom (b)

Πίνακας 1.2 : Οι γενιές των λεπτονίων

Leptons		
1^η γενιά	electron (e)	electron neutrino (ν_e)
2^η γενιά	muon (μ)	muon neutrino (ν_μ)
3^η γενιά	tau (τ)	tau neutrino (ν_τ)



Σχήμα 1.1 Το καθιερωμένο πρότυπο των στοιχειωδών σωματιδίων

1.3 Το καθιερωμένο πρότυπο – Standard Model

Η σωματιδιακή φυσική ασχολείται με τη μελέτη των θεμελιωδών συστατικών της ύλης καθώς και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η σύγχρονη θεωρία που ονομάζεται Καθιερωμένο Πρότυπο, επιχειρεί να εξηγήσει όλα τα φαινόμενα της σωματιδιακής φυσικής αναφορικά με τις ιδιότητες και τις αλληλεπιδράσεις ενός μικρού αριθμού σωματιδίων τεσσάρων διαφορετικών τύπων: δύο οικογένειες φερμιονίων (ημιακέραιο σπιν) που ονομάζονται quarks και λεπτόνια, μία οικογένεια μποζονίων με ακέραιο σπιν που δρουν ως φορείς των αλληλεπιδράσεων και ονομάζονται gauge bosons, ένα σωματίδιο με μηδενικό σπιν που ονομάζεται μποζόνιο Higgs και το οποίο εξηγεί την προέλευση της μάζας των υπόλοιπων σωματιδίων καθώς χωρίς την ύπαρξη αυτού, τα λεπτόνια, τα quarks και τα υπόλοιπα μποζόνια θα ήταν άμαζα.

Όλα τα σωματίδια του καθιερωμένου προτύπου θεωρούνται ως στοιχειώδη: δηλαδή αντιμετωπίζονται ως σημειακά σωματίδια, χωρίς εσωτερική δομή ή διεγερμένες καταστάσεις. Το πιο γνωστό παράδειγμα ενός λεπτονίου είναι το ηλεκτρόνιο e^- το οποίο είναι δέσμιο των ατόμων χάριν στην **ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση** η οποία είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης. Ένα δεύτερο επίσης γνωστό λεπτόνιο είναι το νεutrino ηλεκτρονίου ν_e το οποίο είναι ένα ελαφρύ ουδέτερο σωματίδιο και παρατηρείται

στα προϊόντα της β διάσπασης. Η δύναμη η οποία είναι υπεύθυνη για τη β διάσπαση ενός πυρήνα ονομάζεται **ασθενής αλληλεπίδραση**.

Μία άλλη κατηγορία σωματιδίων τα αδρόνια, παρατηρούνται επίσης ελεύθερα στη φύση. Τα πιο γνωστά σωματίδια της οικογένειας των αδρονίων είναι το πρωτόνιο και το νετρόνιο (μαζί ονομάζονται νουκλεόνια) καθώς και τα τρία πιόνια (π^+ , π^- , π^0). Τα σωματίδια αυτά δεν είναι στοιχειώδη σωματίδια άλλα αποτελούνται από δεσμευμένα quarks μέσω μιας τρίτης δύναμης της φύσης, της **ισχυρής αλληλεπίδρασης**. Η θεωρία αυτή είναι ασυνήθιστη λόγω του ότι τα quarks από μόνα τους δεν είναι άμεσα παρατηρήσιμα αλλά μόνο οι δέσμεις καταστάσεις τους.

Εκτός από τις ισχυρές, ασθενείς και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις υπάρχει μία τέταρτη δύναμη της φύσης, η **βαρυτική**. Η αλληλεπίδραση λόγω βαρύτητας των στοιχειωδών σωματιδίων είναι τόσο μικρή συγκριτικά με τις υπόλοιπες τρεις κι έτσι μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Το καθιερωμένο πρότυπο επιπλέον καθορίζει την προέλευση των τριών αυτών δυνάμεων. Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση αυτή διαδίδεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία διαρκώς εκπέμπονται και απορροφώνται. Αν και αυτή είναι μία επαρκής περιγραφή για μεγάλες αποστάσεις, στις μικρές αποστάσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η κβαντική φύση της αλληλεπίδρασης. Στην κβαντική θεωρία η αλληλεπίδραση μεταδίδεται ασυνεχώς μέσω της ανταλλαγής φωτονίων που είναι οι φορείς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης ή αλλιώς gauge bosons. Και όπως γνωρίζουμε, η μεγάλη εμβέλεια της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτόνια έχουν μηδενική μάζα.

Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις σχετίζονται με την ανταλλαγή μποζονίων. Για την ασθενή αλληλεπίδραση φορείς είναι τα W^\pm καθώς και το ουδέτερο Z^0 μποζόνια, με μάζες περίπου 80-90 φορές τη μάζα του πρωτονίου. Τα W^+ , W^- είναι το ένα αντισωματίδιο του άλλου ενώ το Z^0 είναι το αντισωματίδιο του εαυτού του. Στα πλαίσια του Καθιερωμένου Προτύπου, η ασθενής και η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση ενοποιούνται σε μία θεωρία που είναι γνωστή ως ηλεκτροασθενής δύναμη.

Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις σχετίζονται με την ανταλλαγή γκλουονίων. Η αλληλεπίδραση η οποία ευθύνεται για τον σχηματισμό των πρωτονίων και των νετρονίων, συγκρατώντας τα κουάρκς, είναι η Κβαντική Χρωμοδυναμική (QCD). Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι η έκφανση της QCD στο επίπεδο των πρωτονίων και νετρονίων.

Στα πλαίσια της κβαντικής θεωρίας πεδίου, κάθε αλληλεπίδραση ισοδυναμεί με ανταλλαγή σωματιδίου-φορέα ο οποίος ακριβώς διαδίδει την αλληλεπίδραση. Τα σωματίδια-φορείς, τα υπεύθυνα για την QCD, είναι τα γκλουόνια (gluons). Το μαθηματικό υπόβαθρο της QCD προβλέπει ότι: Κάθε είδος (άνω-u, κάτω-d, παράξενο-s κλπ.) κουάρκ παρουσιάζεται σε 3 διαφορετικές μορφές ("χρώματα"): κόκκινο, πράσινο, μπλε. Τα αντικουάρκ έχουν το αντίθετο χρώμα: γαλάζιο (αντί-κόκκινο), μωβ (αντί-πράσινο) και κίτρινο (αντί-μπλέ). Φυσικά τα ονόματα αυτά δεν έχουν καμιά σχέση με πραγματικά χρώματα. Απλά, η επίκληση των ονομάτων αυτών βοηθά στην κατανόηση της λειτουργίας της μαθηματικής ομάδας SU(3), η οποία περιγράφει την QCD. Χρειάζονται 8 ειδών γκλουόνια για τη σωστή περιγραφή της QCD. Τα έξι από αυτά φτιάχνονται από ένα χρώμα και ένα αντί-χρώμα (όχι όμως του αντίστοιχου χρώματος). Τα άλλα δύο φτιάχνονται με κατάλληλους συνδυασμούς όλων των χρωμάτων και αντί-χρωμάτων, τους οποίους ορίζει επακριβώς το μαθηματικό υπόβαθρο. Η ανταλλαγή των γκλουονίων αλλάζει το "χρώμα" των κουάρκ, αλλά όχι το είδος τους (άνω-u, κάτω-d, παράξενο-s κλπ.). Σε κάθε αδρόνιο, δηλαδή σωματίδιο το οποίο αποτελείται από κουάρκ και παρατηρείται ελεύθερο στη φύση (για παράδειγμα πρωτόνιο, νετρόνιο, σωματίδιο π, σωματίδιο Λ κλπ.), ο συνδυασμός των "χρωμάτων" των κουάρκ είναι τέτοιος ώστε το αδρόνιο να εμφανίζεται "άχρωμο". Τον κατάλληλο συνδυασμό των "χρωμάτων" υποδεικνύει και πάλι το μαθηματικό υπόβαθρο της QCD. Ελεύθερα κουάρκ δεν παρατηρούνται. Αν σ' ένα ζευγάρι κουάρκ που σχηματίζει ένα αδρόνιο (για παράδειγμα το σωματίδιο π που συγκροτείται από ζευγάρια χρώμα - αντιχρώμα) προσπαθήσουμε να απομακρύνουμε το ένα κουάρκ από το άλλο, η ενέργεια που απαιτείται είναι τόσο μεγάλη ώστε η αρχική αλυσίδα των γκλουονίων (η οποία τα συγκρατεί) σπάει, γεννώντας δυο νέα κουάρκ τα οποία ξανασχηματίζουν αδρόνια.

Κεφάλαιο 2 Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής – The Large Hadron Collider LHC

Ο LHC είναι ο μεγαλύτερος και ισχυρότερος επιταχυντής σωματιδίων που έχει ποτέ κατασκευαστεί. Βρίσκεται εγκατεστημένος στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN). Χρησιμοποιεί συγκρουόμενες δέσμες σωματιδίων (αρχικά πρωτονίων και στη συνέχεια πυρήνων μολύβδου και άλλων βαρέων ιόντων). Η ενέργεια της σύγκρουσης των δεσμών είναι η μεγαλύτερη που έχει ποτέ επιτευχθεί στο εργαστήριο και μας βοηθά να πλησιάσουμε τις συνθήκες λίγες στιγμές μετά την μεγάλη έκρηξη. Μέσα από αυτό το πείραμα θα μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα του « Καθιερωμένου Προτύπου » της σωματιδιακής φυσικής, ή ενδεχομένως την ανάγκη επέκτασης αυτού και πιθανώς και άλλων εναλλακτικών θεωριών της σωματιδιακής φυσικής και κοσμολογίας. Ο LHC ξεκίνησε τη λειτουργία του στις 10 Σεπτεμβρίου 2008.

Ο επιταχυντής βρίσκεται εγκατεστημένος σε ένα τούνελ περιφέρειας 27 km σε βάθος μεταξύ 45 και 175 m και διασχίζει τα σύνορα Γαλλίας-Ελβετίας. Στεγάζεται στο, πλάτους 4 m τούνελ που σκάφτηκε μεταξύ 1983 και 1988 για τον προγενέστερο επιταχυντή LEP.

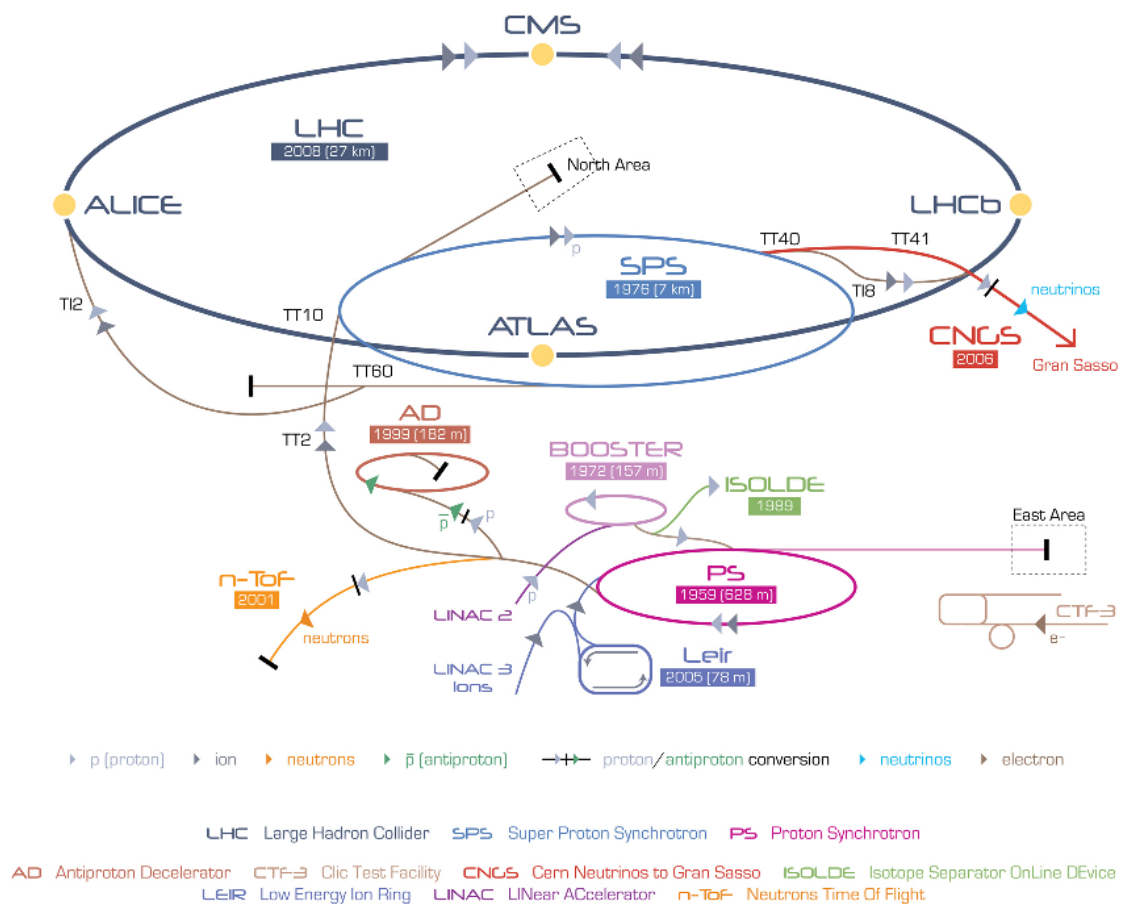
Μέσα στο τούνελ βρίσκονται δύο παράλληλοι σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορούν δέσμες σωματιδίων που κινούνται με αντίθετη φορά. Οι σωλήνες συναντώνται σε 4 σημεία γύρω από τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα τα πειράματα του LHC. Για την καθοδήγηση της δέσμης στην κυκλική της τροχιά χρησιμοποιούνται 1232 υπεραγώγιμοι μαγνήτες, ενώ 392 τετραπολικοί μαγνήτες είναι υπεύθυνοι για την εστίαση της δέσμης έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης των δύο δεσμών. Για την ψύξη των υπεραγώγιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται 96 τόνοι υγρού Ηλίου οι οποίοι διατηρούνται σε θερμοκρασία 1.9°K. Το μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιείται έχει ένταση 8.3 Tesla κατά την πλήρη λειτουργία του επιταχυντή σε ενέργεια δέσμης 14 TeV.

Τα πρωτόνια προέρχονται από μία φιάλη με αέριο υδρογόνου το οποίο εισέρχεται σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο όπου και αφαιρούνται τα ηλεκτρόνια από τους πυρήνες με αποτέλεσμα να απομονώνονται τα πρωτόνια. Πριν εισαχθούν στον LHC τα πρωτόνια επιταχύνονται από μία σειρά άλλων διατάξεων έτσι ώστε να αποκτήσουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Αρχικά εισάγονται στον Linac 2 (Linear particle accelerator) ο οποίος τα επιταχύνει σε

ενέργεια 50 MeV και στη συνέχεια εισάγονται στον PSB (Proton Synchrotron Booster) ο οποίος τα επιταχύνει στα 1.4 GeV. Σειρά έχουν το PS (Proton Synchrotron) που τα επιταχύνει έως τα 26 GeV και τέλος το SPS (Super Proton Synchrotron) το οποίο τελικά τα εισάγει στον LHC με ενέργεια 450 GeV. Η επιτάχυνσή τους μέχρι τα 14 TeV ανά πρωτόνιο διαρκεί περίπου 20 λεπτά. Σε αυτές τις ταχύτητες τα πρωτόνια έχουν 99.9999991% της ταχύτητας του φωτός.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η πορεία που ακολουθούν τα πρωτόνια καθώς περνούν μέσα από ένα σύμπλεγμα επιταχυντών μέχρι να αποκτήσουν την επιθυμητή ενέργεια ώστε να εισέλθουν στον LHC. Τα πρωτόνια αρχικά εισέρχονται στο Linac2, στη συνέχεια στο Proton Synchrotron όπου σχηματίζονται δέσμες και μετά στο Super Proton Synchrotron από όπου εγχέονται στον δακτύλιο LHC.

Σχήμα 1.2



Σχήμα 2.1 Σχεδιάγραμμα του μεγάλου αδρονικού επιταχυντή LHC καθώς και των τεσσάρων σημείων σύγκρουσης

2.1 Πειράματα

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας ερευνητικών στόχων του LHC, 6 ανιχνευτές διαφορετικών τύπων έχουν τοποθετηθεί σε 4 υπόγειες κοιλότητες γύρω από τα 4 σημεία τομής των δεσμών. Οι δύο από αυτούς (ATLAS και CMS) είναι μεγάλοι ανιχνευτές γενικού σκοπού, άλλοι δύο (ALICE και LHCb) έχουν συγκεκριμένους ρόλους, ενώ οι TOTEM και LHCf είναι πολύ μικρότεροι και έχουν πολύ συγκεκριμένο σκοπό.

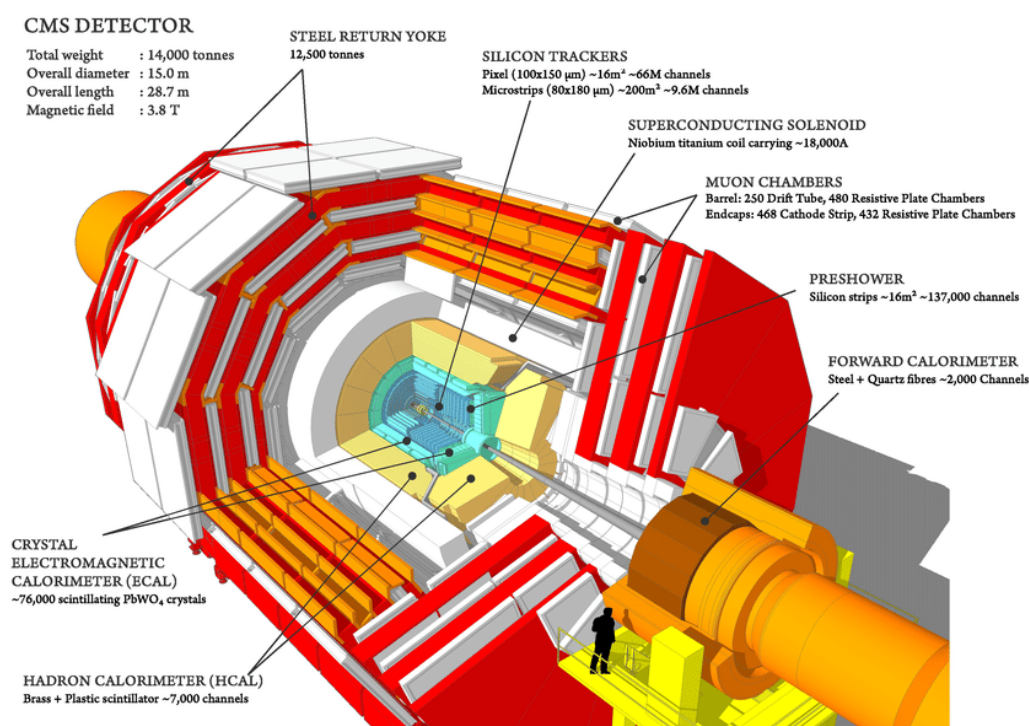
2.2 Compact Muon Solenoid (CMS)

Ο ανιχνευτής CMS σχεδιάστηκε με στόχο τη μελέτη των προϊόντων σύγκρουσης πρωτονίων-πρωτονίων και ως εκ τούτου δύναται να ανιχνεύει φωτόνια, ηλεκτρόνια, αδρόνια, και μόνια μετρώντας με ακρίβεια την ενέργειά τους. Παράλληλα καταγράφει έμμεσα τα παράγωγα που δεν αλληλοεπιδρούν με τα υλικά του ανιχνευτή, μετρώντας το έλλειμμα στην εγκάρσια συνιστώσα της ορμής ή αλλιώς μετρώντας την ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια. Χαρακτηρίζεται από την ακριβή μέτρηση στην ορμή των μιονίων, την υψηλή διακριτική ικανότητα του ηλεκτρομαγνητικού καλοριμέτρου και τον ισχυρό ανιχνευτή τροχιών.

Το CMS λειτουργεί ως μια γιγαντιαία, υψηλής ταχύτητας κάμερα, λαμβάνοντας 3D «φωτογραφίες» συγκρούσεων σωματιδίων από όλες τις κατευθύνσεις μέχρι και 40 εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο. Αν και τα περισσότερα από τα σωματίδια που παράγονται της συγκρούσεις είναι «ασταθή», μετασχηματίζονται γρήγορα σε σταθερά σωματίδια που μπορούν να ανιχνευθούν από τον CMS. Με τον εντοπισμό (σχεδόν) όλων των σταθερών σωματιδίων που παράγονται σε κάθε σύγκρουση, τη μέτρηση της ορμής και της ενέργειάς τους και στη συνέχεια τη συναρμολόγηση των πληροφοριών όλων αυτών των σωματιδίων, ο ανιχνευτής μπορεί να ανακατασκευάσει μια «εικόνα» της σύγκρουσης για περαιτέρω ανάλυση.

Οι διαστάσεις του ανιχνευτή CMS είναι 21.6 m μήκος, 14.6 m διάμετρος και 12500 t το βάρος, σχεδόν το διπλάσιο από τον πύργο του Eiffel! Ο ανιχνευτής CMS έχει σχήμα κυλινδρικού κρεμμυδιού, με πολλά ομόκεντρα και ομοαξονικά επίπεδα. Αυτά τα επίπεδα βοηθούν στην προετοιμασία "φωτογραφιών" κάθε συμβάντος

σύγκρουσης, προσδιορίζοντας τις ιδιότητες των σωματιδίων που παράγονται σε αυτή τη συγκεκριμένη σύγκρουση. Κάθε επίπεδο έχει διαφορετικό ρόλο και αποτελεί έναν υποανιχνευτή ο οποίος ειδικεύεται στην αναγνώριση συγκεκριμένων σωματιδίων. Τα τέσσερα βασικά υποανιχνευτικά συστήματα του ανιχνευτή CMS είναι: ο καταγραφέας τροχιών (Tracker) (που αποτελείται από τον ανιχνευτή Silicon Pixel και τον ανιχνευτή Silicon Microstrip), το Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο (ECAL), το Αδρονικό Καλορίμετρο (HCAL), και τέλος, το Σύστημα Μιονίων.



Σχήμα 2.2 Εγγύρσια τομή του ανιχνευτή CMS

2.2.1 Ο Μαγνήτης (Superconducting Solenoid)

Πολύ σημαντικό τμήμα του ανιχνευτή αποτελεί ο σωληνοειδής μαγνήτης εσωτερικής διαμέτρου 6 m, ο ρόλος του οποίου είναι να κάμπει τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων που απομακρύνονται από το σημείο σύγκρουσης. Η κάμψη αυτή των τροχιών βοηθάει τόσο στην ανίχνευση του φορτίου του σωματιδίου όσο και στη μέτρηση της ορμής του.

Ο σωληνοειδής μαγνήτης σχηματίζεται από ένα κυλινδρικό πηνίο υπεραγώγιμων ινών. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα (18500 A!) κυκλοφορεί μέσα στο πηνίο δε συναντά καμία αντίσταση και δύναται να παράξει ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως περίπου 4 Tesla το οποίο είναι 100.000 φορές μεγαλύτερο από το μαγνητικό πεδίο της Γης.

2.2.2 Ο καταγραφέας τροχιών (Tracker)

Η ορμή των σωματιδίων είναι σημαντική καθώς μας βοηθά να κατασιευάσουμε μία εικόνα από γεγονότα τη χρονική στιγμή της σύγκρουσης. Μία μέθοδος υπολογισμού της ορμής ενός σωματιδίου είναι η καταγραφή της τροχιάς του μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Όσο πιο κυρτή είναι η τροχιά του τόσο μικρότερη ήταν η ορμή που είχε το σωματίδιο. Ο καταγραφέας τροχιών (Tracker) καταγράφει τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων βρίσκοντας τη θέση τους σε ορισμένα προκαθορισμένα σημεία (key points).

Ο καταγραφέας τροχιών (Tracker) μπορεί να ανακατασκευάσει τις τροχιές των υψηλών ενεργειακά μιονίων, ηλεκτρονίων και αδρονίων καθώς και να καταγράψει τις τροχιές που προέρχονται από τη διάσπαση πολύ βραχύβιων σωματιδίων όπως τα b κουαρκς.

Ο τελικός σχεδιασμός αποτελείται από έναν καταγραφέα κατασιευασμένο εξολοκλήρου από πυρίτιο ο οποίος αποτελείται τους ανιχνευτές Silicon Pixels και τους Silicon Microstrips που τους περιβάλλουν. Καθώς τα σωματίδια ταξιδεύουν μέσα στον καταγραφέα τροχιών, οι ανιχνευτές Silicon Pixels και Silicon Microstrips παράγουν μικροσκοπικά ηλεκτρικά σήματα τα οποία ενισχύονται και ανιχνεύονται.

Ο καταγραφέας τροχιών είναι το μέρος του ανιχνευτή που βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο σύγκρουσης και γι' αυτό το λόγο έχει εξαιρετικά μεγάλη πυκνότητα αισθητήρων: το εσωτερικό του τμήμα έχει 6.000 συνδέσεις ανά τετραγωνικό εκατοστό. Υπάρχουν συνολικά 75 εκατομμύρια κανάλια μετρήσεων στον ανιχνευτή τροχιών, ενώ οι ευαίσθητοι αισθητήρες πυρίτιου που τον απαρτίζουν μπορούν να καλύψουν την επιφάνεια ενός γηπέδου τένις.

2.2.3 Το Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο (ECAL)

Εξωτερικά των ανιχνευτών τροχιών βρίσκονται τα θερμιδόμετρα που ανιχνεύουν την ενέργεια των σωματιδίων. Η συνολική ενέργεια των ουδέτερων και φορτισμένων σωματιδίων μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας θερμιδόμετρα.

Όταν ένα σωματίδιο εισέρχεται σε ένα θερμιδόμετρο συγκρούεται με το πυκνό υλικό του ανιχνευτή. Οι συγκρούσεις γεννούν ένα καταγισμό δευτερογενών σωματιδίων και η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου απορροφάται από τον ανιχνευτή. Εξαιτίας αυτού, τα θερμιδόμετρα εγκαθίστανται εξωτερικά των ανιχνευτών τροχιών έτσι

ώστε η τροχιά του σωματιδίου να έχει ήδη καταγραφεί πριν αυτό απορροφηθεί από το θερμιδόμετρο.

Κανονικά τα μίονια και τα νετρίνο είναι τα μόνα σωματίδια τα οποία διέρχονται μέσα από τα θερμιδόμετρα και συνεχίζουν την πορεία τους στους ανιχνευτές μιονίων.

Τα ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα εγκαθίστανται δίπλα στους ανιχνευτές τροχιών και καταμετρούν την ενέργεια των ηλεκτρονίων, των ποζιτρονίων και των φωτονίων. Ένα ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο συνήθως αποτελείται από στρώματα μολύβδου μεταξύ των οποίων υπάρχουν όγκοι αερίων που λειτουργούν ως ανιχνευτές τροχιών. Όταν ένα ηλεκτρόνιο, ποζιτρόνιο ή φωτόνιο εισέρχεται στον μολύβδο, μπορεί να δημιουργηθούν μικροί καταιγισμοί δευτερογενών σωματιδίων. Αυτοί οι καταιγισμοί ανιχνεύονται από τους περιβάλλοντες όγκους αερίου. Όπως υποδηλώνεται από το όνομα "ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο", υπεύθυνη για τη δημιουργία δευτερογενών σωματιδίων είναι η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση.

Η ενέργεια του εισερχόμενου σωματιδίου μπορεί να υπολογιστεί καταμετρώντας το συνολικό ιονισμό του αερίου.

2.2.4 Το Αδρονικό Καλορίμετρο (HCAL)

Τα αδρονικά θερμιδόμετρα βρίσκονται εγκατεστημένα εξωτερικά των ηλεκτρομαγνητικών θερμιδομέτρων. Ένα αδρονικό θερμιδόμετρο μετράει την ενέργεια των αδρονίων, σωματιδίων αποτελούμενων από κουάρκ. Ένα αδρονικό θερμιδόμετρο κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως ένα ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, μόνο που συχνά χρησιμοποιείται σίδηρος αντί για μολύβδο.

Αδρόνια διαπερνούν τα ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα σχετικώς ανεπηρέαστα έτσι ώστε η ενέργειά τους μπορεί να μετρηθεί στο αδρονικό θερμιδόμετρο. Η ενέργεια καταγράφεται με παρόμοιο τρόπο όπως στο ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, όμως εδώ είναι η ισχυρή αλληλεπίδραση που δημιουργεί τα δευτερεύοντα σωματίδια. Μία ακόμη διαφορά είναι το ότι τα αδρόνια ταξιδεύουν πολύ μακρύτερα πριν απορροφηθούν στο θερμιδόμετρο. Συνεπώς τα αδρονικά θερμιδόμετρα είναι πολύ παχύτερα από τα ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα.

2.2.5 Το σύστημα μιονίων

Το μίονιο είναι ένα βαρύ (106 MeV), σε σύγκριση με το ηλεκτρόνιο, αρνητικά φορτισμένο λεπτόνιο. Είναι ασταθές και συνεπώς διασπάται σε άλλα σωματίδια. Ο μέσος χρόνος ζωής του είναι 2.2 μ s.

Διαφορετικά σωματίδια έχουν διαφορετικές δυνατότητες να διαπερνούν την ύλη και το μίονιο έχει μία πολύ υψηλή διεισδυτική ικανότητα. Μόνο τα μίονια (και τα νετρίνο) έχουν την ικανότητα να διαπερνούν πρώτα τους ανιχνευτές τροχιών και έπειτα τα θερμιδόμετρα. Οι ανιχνευτές μιονίων βρίσκονται εγκατεστημένοι συνεπώς στο πλέον απομακρυσμένο στρώμα των ανιχνευτών.

Όπως και τα αδρονικά θερμιδόμετρα, οι ανιχνευτές μιονίων αποτελούνται από στρώματα σιδήρου μεταξύ των οποίων βρίσκονται θάλαμοι τροχιών. Τα μίονια αλληλοεπιδρούν με το σίδηρο μέσα στον ανιχνευτή και γεννούν δευτερογενή σωματίδια, τα οποία ανιχνεύονται στους θαλάμους τροχιών. Οι ανιχνευτές μιονίων καταγράφουν φορτισμένα σωματίδια τα οποία διαπερνούν τα αδρονικά θερμιδόμετρα χωρίς να δημιουργούν καταγισμούς σωματιδίων.

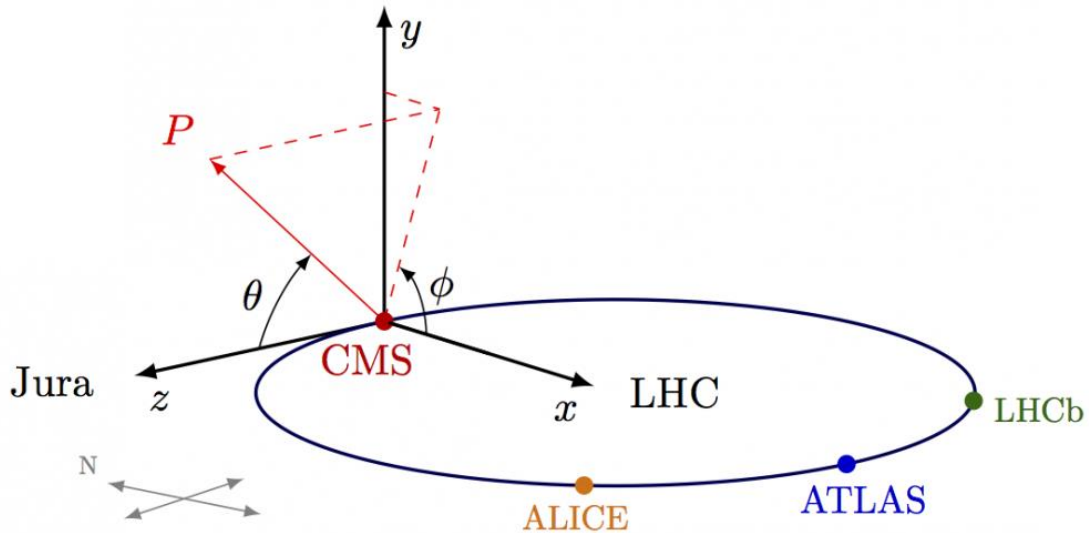
Τα νετρίνο περνούν χωρίς να ανιχνευτούν ακόμη και μέσα από τους ανιχνευτές μιονίων, καθώς αλληλοεπιδρούν μόνο ασθενώς μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Συνεπώς, ένα νετρίνο αλληλοεπιδρά πολύ σπάνια με το περιβάλλον του.

Τα νετρίνο είναι τα μόνα σωματίδια που κανονικά δεν μπορούν να ανιχνευτούν σε έναν ανιχνευτή σωματιδίων. Ωστόσο, είναι δυνατό να συμπεράνουμε έμμεσα αν δημιουργήθηκαν νετρίνο από μια σύγκρουση σωματιδίων. Στις συγκρούσεις που δίνουν νετρίνο, η ενέργεια και η ορμή που θα ανιχνευτεί θα είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες στο σύστημα κέντρου μάζας.

2.2.6 Το σύστημα συντεταγμένων του CMS

Το σύστημα συντεταγμένων που έχει υιοθετηθεί από το πείραμα CMS έχει την αρχή του (0,0) στο κέντρο του ανιχνευτή, στο σημείο σύγκρουσης. Ο άξονας y δείχνει κατακόρυφα προς τα επάνω, ενώ ο άξονας x δείχνει προς το κέντρο του LHC. Ως εκ

τούτου, ο άξονας z , δείχνει κατά μήκος της δέσμης προς τα βουνά Jura. Η αξιμουθιακή γωνία ϕ μετράται από τον άξονα x στο επίπεδο xy ενώ η πολική γωνία θ μετράται από τον άξονα z .



Σχήμα 2.3 Σύστημα συντεταγμένων του CMS

2.3 Ελλείπουσα εγκάρσια ορμή

Ως ελλείπουσα εγκάρσια ορμή ή αλλιώς $E_{T\text{miss}}$ ονομάζουμε την ορμή/ενέργεια που δεν ανιχνεύεται στον ανιχνευτή, αλλά αναμένεται λόγω της διατήρησης ενέργειας και ορμής στο εγκάρσιο επίπεδο. Η $E_{T\text{miss}}$ αποδίδεται γενικά σε σωματίδια που διαφεύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς να ανιχνευθούν όπως τα νετρίνο, (αν και ελλείπουσα ενέργεια μπορεί να προκληθεί από λανθασμένες μετρήσεις της ορμής/ενέργειας των ανιχνευόμενων σωματιδίων).

Η ελλείπουσα εγκάρσια ορμή/ενέργεια είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές για τη διάκριση των λεπτονικών διασπάσεων των W μποζονίων ή των top κουάρκς από τα γεγονότα υποβάθρου τα οποία δεν περιέχουν νετρίνο όπως για παράδειγμα τα Drell-Yan events. Αποτελεί επίσης μία σημαντική μεταβλητή στην αναζήτηση νέων ασθενώς αλληλεπιδρώντων και μακρόβιων σωματιδίων.

Στον LHC, η αρχική ορμή των συγκρουόμενων συστατικών κατά μήκος του άξονα της δέσμης δεν είναι γνωστή (γιατί η ενέργεια του κάθε αδρονίου χωρίζεται και ανταλλάσσεται διαρκώς, μεταξύ των συστατικών του), οπότε το ποσό της ενέργειας που λείπει δεν

μπορεί να προσδιοριστεί. Ωστόσο, η αρχική ορμή και ενέργεια σε ένα επίπεδο εγκάρσιο προς τον άξονα της δέσμης είναι μηδέν. Έτσι βρίσκουμε την ελλείπουσα εγκάρσια ορμή/ενέργεια (E_{Tmiss}).

Εν γένει η ελλείπουσα εγκάρσια ορμή ορίζεται ως η προβολή στο επίπεδο που είναι κάθετο στη δέσμη, του αρνητικού διανυσματικού αθροίσματος όλων των ορμών των ανακατασκευασμένων σωματιδίων ενός γεγονότος.

Η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια είναι το μέτρο του διανύσματος της ελλείπουσας εγκάρσιας ορμής.

2.4 Αδρονικοί πίδακες (jets)

Οι Πίδακες σωματιδίων είναι ομάδες σωματιδίων οι οποίες προκύπτουν από συγκεκριμένες συγκρούσεις υψηλών ενεργειών, παραδείγματος χάριν από βίαιες συγκρούσεις πρωτονίων-αντιπρωτονίων στον επιταχυντή Tevatron στο Εργαστήριο Fermilab ή πρωτονίων-πρωτονίων στον επιταχυντή Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων, LHC στο CERN.

Οι συγκρούσεις αυτές παράγουν πολύ ενεργητικά κουάρκ και γκλουόνια: καθώς ταξιδεύουν μακριά από το σημείο της σύγκρουσης, εκπέμπουν με την σειρά τους επιπλέον γκλουόνια που και αυτά εκπέμπουν ακόμα περισσότερα γκλουόνια. Αυτό οδηγεί σε έναν σχετικά στενό καταιγισμό, η αλλιώς πίδακα, σωματιδίων.

Στο τελευταίο στάδιο της δημιουργίας ενός πίδακα, τα κουάρκ και τα γκλουόνια συνδυάζονται και σχηματίζουν σωματίδια όπως πρωτόνια, πιόνια και καόνια. Μετρώντας αυτά τα τελικά προϊόντα, οι φυσικοί μπορούν να ταυτοποιήσουν τις ιδιότητες του πίδακα και κατά συνέπεια τις λεπτομέρειες της σύγκρουσης που τον παρήγαγε. Οι επιστήμονες αναμένουν να δουν πίδακες στις "υπογραφές" σχεδόν όλων των ενδιαφερουσών συγκρούσεων στον επιταχυντή LHC.

Οι πιο βίαιες συγκρούσεις θα παράξουν πίδακες με την μέγιστη δυνατή ορμή, και αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διερευνηθούν οι μικρότερες δυνατές αποστάσεις μέσα στα συγκρουόμενα πρωτόνια, μικρότερες από ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου. Οι φυσικοί ελπίζουν ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτούς τους υψηλής ενέργειας

πίδακες για να δουν μέσα στα κουάρκ που απαρτίζουν τα πρωτόνια.

2.5 Ανακατασκευή των jets

Η ανακατασκευή των jets είναι ένα πολύ κρίσιμο κομμάτι της ανάλυσης των αδρονικών τελικών καταστάσεων (hadronic final states) και πραγματοποιείται μέσω του Particle Flow αλγορίθμου χρησιμοποιώντας τον anti- k_T clustering algorithm. Μέσω του Particle Flow αλγορίθμου πραγματοποιείται η ανακατασκευή των σωματιδίων που προκύπτουν από κάθε event. Γίνεται χρήση των πληροφοριών από όλους τους subdetectors του CMS για να ταυτοποιηθούν και να ανακατασκευαστούν τα σωματίδια. Λόγω της διαδικασίας καταγιγισμού, μικρές αλλαγές κατά την αρχή της αδρανοποίησης (hadronization process) μπορούν να οδηγήσουν σε αρκετά μεγάλες αποκλίσεις με αυτό που θα μετρηθεί στο τέλος. Επίσης τα τελικά αποτελέσματα επηρεάζονται και λόγω ηλεκτρονικού θορύβου κάνοντας τη διαδικασία ταυτοποίησης ακόμα δυσκολότερη. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, έχουν δημιουργηθεί διάφοροι αλγόριθμοι για τη ταυτοποίηση και μελέτη των jets.

2.6 Ωκότητα (Rapidity)

Για κάθε ανακατασκευασμένο αντικείμενο (jets, leptons, photons) υπολογίζουμε το τετραδιάνυσμα της ορμής $P_\mu = (P_T, \eta, \varphi, m)$ όπου P_T : εγκάρσια ορμή, η : pseudorapidity, φ : αζιμουθιακή γωνία, m : μάζα

$$P_x = P_T \cdot \cos \varphi$$

$$P_y = P_T \cdot \sin \varphi$$

$$P_z = P_T \cdot \sinh \eta$$

$$|\vec{P}| = \sqrt{(P_T \cdot \cos \varphi)^2 + (P_T \cdot \sin \varphi)^2 + (P_T \cdot \sinh \eta)^2} = P \cdot \cosh \eta$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{E+P_z \cdot c}{E-P_z \cdot c} = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{E+P_z \cdot c}{M_T \cdot c^2}$$

Σχέση μάζας-ενέργειας-ορμής για ένα σωματίδιο με μάζα ηρεμίας M :

$$E^2 = P_x^2 c^2 + P_y^2 c^2 + P_z^2 c^2 + M^2 c^4$$

$$M_T^2 c^4 = P_x^2 c^2 + P_y^2 c^2 + M^2 c^4$$

Επίσης χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα :

$\tanh\theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{e^\theta + e^{-\theta}}$ καταλήγουμε στη ακόλουθη σχέση για τη rapidity :

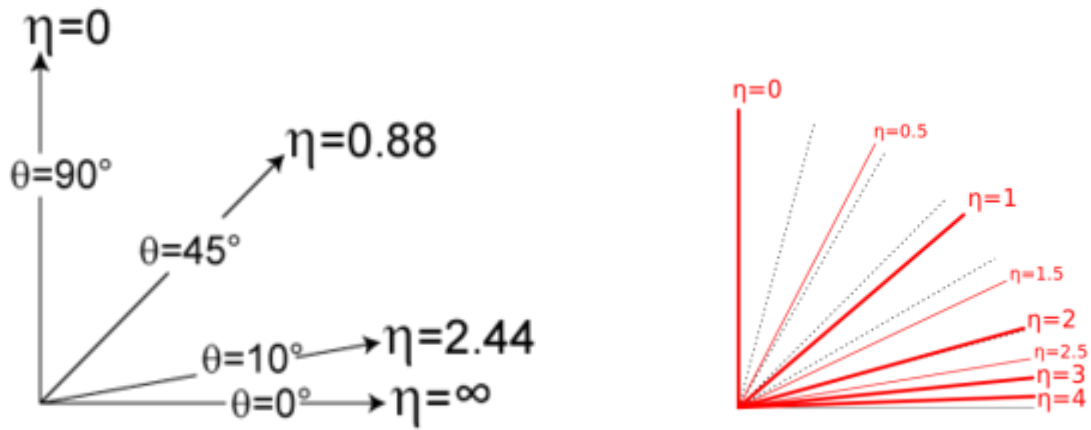
$$y = \tanh^{-1}\left(\frac{P_z \cdot c}{E}\right)$$

Η rapidity είναι μηδέν όταν ένα σωματίδιο κινείται σε εγκάρσιο επίπεδο με τον άξονα της δέσμης, αλλά τείνει στο $\pm\infty$ όταν το σωματίδιο κινείται παράλληλα με τον άξονα της δέσμης. Σχετίζεται με τη γωνία που σχηματίζει το επίπεδο xy με την κατεύθυνση ενός σωματιδίου προϊόντος της σύγκρουσης.

Ορισμένες φορές είναι δύσκολο να μετρήσουμε τη rapidity για σχετιλιστικά σωματίδια καθώς χρειαζόμαστε τόσο την ενέργεια όσο και το συνολικό διάνυσμα της ορμής ενός σωματιδίου. Τα μεγέθη αυτά είναι δύσκολο να μετρηθούν, ειδικά σε υψηλές τιμές της rapidity όπου η z συνιστώσα της ορμής είναι πολύ μεγάλη. Αυτά μας οδηγούν σε ένα νέο μέγεθος, την pseudorapidity, το οποίο είναι αρκετά πιο εύκολο στον υπολογισμό του.

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

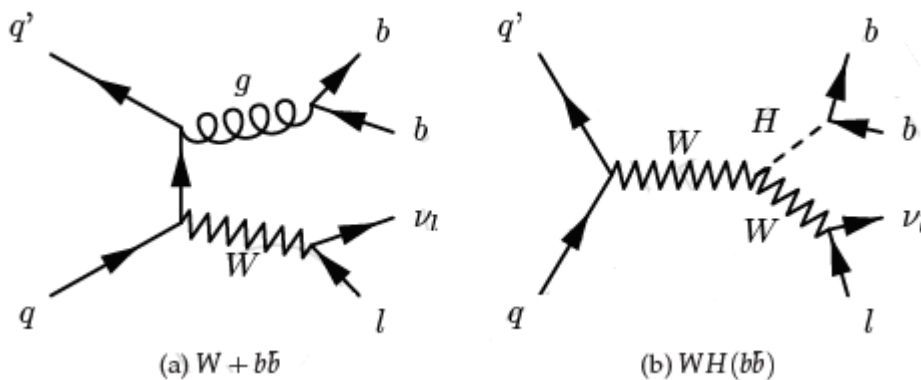
Οι τιμές που λαμβάνει η pseudorapidity η είναι από $-\infty$ έως $+\infty$ με βάση την μαθηματική περιγραφή, όμως στην πράξη σε έναν ανιχνευτή είναι από -5 έως $+5$.



Σχήμα 2.4 Pseudorapidity

Κεφάλαιο 3 Ανάλυση

Η ανάλυση χρησιμοποιεί ένα δείγμα από συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων με $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$. Η μέτρηση της παραγωγής ενός W σε συνδυασμό με b κουαρκς σε συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων στον LHC είναι σημαντική για διάφορες πειραματικές έρευνες. Συγκεκριμένα τέτοιες διεργασίες αποτελούν ένα υπόβαθρο στην παραγωγή του Higgs, όπου το μποζόνιο Higgs διασπάται σε $b\bar{b}$ ζεύγος. Η ανακάλυψη από το ATLAS και το CMS ενός ουδέτερου μποζονίου μάζας 125 GeV (κατά προσέγγιση) δίνει κίνητρο για περαιτέρω μελέτες ώστε να προσδιοριστεί η φύση του και να καθοριστεί η σύζευξη του μποζονίου σε b κουαρκς.



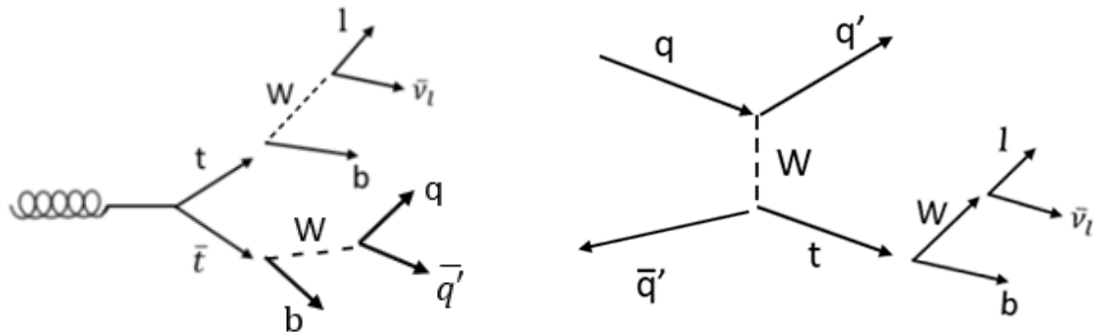
Σχήμα 3.1

Feynman diagrams of production of $W+b\bar{b}$ and associated production of the Higgs boson in $WH(b\bar{b})$. $W+b\bar{b}$ is an irreducible background in the measurement of $H \rightarrow b\bar{b}$ production.

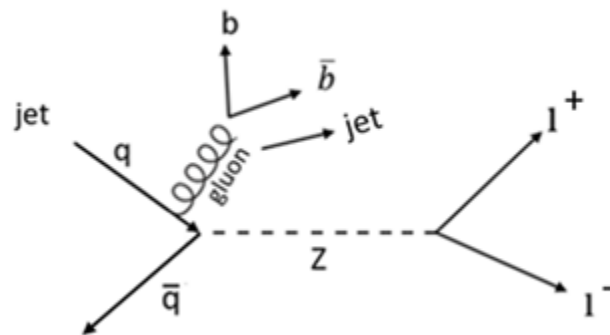
3.1 W + bb διεργασία

Στην παρούσα ανάλυση μελετάται η αλληλεπίδραση κατά την οποία στην τελική κατάσταση (final state) έχουμε ένα μποζόνιο W και δύο b κουάρκς. Ωστόσο κατά την σύγκρουση των δεσμών πρωτονίων εκτός από την προαναφερθείσα διεργασία ενδέχεται να προκύψουν και άλλες διεργασίες όπως είναι οι Drell – Yan, $t\bar{t}$, Single Top, Diboson καθώς και η QCD οι οποίες αποτελούν το υπόβαθρο της βασικής διεργασίας.

Ακολούθως παρατίθενται ενδεικτικά κάποια από τα διαγράμματα Feynman των διεργασιών αυτών.



Σχήμα 3.2 Διαγράμματα Feynmann των διεργασιών $t\bar{t}$ (αριστερά) και Single Top (δεξιά)



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα Feynmann της Drell - Yan διεργασίας

3.2 Διεργασίες Υποβάθρου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε την διεργασία κατά την οποία στην τελική κατάσταση έχουμε ένα W μποζόνιο και δύο b κουάρκς. Ωστόσο πέραν αυτής της διεργασίας πραγματοποιούνται και άλλες διεργασίες όπως έχει ήδη αναφερθεί οι οποίες αποτελούν το υπόβαθρο της βασικής μας διεργασίας. Αυτές είναι οι : Drell – Yan, $t\bar{t}$, Single Top, Diboson καθώς και η QCD.

Η Drell – Yan διεργασία πραγματοποιείται όταν ένα κουάρκ ενός αδρονίου και ένα αντι – κουάρκ ενός άλλου αδρονίου σκεδάζονται δημιουργώντας ένα δυνητικό φωτόνιο ή Z μποζόνιο το οποίο στη συνέχεια διασπάται σε ένα ζεύγος αντίθετα φορτισμένων λεπτονίων.

Τα top κουάρκς παράγονται μέσω δύο συγκεκριμένων μηχανισμών: μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης παράγονται ζεύγη top – αντι-top κουάρκς ($t\bar{t}$) ενώ τα single top κουάρκς παράγονται μέσω της ηλεκτροσθενούς αλληλεπίδρασης. Η $t\bar{t}$ διεργασία κυριαρχεί έναντι της single top. Τα top κουάρκς κυρίως διασπώνται σε W μποζόνια και b κουάρκς.

Τέλος η QCD διεργασία ενδέχεται να προσομοιαστεί με τη Single Top διεργασία όπου ένα λεπτόνιο παράγεται κατά τη διαδικασία αδρονοποίησης και ένα jet μπορεί να αναγνωριστεί εσφαλμένα ως ένα απομονωμένο λεπτόνιο. Τα σχήματα των κατανομών των QCD events προκύπτουν από τη διαφορά ανάμεσα στα data και το άθροισμα των υπολοίπων προσομοιωμένων backgrounds. Η περιοχή της QCD υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα ίδια κριτήρια επιλογής με τη signal region με την επιπλέον απαίτηση το μόνιο να είναι antiisolated.

3.3 Προσομοιώσεις Monte Carlo

Στη Φυσική Υψηλών ενεργειών χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις του ανιχνευτή και των διαφόρων φυσικών διεργασιών. Αυτές οι μοντελοποιήσεις οδηγούν στο να βελτιωθούν οι τεχνικές ανάλυσης και να κατανοηθεί η επίδοση πολλών και περίπλοκων υποανιχνευτών όπως αυτών που περιέχονται στο CMS. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο Monte Carlo στην οποία χρησιμοποιούνται τυχαία δείγματα στα θεωρητικά μοντέλα ώστε να προβλεφθεί η αναμενόμενη συμπεριφορά τους κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες. Τα βασικά προγράμματα προσομοίωσης

για τη δημιουργία τυχαίων γεγονότων είναι η PYTHIA, POWHEG, MADGRAPH και TAUOLA.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα προσομοιωμένα γεγονότα της εκάστοτε διεργασίας. Το sample “WJetsToLNu” αντιστοιχεί στο σήμα μας, δηλαδή στην Wbb διεργασία. Το sample “DYJetsToLL” αντιστοιχεί στην Drell – Yan διεργασία. Το sample “TT TuneCUETP8M2T4 13 TeV” αντιστοιχεί στην ttbar διεργασία. Τα “ST_t-channel”, “ST_tW” και “ST_s-channel” αντιστοιχούν στη Single Top διεργασία. Και τέλος τα “WW”, “WZ” και “ZZ” αντιστοιχούν στην Diboson διεργασία. Τα Monte Carlo samples βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η ανάλυση είναι :

WJetsToLNu_HT-*To*-madgraphMLM-pythia8
DYJetsToLL_HT-*To*-madgraphMLM-pythia8
TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8
ST_t-channel_*-powhegV2-madspin-pythia8
ST_tW_*-powheg-pythia8
ST_s-channel_*-amcatnlo-pythia8
WW_*-pythia8
WZ_*-pythia8
ZZ_*-pythia8

Ακολουθεί ο πίνακας με τις ενεργές διατομές των Monte Carlo samples :

Sample	σ (pb)	Sample	σ (pb)	Sample	σ (pb)
DY1	169,9	WJets1	1353	ST-t-channel-top	136,02
2	147,4	2	1346	ST-t-channel-antitop	80,95
3	40,99	3	359,7	ST_tW	35,6
4	5,678	4	48,91	ST_tW	35,6
5	1,367	5	12,05	ST-s-channel	10,32
6	0,6304	6	5,501	TT	832
7	0,1514	7	1,329	WW	115
8	0,003565	8	0,03216	WZ	47,13
				ZZ	16,523

3.4 Μεταβλητές

Οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων τα οποία έχουν προέλθει από προσομοίωση Monte Carlo περιγράφονται ακολούθως:

1. n_{Jets} = ο αριθμός των jets
2. n_{BJets} = ο αριθμός των b- tagged jets(b tagging = είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος αποφασίζει εάν ένα jet προέρχεται από b κουάρκ)
3. met = ελλείπουσα εγκάρσια ορμή
4. $met\Phi$ = κατεύθυνση του διανύσματος της ελλείπουσας εγκάρσιας ορμής
5. $lmet_{\text{MT}}$ = ανακατασκευασμένη μάζα από το λεπτόνιο και την ελλείπουσα εγκάρσια ορμή
6. $lmet\Delta\Phi$ = γωνία στο εγκάρσιο επίπεδο ανάμεσα στο λεπτόνιο και την ελλείπουσα εγκάρσια ορμή
7. $lepP_{\text{T}}[0]$ = ορμή του leading λεπτονίου
8. $lepE_{\text{T}}[0]$ = ψευδοωκότητα του leading λεπτονίου
9. $lepId[0]$ = id κωδικός του leading λεπτονίου
10. $jetP_{\text{T}}[0]$ = ορμή του leading jet
11. $jetE_{\text{T}}[0]$ = ψευδοωκότητα του leading jet

3.5 Επιλογή γεγονότων (Event Selection)

Στην παρούσα ανάλυση επιθυμούμε να μετρήσουμε την ενεργό διατομή για την $W + bb$ διεργασία συνεπώς εφαρμόσαμε κάποιους περιορισμούς έτσι ώστε περιορίσουμε άλλες διεργασίες οι οποίες αποτελούν υπόβαθρο της βασικής διεργασίας. Επιλέγουμε λοιπόν γεγονότα στα οποία θα έχουμε ένα ανακατασκευασμένο λεπτόνιο με εγκάρσια ορμή μεγαλύτερη από 35 GeV και ψευδοωκότητα $|\eta| < 2.1$. Επιπλέον, επιθυμούμε να έχουμε γεγονότα με δύο ακριβώς jets τα οποία να είναι και b - tagged, δηλαδή να προέρχονται από b κουάρκ. Κατόπιν αποκλείουμε τα γεγονότα με $|\eta| > 2.4$. Η συνεισφορά των Drell - Yan, $t\bar{t}$ κλπ. έχει περιοριστεί αποκλείοντας τα events με 2 leptons και πάνω.

$nJets == 2$ (ακριβώς 2 jets)
$nBJets == 2$ (και τα δύο να είναι b -tagged)
$nFwdJets == 0$ (να μην έχουμε jets με $ \eta > 2.4$)
$nLeptons == 1$ (ακριβώς 1 λεπτόνιο)
$ lepId == 13$ (τα leptons να είναι μίονια)
$ lepEta < 2.1$
$ lepPt > 35$
$nVetoLeptons == 0$ (να μην υπάρχουν άλλα λεπτόνια)

3.5.1 Σύστημα σκανδαλισμού (triggering system)

Κατά τη διάρκεια της πλήρους λειτουργίας του CMS, πραγματοποιούνται περίπου ένα δισεκατομμύριο συγκρούσεις ανά δευτερόλεπτο στο εσωτερικό του ανιχνευτή. Φυσικά είναι αδύνατον να διαβαστούν όλα αυτά τα γεγονότα αλλά ακόμη και αν υπήρχε τρόπος, τα περισσότερα από αυτά θα ήταν λιγότερο πιθανό να αποκαλύψουν νέα φαινόμενα. Χρειαζόμαστε λοιπόν έναν σκανδαλιστή (trigger) ο οποίος μπορεί να επιλέξει τα δυνητικά ενδιαφέροντα γεγονότα όπως εκείνα τα οποία παράγουν το σωματίδιο Higgs και θα μειώσει τον ρυθμό παραγωγής σε μερικές εκατοντάδες “events” ανά δευτερόλεπτο τα οποία μπορούν να διαβαστούν και να αποθηκευτούν για περαιτέρω ανάλυση.

Ωστόσο, με ομάδες πρωτονίων να συγκρούονται 40 εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο υπάρχουν μόνο 25 νανοδευτερόλεπτα (25 δισεκατομμύρια δευτερόλεπτα του δευτερολέπτου) πριν φτάσουν στην επόμενη “παρτίδα”.

Δημιουργούνται νέα κύματα σωματιδίων προτού απομακρυνθούν από τον ανιχνευτή αυτά από το τελευταίο γεγονός. Η λύση είναι να αποθηκεύονται τα δεδομένα σε αγωγούς που μπορούν να διατηρούν και να επεξεργάζονται πληροφορίες από πολλές αλληλεπιδράσεις ταυτόχρονα. Για να μην συγχέουμε σωματίδια από δύο διαφορετικά γεγονότα, οι ανιχνευτές θα πρέπει να έχουν πολύ καλή ανάλυση χρόνου και τα σήματα από τα εκατομμύρια ηλεκτρονικά κανάλια θα πρέπει να συγχρονίζονται έτσι ώστε όλα να μπορούν να αναγνωριστούν πως προέρχονται από το ίδιο γεγονός.

3.5.2 Επίπεδα του συστήματος σκανδαλισμού

Το πρώτο επίπεδο σκανδαλισμού είναι μία εξαιρετικά γρήγορη και αυτόματη διαδικασία που αναζητά απλά σωματίδια ενδιαφέρουσας φυσικής όπως για παράδειγμα σωματίδια με μεγάλη ενέργεια ή ασυνήθιστους συνδυασμούς. Με αυτόν τον τρόπο επιλέγουμε τα καλύτερα 100.000 γεγονότα κάθε δευτερόλεπτο από τα δισεκατομμύρια διαθέσιμα. Για την επόμενη δοκιμή, δηλαδή το επόμενο επίπεδο σκανδαλισμού λαμβάνουμε και συγχρονίζουμε τις πληροφορίες από τα διαφορετικά μέρη του ανιχνευτή για να ανακατασκευάσουμε πλήρως το γεγονός και να το στείλουμε σε μία βάση με περισσότερους από 1000 τυπικούς υπολογιστές. Οι υπολογιστές αυτοί λειτουργούν σαν ταχύτατοι αναγνώστες οι οποίοι αναθεωρούν τις πληροφορίες λεπτομερέστερα για λιγότερο από το ένα δέκατο του δευτερολέπτου. Πραγματοποιούν πολύπλοκες δοκιμές φυσικής για να αναζητήσουν συγκεκριμένες υπογραφές, όπως για παράδειγμα να αντιστοιχίσουν τροχιές με χτυπήματα στους θαλάμους μιονίων ή να εντοπίσουν φωτόνια μέσω της υψηλής τους ενέργειας. Συνολικά επιλέγουν 100 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο και τα υπόλοιπα 99.900 απορρίπτονται. Μένουμε μόνο με τα γεγονότα σύγκρουσης που μπορούν να μας διδάξουν κάτι νέο για τη φυσική. Παρά το σύστημα σκανδαλισμού, ο CMS εξακολουθεί να καταγράφει και να αναλύει αρκετά petabytes δεδομένων δηλαδή εκατομμύρια gigabytes παρόλο που όλα αυτά τα δεδομένα δεν αποθηκεύονται.

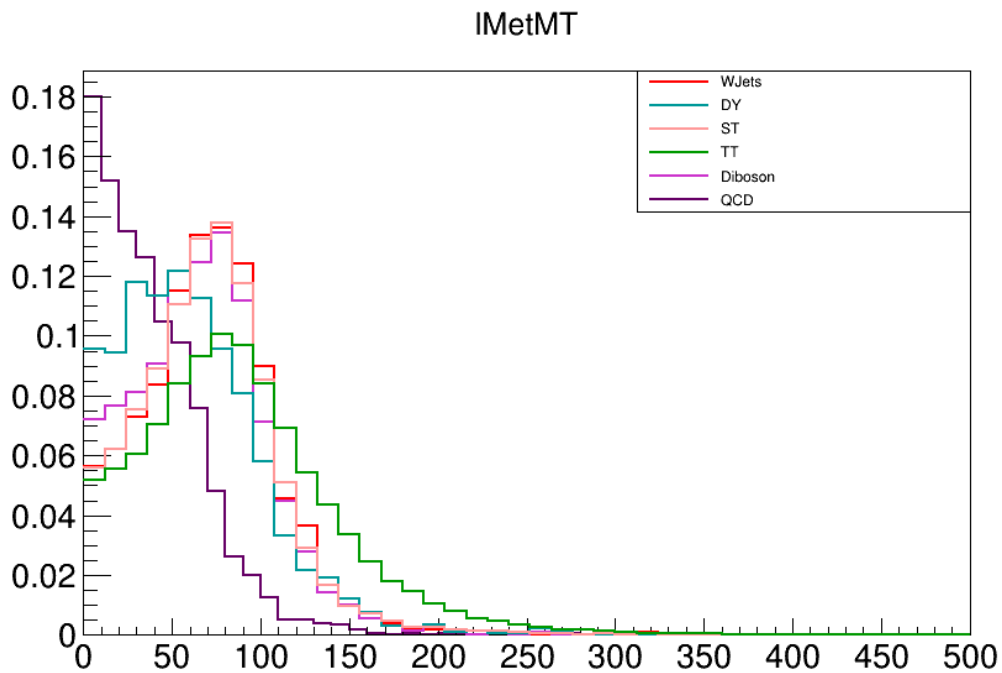
3.6 Ανακατασκευή του W μποζονίου

Για την ανακατασκευή του W μποζονίου πραγματοποιείται συνδυασμός των απομονωμένων λεπτονίων (isolated leptons) με την E_T^{miss} . Η transverse mass του W υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$m_T = 2 \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot E_T^l (1 - \cos \Delta\varphi)$$

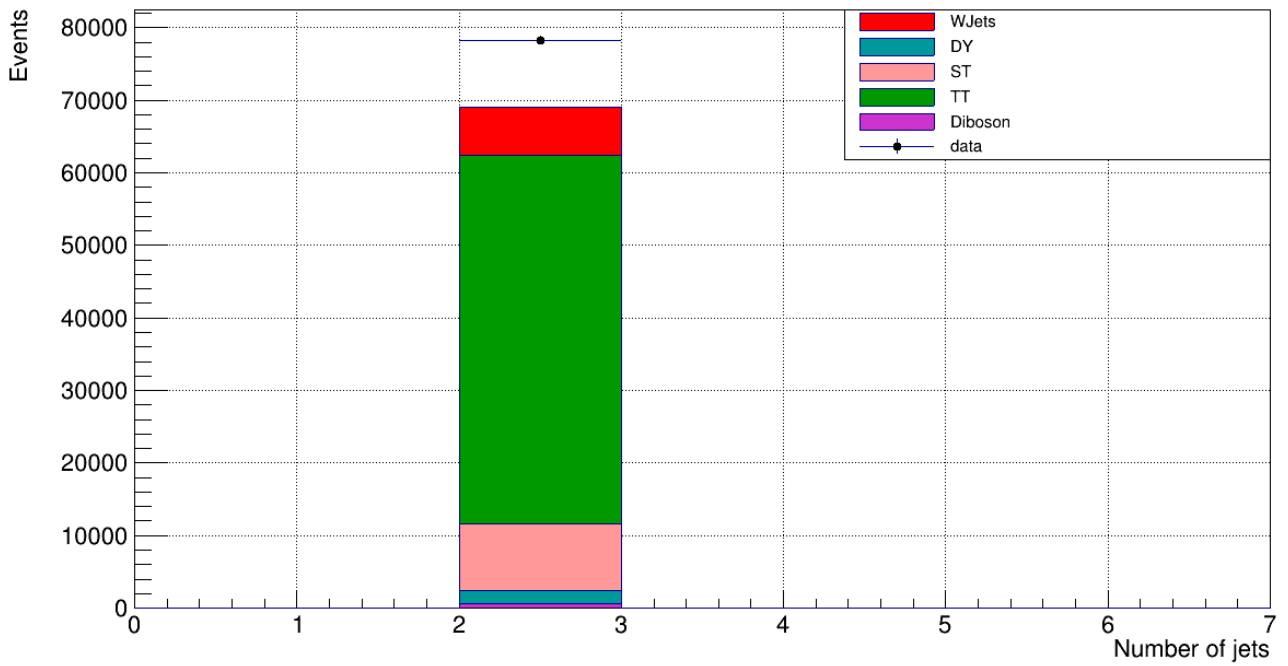
όπου $\Delta\varphi$, η αζιμουθιακή γωνία μεταξύ του λεπτονίου και της met στο εγκάρσιο επίπεδο.

Η transverse mass αποτελεί έναν φυσικό διαχωριστή κατά των τελικών καταστάσεων οι οποίες δεν περιέχουν W μποζόνια όπως για παράδειγμα στις QCD διεργασίες οι οποίες έχουν ένα λεπτόνιο καθώς και ελλείπουσα εγκάρσια ορμή αλλά σχετικά χαμηλή τιμή της transverse mass.

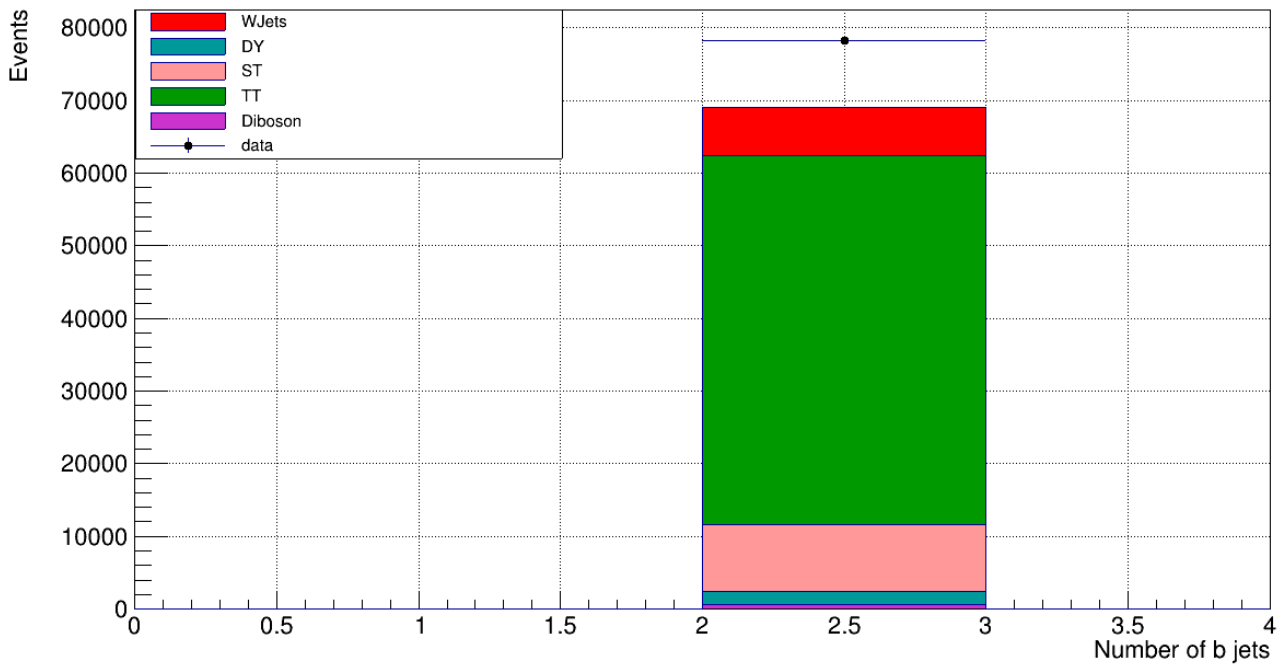


Σχήμα 3.5 Shapes των κατανομών

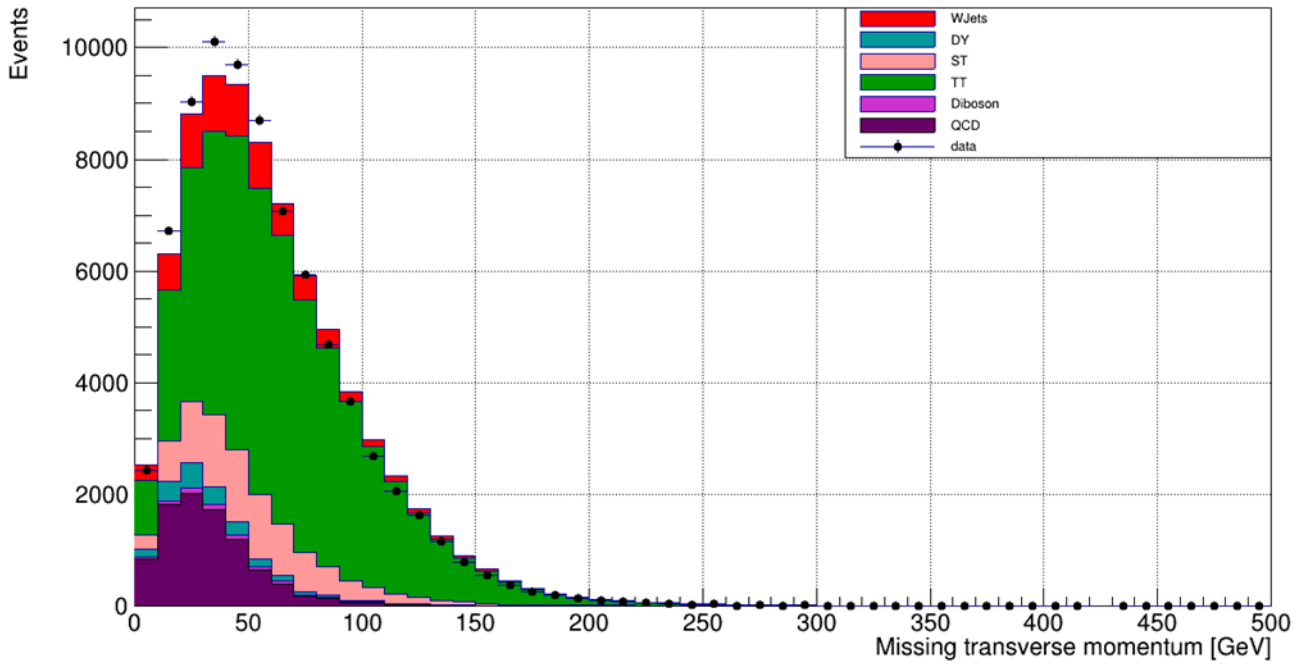
Number of jets



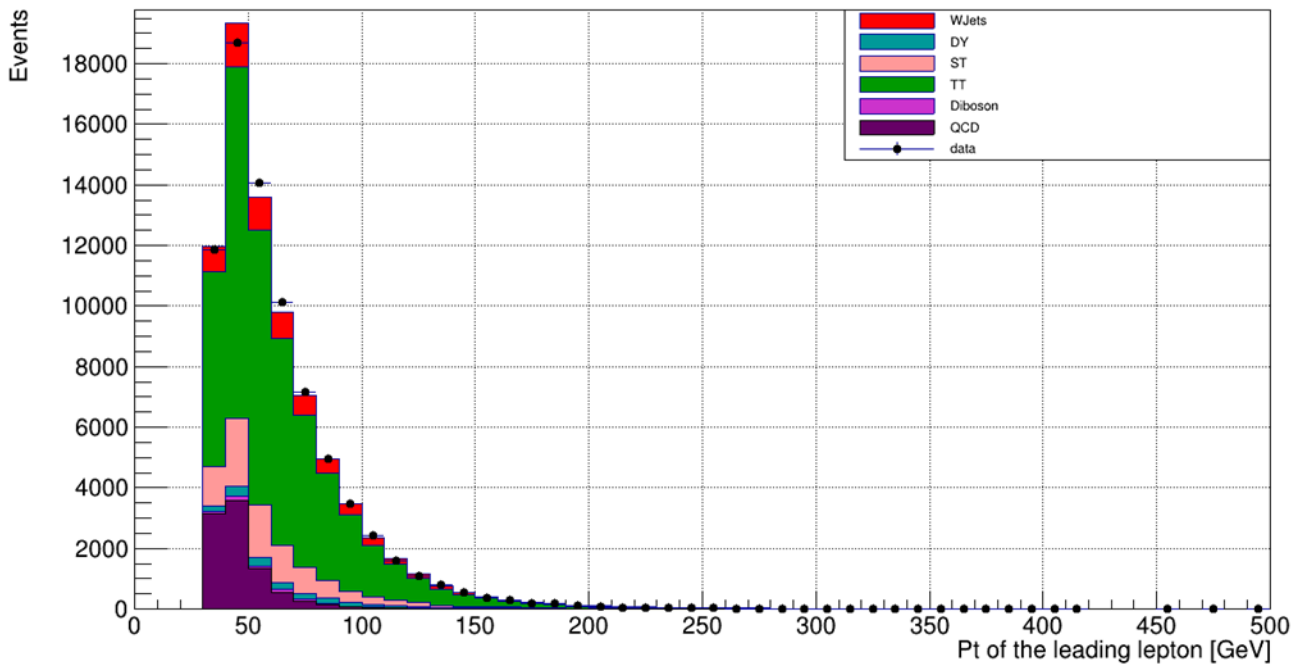
Number of b jets



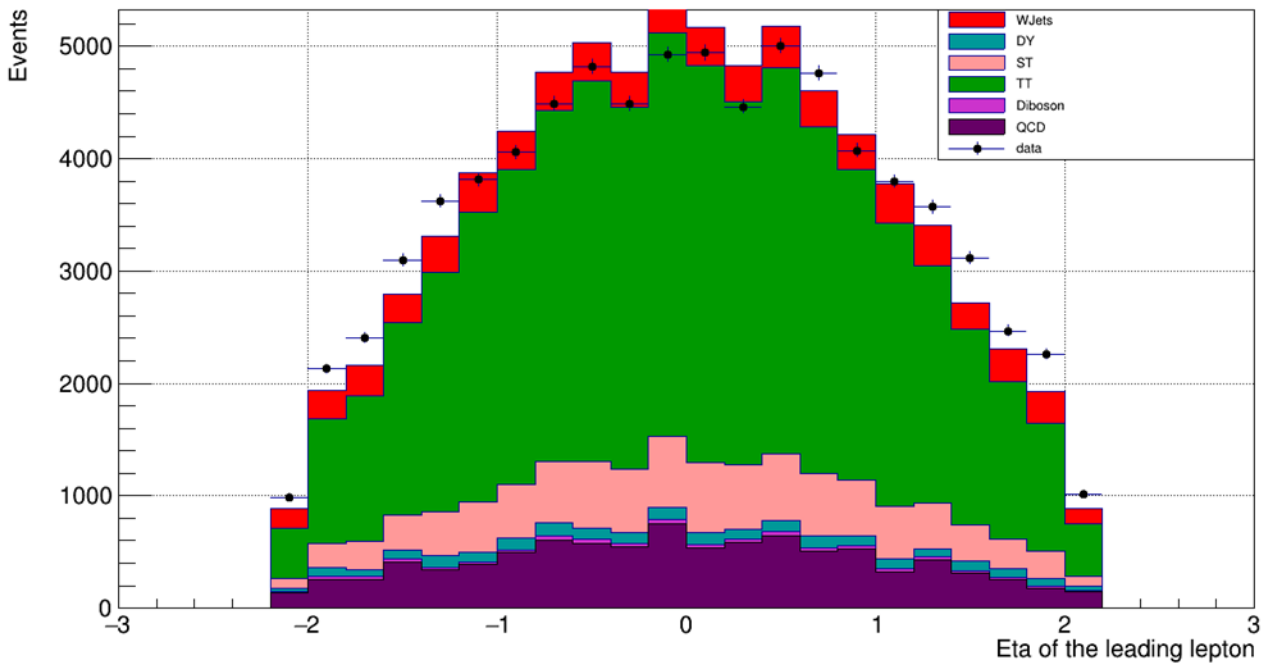
Missing transverse momentum



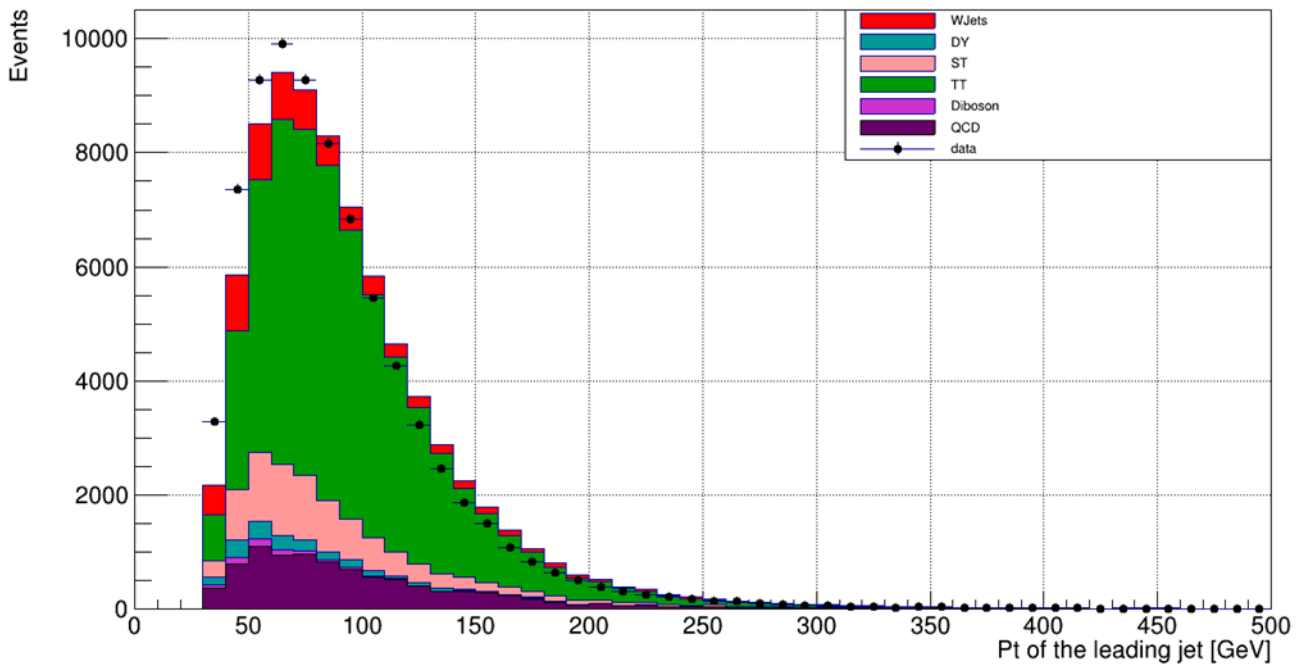
Pt of the leading lepton [GeV]

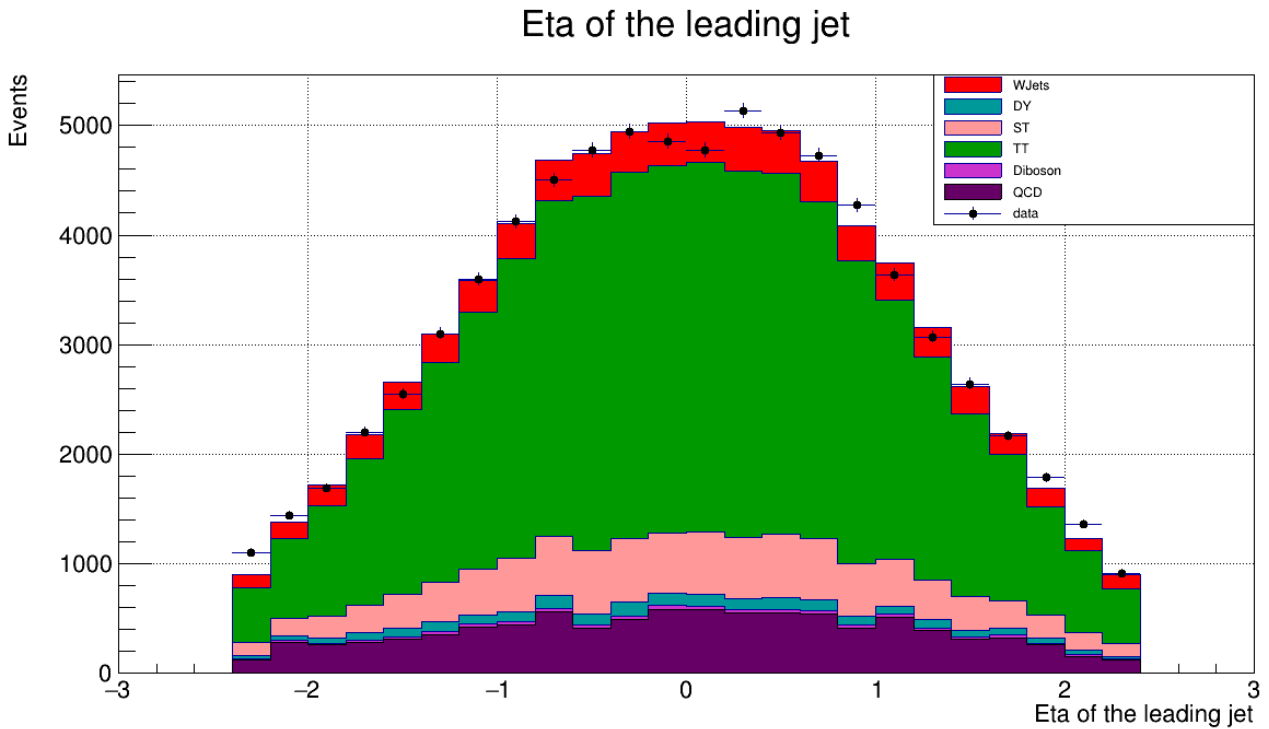


Eta of the leading lepton



Pt of the leading jet [GeV]





3.7 Μέθοδος προσαρμογής (fit)

Η RooFit βιβλιοθήκη αποτελεί ένα εργαλείο για τη μοντελοποίηση της αναμενόμενης κατανομής των δεδομένων σε μία ανάλυση. Συνήθως στην ανάλυση δεδομένων θέλουμε να εξετάσουμε το πόσο καλά τα δεδομένα προσαρμόζονται στην υπόθεσή μας. Έχοντας τα δεδομένα, αναζητούμε μία συνάρτηση η οποία να προσαρμόζεται σε αυτά, καθώς και τις τιμές των παραμέτρων για το βέλτιστο fitting. Η βιβλιοθήκη RooFit επεκτείνει το περιβάλλον ανάλυσης του ROOT παρέχοντας, εκτός από τα βασικά εργαλεία οπτικοποίησης και επεξεργασίας δεδομένων, μια γλώσσα κατάλληλη για την περιγραφή μοντέλων δεδομένων.

Κάθε κλάση του RooFit έχει ένα προς ένα αντιστοιχία με ένα μαθηματικό αντικείμενο. Υπάρχει μία κλάση η οποία εκφράζει μία μεταβλητή, η RooRealVar, μία κλάση η οποία εκφράζει μία συνάρτηση, η RooAbsReal, μία κλάση η οποία εκφράζει μία συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η RooAbsPdf κλπ.

Concept	Math Symbol	RooFit class name
Variable	x, p	<code>RooRealVar</code>
Function	$f(\vec{x})$	<code>RooAbsReal</code>
PDF	$F(\vec{x}; \vec{p}, \vec{q})$	<code>RooAbsPdf</code>
Space point	\vec{x}	<code>RooArgSet</code>
Integral	$\int_{\vec{x}_{min}}^{\vec{x}_{max}} f(\vec{x}) d\vec{x}$	<code>RooRealIntegral</code>
List of space points	\vec{x}_k	<code>RooAbsData</code>

Σχήμα 3.6 Αντιστοιχία μεταξύ των μαθηματικών αντικειμένων και των κλάσεων του RooFit

Το RooFit εκφράζει τα μοντέλα των δεδομένων του με συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας οι οποίες είναι εξ'ορισμού θετικές και κανονικοποιημένες στη μονάδα.

$$\int_{\vec{x}_{min}}^{\vec{x}_{max}} f(\vec{x}) d\vec{x} \equiv 1, \quad F(\vec{x}, \vec{p}) \geq 0$$

Η απλούστερη και πιο κοινή χρήση του RooFit είναι ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων PDFs για την παραγωγή μιας σύνθετης PDF με σκοπό τον υπολογισμό της τιμής του σήματος καθώς και του υποβάθρου σε ένα μονοδιάστατο σύνολο δεδομένων. Η βιβλιοθήκη του RooFit παρέχει περισσότερες από 20 βασικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές της Φυσικής υψηλών ενεργειών περιλαμβάνοντας βασικές PDFs όπως οι Gaussian, exponential and polynomial shapes, physics inspired PDFs, e.g. decay functions, Breit-Wigner, Voigtian, ARGUS shape, Crystal Ball shape, and non-parametric PDFs (histogram and KEYS[4]).

Ο τελεστής RooAddPdf συνδυάζει τις PDFs του σήματος και του υποβάθρου κι έτσι προκύπτει μία σύνθετη PDF με τόσες παραμέτρους όσες είναι και οι PDFs. Αφού κατασκευαστεί το μοντέλο μπορεί να πραγματοποιηθεί προσαρμογή στα δεδομένα (fit) μέσω της μεθόδου μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood method).

Στην παρούσα ανάλυση, η συνάρτηση η οποία μοντελοποιεί την κατανομή των δεδομένων μας είναι η:

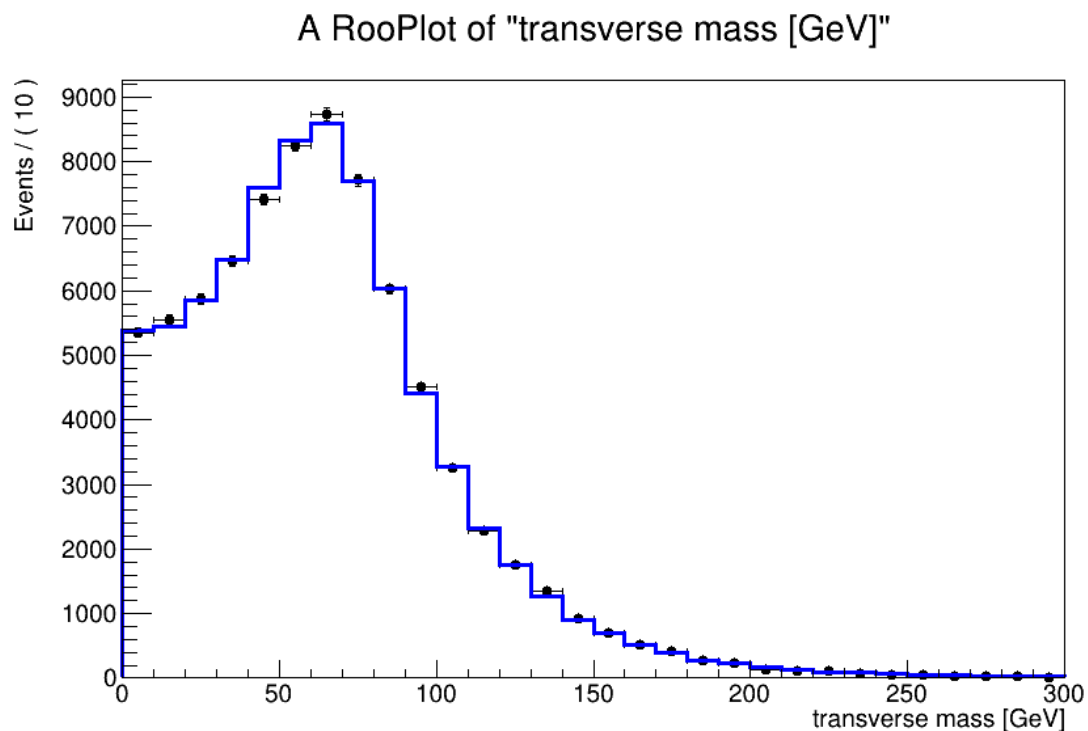
$$\text{Data}(m_T) = N_{WJ} * P_{WJ}(m_T) + N_{DY} * P_{DY}(m_T) + N_{QCD} * P_{QCD}(m_T) + \dots$$

όπου N_{WJ} ο αριθμός των events στα οποία έχουμε W και jets στην τελική κατάσταση. Ομοίως και για τις υπόλοιπες παραμέτρους. Η P_{WJ} είναι η πυκνότητα πιθανότητας. Προφανώς θα πρέπει να ισχύει ότι $P_{WJ} + P_{DY} + P_{QCD} + \dots = 1$ από τη στατιστική.

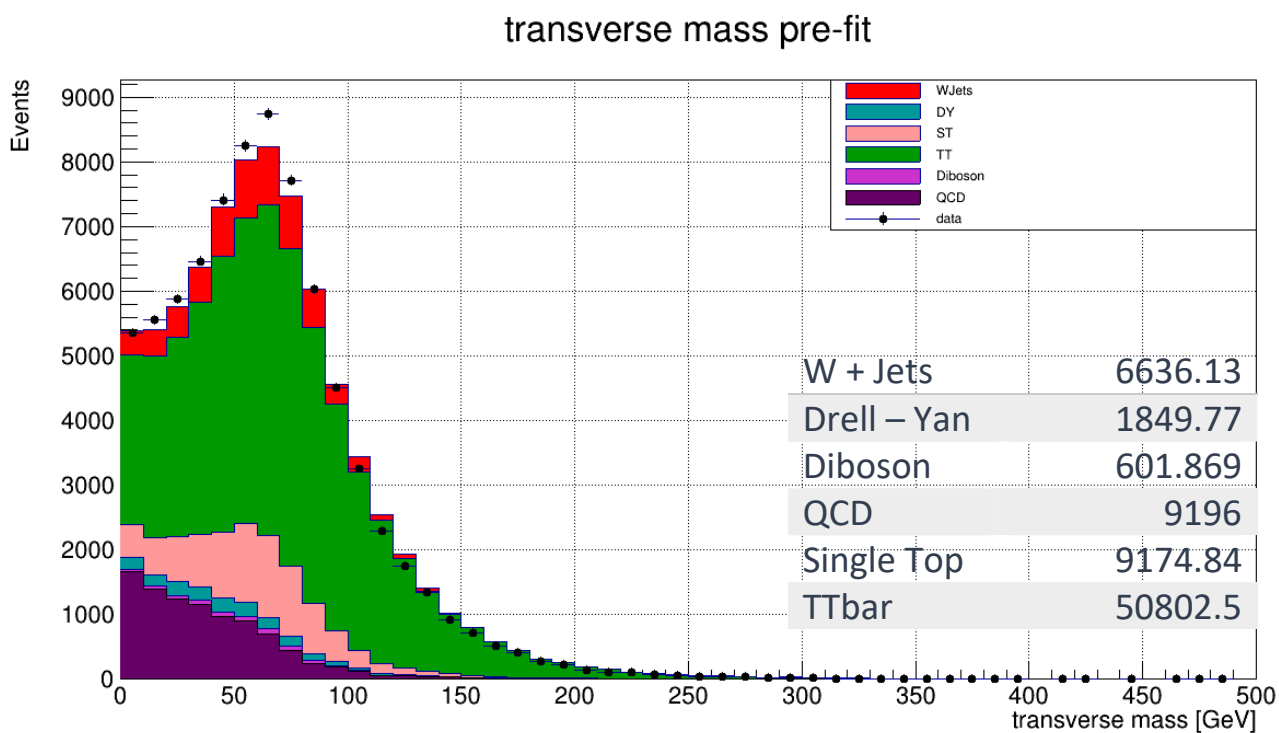
Ελαχιστοποιώντας την εξίσωση του μοντέλου Data υπολογίζουμε τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρων N . Αυτή η καλείται μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (Method of maximum likelihood). Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας επιλέγει το σύνολο των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου που μεγιστοποιεί την συνάρτηση πιθανοφάνειας.

Τα αποτελέσματα του fit, δηλαδή οι νέες τιμές των παραμέτρων καθώς και τα σφάλματά τους αντικατοπτρίζονται στα RooRealVar objects τα οποία αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους της σύνθετης PDF. Η καμπύλη της PDF αυτόματα κανονικοποιείται στον αριθμό των events του συνόλου των δεδομένων.

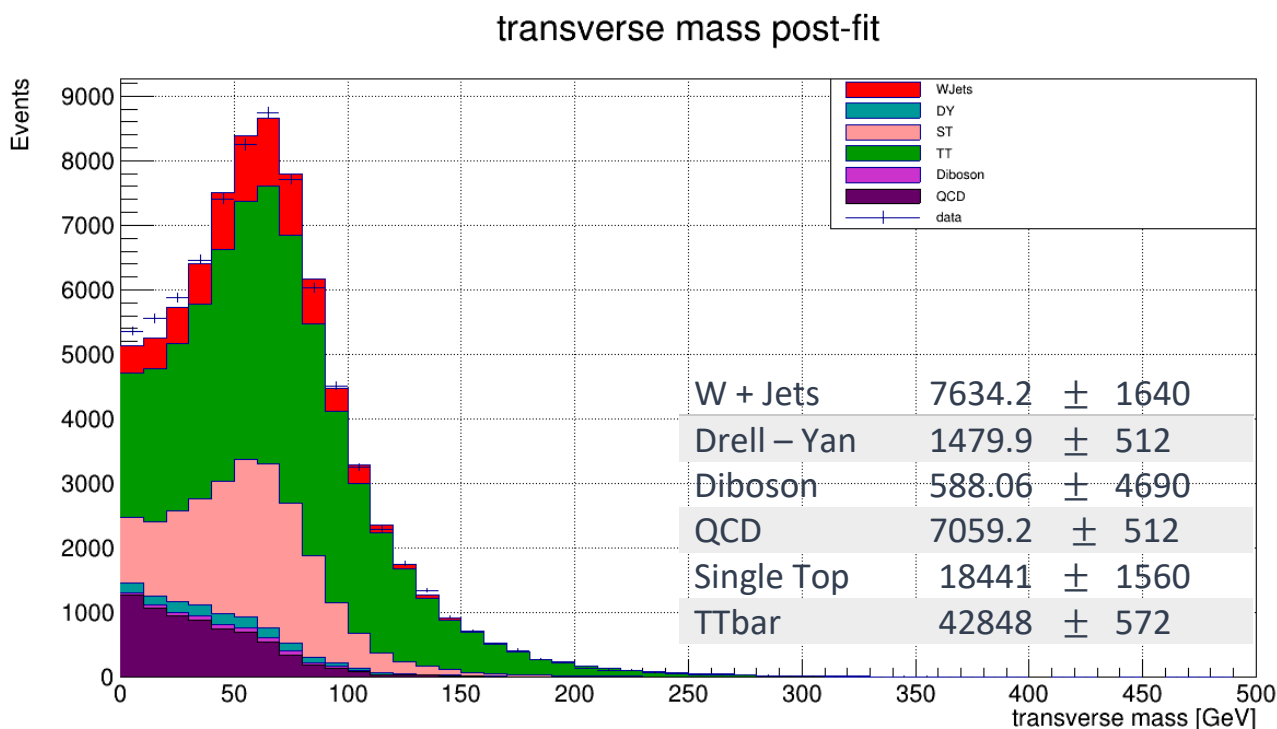
3.8 Αποτελέσματα pre – fit , post – fit



Σχήμα 3.6 RooPlot της transverse mass που είναι ανακατασκευασμένη από τη met και το lepton



Σχήμα 3.3 Hstacked ιστόγραμμα της μεταβλητής lMetMT pre-fit



Σχήμα 3.4 Hstacked ιστόγραμμα της μεταβλητής $IMetMT$ post-fit. Τα σχήματα των κατανομών των QCD events προκύπτουν από τη διαφορά ανάμεσα στα data samples και το άθροισμα των υπολοίπων προσομοιωμένων backgrounds.

3.9 Υπολογισμός ενεργού διατομής

Η ενεργός διατομή σ αποτελεί ένα μέτρο της πιθανότητας εμφάνισης ενός συμβάντος. Μονάδα μέτρησης της ενεργού διατομής είναι το $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$. Το μέτρο της ενεργού διατομής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$N_{\text{events/sec}} = \text{Luminosity} \cdot \text{Cross Section}$$

$$N = L \cdot \sigma,$$

όπου N ο αριθμός των events και L η φωτεινότητα (Luminosity)

Στην ανάλυσή μας, μας ενδιαφέρει η ενεργός διατομή για την $Wb\bar{b}$ διεργασία δηλαδή η διεργασία κατά την οποία στην τελική κατάσταση έχουμε ένα W μποζόνιο σε συνδυασμό με δύο b κουάρκς.

Θεωρητική τιμή της ενεργού διατομής :

$$\sigma = \frac{N_{WJ\text{-prefit}}}{L} = \frac{6636.13}{35.922} = 184.74 \text{ fb}$$

Πειραματική τιμή της ενεργού διατομής :

$$\sigma = \frac{N_{WJ\text{-postfit}}}{L} = \frac{7634.2}{35.922} = 212.52 \pm 45.65 \text{ fb}$$

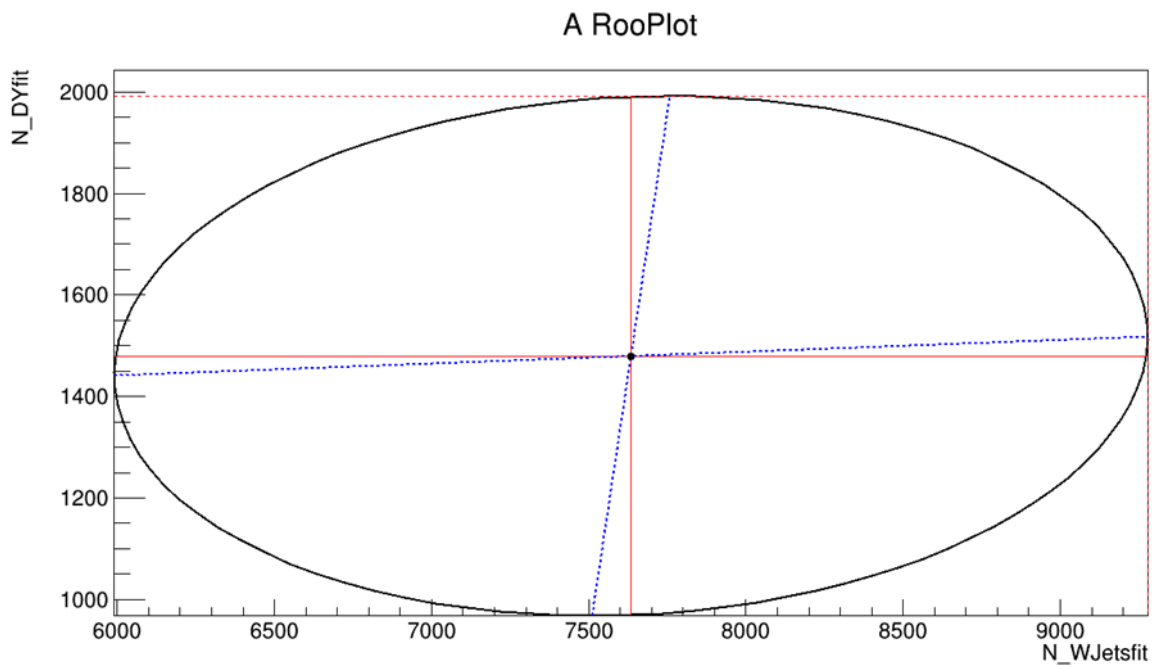
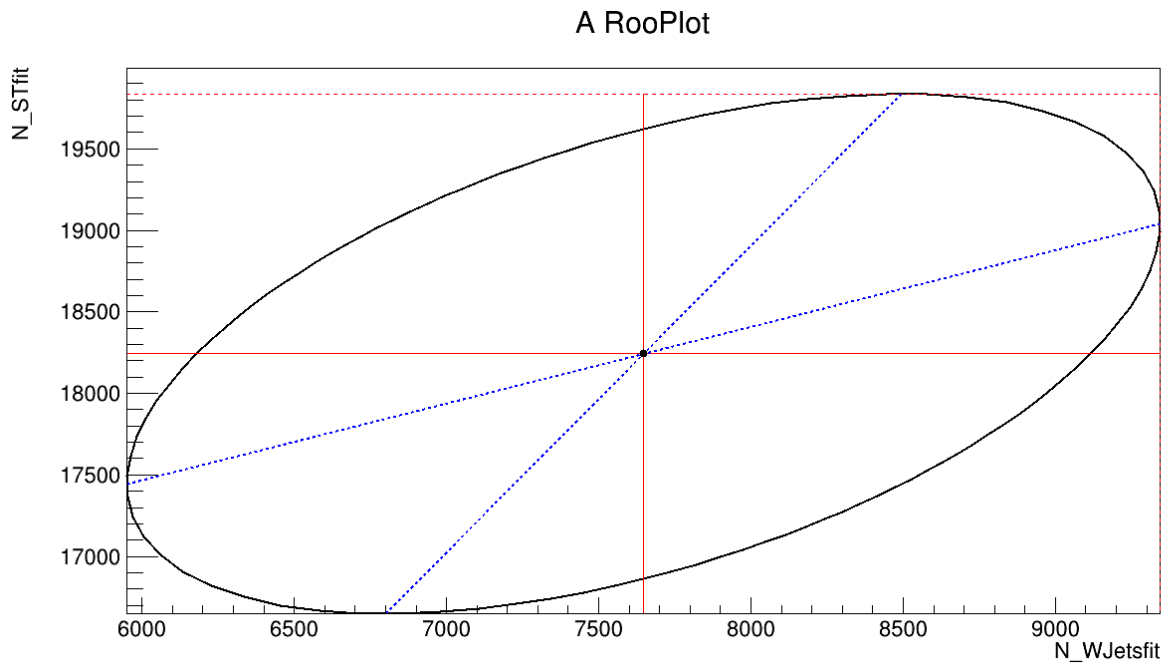
3.10 Συσχέτιση μεταξύ του σήματος και του υποβάθρου

Η συσχέτιση (correlation) είναι μία στατιστική τεχνική βάσει της οποίας μπορούμε να εξετάσουμε κατά πόσο σχετίζονται μεταξύ τους οι μεταβλητές ενός ζεύγους. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε το συντελεστή συσχέτισης του σήματος με το υπόβαθρο. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι ένας αριθμός ο οποίος κυμαίνεται από -1 έως +1. Όσο πιο κοντά είναι στο -1 ή στο +1 τόσο πιο στενά σχετίζονται οι δύο μεταβλητές. Εάν ο συντελεστής συσχέτισης είναι κοντά στο 0 σημαίνει πως δεν υπάρχει σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

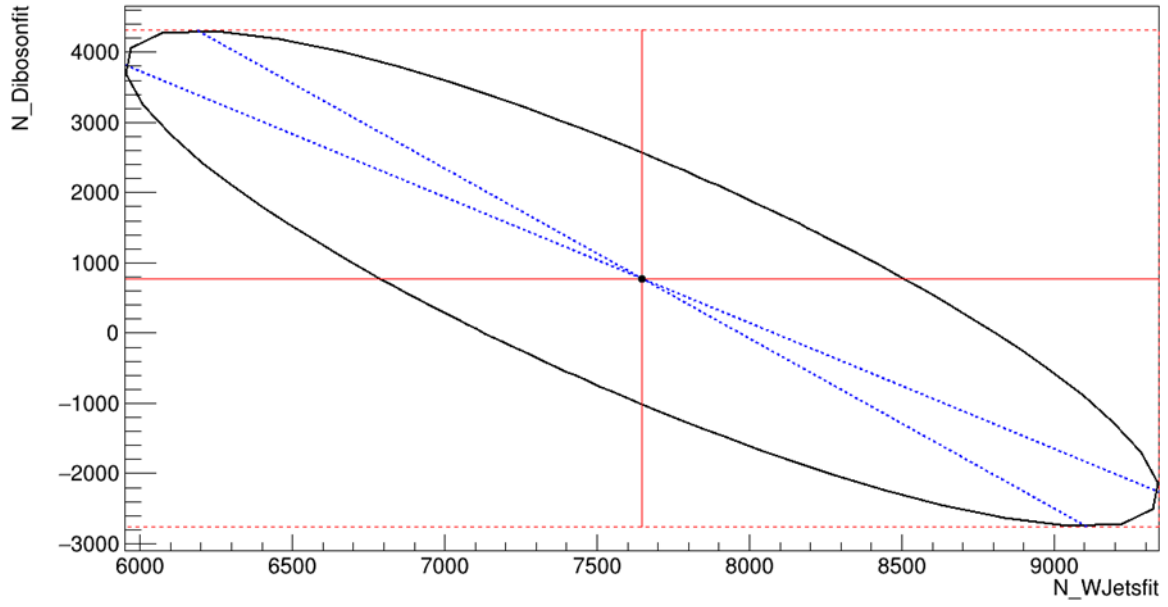
Correlation between signal and bkg

WJetsfit - DYfit	0.0755011
WJetsfit - TTfit	0.271025
WJetsfit - STfit	0.558797
WJetsfit - Dibosonfit	-0.876295
WJetsfit - QCDfit	0.713737

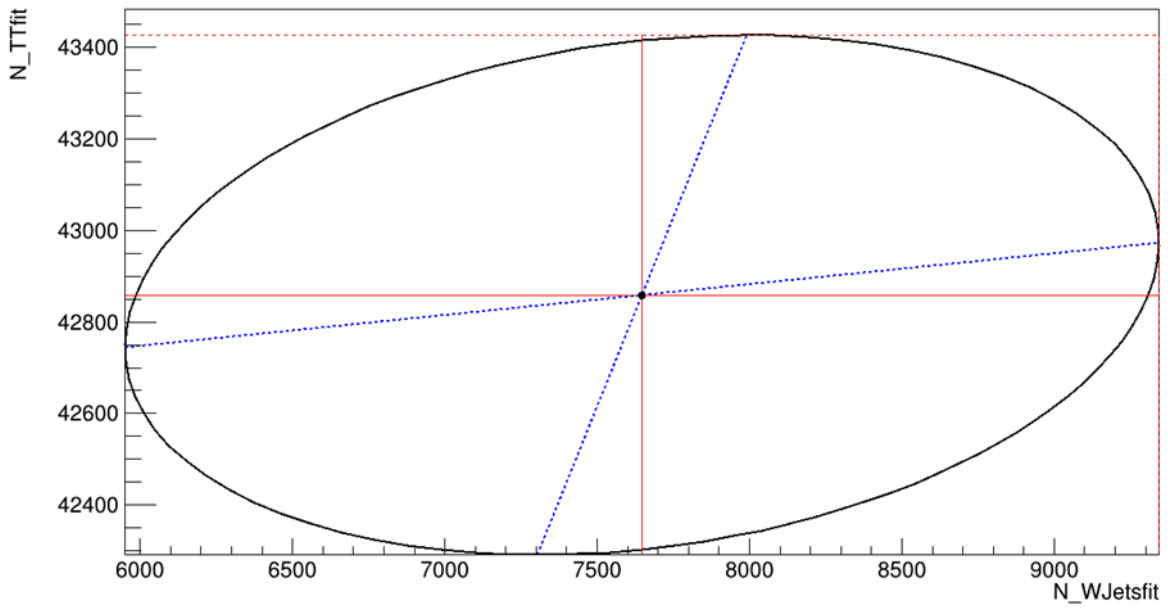
Ακολουθούν τα διαγράμματα συσχέτισης της $W + bb$ διεργασίας σε σχέση με το υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από τις διεργασίες Drell – Yan, QCD, Diboson, Single Top και $T\bar{T}$. Η κλίση της ευθείας ισούται με τον συντελεστή συσχέτισης.

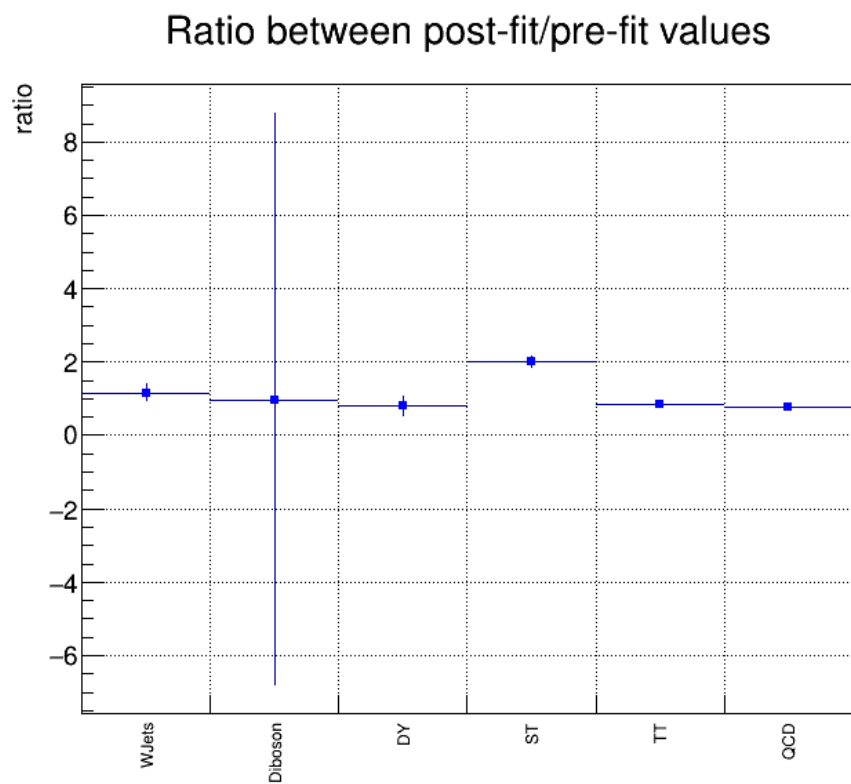
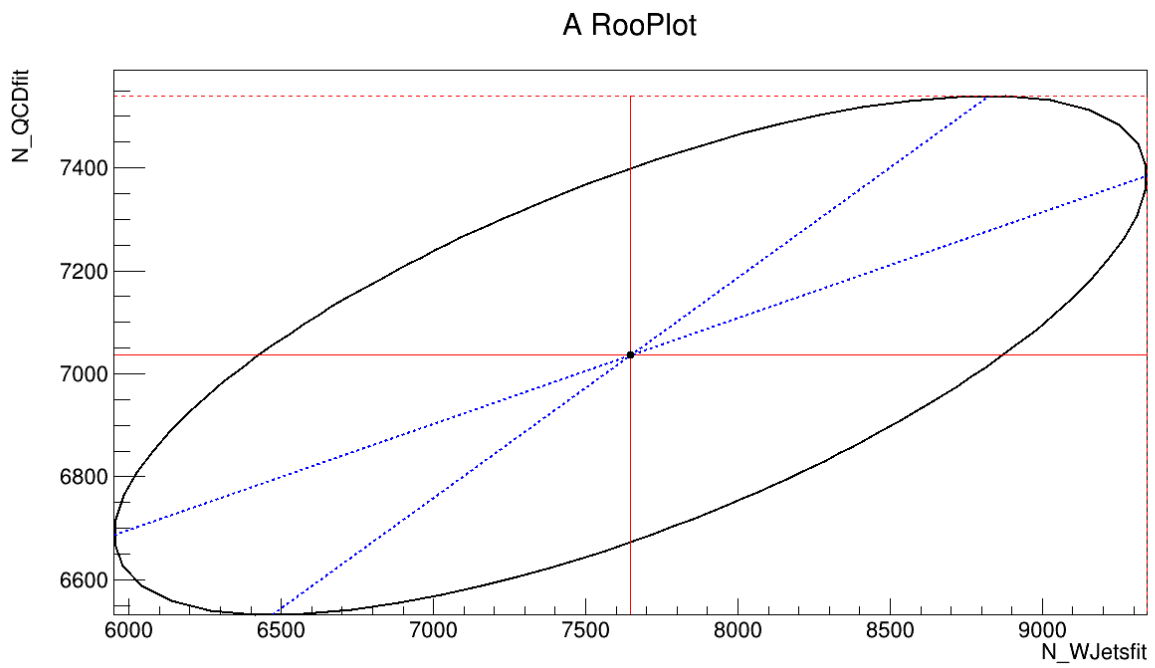


A RooPlot



A RooPlot





Σχήμα 3.7 Ratio ανάμεσα στις pre – fit και post – fit τιμές

Στο ιστόγραμμα του σχήματος 3.7 φαίνεται πόσο κοντά είναι οι pre – fit τιμές στις post – fit.

Κεφάλαιο 4

Σύνοψη - Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος ήταν η μέτρηση της ενεργού διατομής της $W + b\bar{b}$ διεργασίας με σκοπό τη σύγκρισή της με την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή. Η προσαρμογή στα δεδομένα πραγματοποιήθηκε μέσω του RooFit με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood method). Παρατηρούμε πως η πειραματική τιμή της ενεργού διατομής προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή μέσα στα πλαίσια των σφαλμάτων.

Παράρτημα

Ακολούθως περιγράφεται ο κώδικας με τον οποίο πραγματοποιήθηκε το fit και ακολούθως ο κώδικας με τα hstacked ιστογράμματα.

```
void fit1()
{
    TString dir("/home/pella/WbbAnalysisSamples/");
    const int N = 25;
    TString FILENAME[N] = {
        "DYJetsToLL_M-50_HT-70to100_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-100to200_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-200to400_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-400to600_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-600to800_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-800to1200_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-1200to2500_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-2500toInf_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "ST_s-channel_4f_inclusiveDecays_13TeV-amcatnlo-pythia8",
        "ST_t-channel_antitop_4f_inclusiveDecays_13TeV-powhegV2-madspin-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_t-channel_top_4f_inclusiveDecays_13TeV-powhegV2-madspin-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_tW_antitop_5f_inclusiveDecays_13TeV-powheg-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_tW_top_5f_inclusiveDecays_13TeV-powheg-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-70To100_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-100To200_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-200To400_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-400To600_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-600To800_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-800To1200_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-1200To2500_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-2500ToInf_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WW_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8",
        "WZ_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8",
        "ZZ_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8"
```

```

};

float XSEC[N] =
{169.9,147.4,40.99,5.678,1.367,0.6304,0.1514,0.003565,10.32,80.95,136.02,35.6,3
5.6,832,1353,1346,359.7,48.91,12.05,5.501,1.329,0.03216,115,47.13,16.523};

TFile *inf[N],*inf_flat[N];
TH1F *h[N];
//const float LUMI = 35922.;

for (int sample = 0; sample < N; sample++){
    cout<<FILENAME[sample]<<endl;
    inf[sample] =
TFile::Open(dir+"h_"+FILENAME[sample]+".root");//reads each histo file from
each sample
    inf_flat[sample] =
TFile::Open(dir+"flatTree_"+FILENAME[sample]+".root");//reads each sample

    h[sample] = (TH1F*)inf[sample]->Get("lMetMT");
    //h[sample]->Rebin(10);

    float norm = ((TH1F*)inf_flat[sample]-
>Get("eventCounter/GenEventWeight"))-> GetSumOfWeights();

    h[sample]-> Sumw2();// store the sum of squares of weights

    h[sample]-> Scale(XSEC[sample]/norm);

    inf_flat[sample]->Close();
}

TFile *fdata = TFile::Open("h_SingleMuon.root");
TH1F *h_data = (TH1F*)fdata->Get("lMetMT");

TFile *f = TFile::Open("Histo_SingleMuon.root");
TH1F *h_QCD = (TH1F*)f->Get("vj/h_lMetMT_MuNonIso");

h_QCD->Rebin(10);

// One histogram for each process. We have 6 processes.

TH1F *h_DY = (TH1F*)h[0]->Clone("DY");
h_DY -> Add(h[1]);
h_DY -> Add(h[2]);
h_DY -> Add(h[3]);
h_DY -> Add(h[4]);
h_DY -> Add(h[5]);
h_DY -> Add(h[6]);
h_DY -> Add(h[7]);

TH1F *h_ST = (TH1F*)h[8]->Clone("ST");
h_ST -> Add(h[9]);
h_ST -> Add(h[10]);
h_ST -> Add(h[11]);
h_ST -> Add(h[12]);

TH1F *h_TT = (TH1F*)h[13]->Clone("TT");

```

```

TH1F *h_WJets = (TH1F*)h[14]->Clone("WJets");
h_WJets -> Add(h[15]);
h_WJets -> Add(h[16]);
h_WJets -> Add(h[17]);
h_WJets -> Add(h[18]);
h_WJets -> Add(h[19]);
h_WJets -> Add(h[20]);
h_WJets -> Add(h[21]);

TH1F *h_Diboson = (TH1F*)h[22]->Clone("Diboson");
h_Diboson -> Add(h[23]);
h_Diboson -> Add(h[24]);

for (int sample = 0; sample < N; sample++){

    inf[sample]->Close();

}

TCanvas*can = new TCanvas("can","can",900,600);
gStyle->SetOptStat(0);
//can->SetGrid();

gPad->SetLogy();

h_WJets->SetMaximum(50);
h_WJets->GetXaxis()->SetLimits(0, 600);

h_WJets->Draw("hist");
h_WJets->SetLineColor(kRed);
h_WJets->GetXaxis()->SetTitle("mT [GeV]");

h_DY ->Draw("hist SAME");
h_DY->SetLineColor(kCyan+2);

h_TT ->Draw("hist SAME");
h_TT->SetLineColor(kGreen+2);

h_ST ->Draw("hist SAME");
h_ST->SetLineColor(kRed-9);

h_Diboson->Draw("hist SAME");
h_Diboson->SetLineColor(kBlue+2);

h_QCD ->Draw("hist SAME");
h_QCD ->SetLineColor(kMagenta+3);

TLegend *leg = new TLegend(0.6,0.7,0.9,0.9);

leg->AddEntry(h_WJets,"WJets","1");
leg->AddEntry(h_DY,"DY","1");
leg->AddEntry(h_ST,"ST","1");
leg->AddEntry(h_TT,"TT","1");
leg->AddEntry(h_Diboson,"Diboson","1");
leg->AddEntry(h_QCD,"QCD","1");

```

```

leg->Draw();

//Prepare the RooFit ingredients, make the fit

RooRealVar *x = new RooRealVar("mT[GeV]","mT[GeV]",0,300);

RooDataHist *data = new
RooDataHist("data","data",RooArgList(*x),h_data);

RooDataHist *WJetsRooHist = new
RooDataHist("WJetsRooHist","WJetsRooHist",RooArgList(*x),h_WJets);
RooDataHist *DYRooHist = new
RooDataHist("DYRooHist","DYRooHist",RooArgList(*x),h_DY);
RooDataHist *TTRooHist = new
RooDataHist("TTRooHist","TTRooHist",RooArgList(*x),h_TT);
RooDataHist *STRooHist = new
RooDataHist("STRooHist","STRooHist",RooArgList(*x),h_ST);
RooDataHist *DibosonRooHist = new
RooDataHist("DibosonRooHist","DibosonRooHist",RooArgList(*x),h_Diboson);
RooDataHist *QCDRooHist = new
RooDataHist("QCDRooHist","QCDRooHist",RooArgList(*x),h_QCD);

RooHistPdf *WJetsPdf = new
RooHistPdf("WJetsPdf","WJetsPdf",RooArgList(*x),*WJetsRooHist,0);
RooHistPdf *DYPdf = new
RooHistPdf("DYPdf","DYPdf",RooArgList(*x),*DYRooHist,0);
RooHistPdf *TTPdf = new
RooHistPdf("TTPdf","TTPdf",RooArgList(*x),*TTRooHist,0);
RooHistPdf *STPdf = new
RooHistPdf("STPdf","STPdf",RooArgList(*x),*STRooHist,0);
RooHistPdf *DibosonPdf = new
RooHistPdf("DibosonPdf","DibosonPdf",RooArgList(*x),*DibosonRooHist,0);
RooHistPdf *QCDPdf = new
RooHistPdf("QCDPdf","QCDPdf",RooArgList(*x),*QCDRooHist,0);

RooRealVar N_WJetsfit("N_WJetsfit","N_WJetsfit",100,0.,100000);
RooRealVar N_DYfit("N_DYfit","N_DYfit",100,0.,100000);
RooRealVar N_TTfit("N_TTfit","N_TTfit",100,0.,100000);
RooRealVar N_STfit("N_STfit","N_STfit",100,0.,100000);
RooRealVar N_Dibosonfit("N_Dibosonfit","N_Dibosonfit",100,0.,100000);
RooRealVar N_QCDfit("N_QCDfit","N_QCDfit",100,0.,100000);

RooAddPdf *model = 0;
model = new
RooAddPdf("model","model",RooArgList(*WJetsPdf,*DYPdf,*TTPdf,*STPdf,*Dib
osonPdf,*QCDPdf),RooArgList(N_WJetsfit,N_DYfit,N_TTfit,N_STfit,N_Dibosonf
it,N_QCDfit));

RooFitResult *result = model->fitTo(*data, RooFit::Save());
result->Print();

cout<<"Correlation between N_WJetsfit and N_DYfit is "<<result-
>correlation(N_WJetsfit,N_DYfit)<<endl;
cout<<"Correlation between N_WJetsfit and N_TTfit is "<<result-
>correlation(N_WJetsfit,N_TTfit)<<endl;

```

```
    cout<<"Correlation between N_WJetsfit and N_STfit is      "<<result-  
>correlation(N_WJetsfit,N_STfit)<<endl;  
    cout<<"Correlation between N_WJetsfit and N_Dibosonfit is  "<<result-  
>correlation(N_WJetsfit,N_Dibosonfit)<<endl;  
    cout<<"Correlation between N_WJetsfit and N_QCDfit is      "<<result-  
>correlation(N_WJetsfit,N_QCDfit)<<endl;
```

```
//Visualize the fit
```

```
TCanvas *can1 = new TCanvas("can1","can1",900,600);  
RooPlot* xframe = x->frame();  
data->plotOn(xframe);  
model->plotOn(xframe);  
xframe->Draw();
```

```
}
```



```

void hstackfit1(bool USEFIT)
{
    TString dir("/home/pella/WbbAnalysisSamples/");
    const int N = 25;
    const float LUMI = 35922.;
    const double N_DYfit = 0.;
    const double N_Dibosonfit = 1264.;
    const double N_QCDfit = 7479.6;
    const double N_STfit = 19467.;
    const double N_TTfit = 42995.;
    const double N_WJetsfit = 6850.8;

    TString FILENAME[N] = {
        "DYJetsToLL_M-50_HT-70to100_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-100to200_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-200to400_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-400to600_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-600to800_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-800to1200_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-1200to2500_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "DYJetsToLL_M-50_HT-2500toInf_TuneCUETP8M1_13TeV-
madgraphMLM-pythia8",
        "ST_s-channel_4f_InclusiveDecays_13TeV-amcatnlo-pythia8",
        "ST_t-channel_antitop_4f_inclusiveDecays_13TeV-powhegV2-madspin-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_t-channel_top_4f_inclusiveDecays_13TeV-powhegV2-madspin-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_tW_antitop_5f_inclusiveDecays_13TeV-powheg-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "ST_tW_top_5f_inclusiveDecays_13TeV-powheg-
pythia8_TuneCUETP8M1",
        "TT_TuneCUETP8M2T4_13TeV-powheg-pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-70To100_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-100To200_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-200To400_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-400To600_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-600To800_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-800To1200_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-1200To2500_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WJetsToLNu_HT-2500ToInf_TuneCUETP8M1_13TeV-madgraphMLM-
pythia8",
        "WW_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8",
        "WZ_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8",
        "ZZ_TuneCUETP8M1_13TeV-pythia8"
    }
}

```

```

};

float XSEC[N] =
{169.9,147.4,40.99,5.678,1.367,0.6304,0.1514,0.003565,10.32,80.95,136.02,35.6,3
5.6,832,1353,1346,359.7,48.91,12.05,5.501,1.329,0.03216,115,47.13,16.523};

TFile *inf[N],*inf_flat[N];
TH1F *h[N];

for (int sample = 0; sample < N; sample++){
    cout<<FILENAME[sample]<<endl;
    inf[sample] =
TFile::Open(dir+"h_"+FILENAME[sample]+".root");//open each histo file from
each sample
    inf_flat[sample] =
TFile::Open(dir+"flatTree_"+FILENAME[sample]+".root");//open each sample
    h[sample] = (TH1F*)inf[sample]->Get("lMetMT");//take the
histogram from the MC's
    //h[sample]->Rebin(10);

    float norm = ((TH1F*)inf_flat[sample]-
>Get("eventCounter/GenEventWeight"))-> GetSumOfWeights();

    h[sample]->Sumw2();

    h[sample]-> Scale(LUMI*XSEC[sample]/norm);

    inf_flat[sample]->Close();
}

TFile *fdata = TFile::Open("h_SingleMuon.root");
TH1F *h_data = (TH1F*)fdata->Get("lMetMT");//take the histogram from
the data

TFile *f = TFile::Open("Histo_SingleMuon.root");
TH1F *h_QCD = (TH1F*)f->Get("vj/h_lMetMT_MuNonIso");

//h_data->Rebin(10);
//h_QCD->Rebin(10);

//One mc histogram for each process
TH1F *h_DY = (TH1F*)h[0]->Clone("DY");
h_DY -> Add(h[1]);
h_DY -> Add(h[2]);
h_DY -> Add(h[3]);
h_DY -> Add(h[4]);
h_DY -> Add(h[5]);
h_DY -> Add(h[6]);
h_DY -> Add(h[7]);

TH1F *h_ST = (TH1F*)h[8]->Clone("ST");
h_ST -> Add(h[9]);
h_ST -> Add(h[10]);
h_ST -> Add(h[11]);
h_ST -> Add(h[12]);

TH1F *h_TT = (TH1F*)h[13]->Clone("TT");

```

```

TH1F *h_WJets = (TH1F*)h[14]->Clone("WJets");
h_WJets -> Add(h[15]);
h_WJets -> Add(h[16]);
h_WJets -> Add(h[17]);
h_WJets -> Add(h[18]);
h_WJets -> Add(h[19]);
h_WJets -> Add(h[20]);
h_WJets -> Add(h[21]);

TH1F *h_Diboson = (TH1F*)h[22]->Clone("Diboson");
h_Diboson -> Add(h[23]);
h_Diboson -> Add(h[24]);

float n_data = h_data->Integral();//number of events pre-fit
float n_TT = h_TT->Integral();
float n_DY = h_DY->Integral();
float n_WJets = h_WJets->Integral();
float n_Diboson = h_Diboson->Integral();
float n_ST = h_ST->Integral();

const int n_qcd = n_data-n_TT-n_DY-n_WJets-n_Diboson-n_ST;

//h_DY->Scale(h_DY->Integral());
//h_Diboson->Scale(h_Diboson->Integral());
h_QCD->Scale(n_qcd/h_QCD->Integral());
//h_ST->Scale(h_ST->Integral());
//h_TT->Scale(h_TT->Integral());
//h_WJets->Scale(h_WJets->Integral());

cout<<"WJetspre-fit "<<h_WJets->Integral()<<endl;
cout<<"Dibosonpre-fit "<<h_Diboson->Integral()<<endl;
cout<<"DYpre-fit "<<h_DY->Integral()<<endl;
cout<<"STpre-fit "<<h_ST->Integral()<<endl;
cout<<"TTpre-fit "<<h_TT->Integral()<<endl;
cout<<"QCDpre-fit "<<h_QCD->Integral()<<endl;

for (int sample = 0; sample < N; sample++){

    inf[sample]->Close();

}

if(USEFIT){
    h_QCD->Scale(N_QCDfit/h_QCD->Integral());
    h_DY->Scale(N_DYfit/h_DY->Integral());
    h_TT->Scale(N_TTfit/h_TT->Integral());
    h_WJets->Scale(N_WJetsfit/h_WJets->Integral());
    h_ST->Scale(N_STfit/h_ST->Integral());
    h_Diboson->Scale(N_Dibosonfit/h_Diboson->Integral());
}

cout<<"WJets "<<h_WJets->Integral()<<endl;
cout<<"Diboson "<<h_Diboson->Integral()<<endl;
cout<<"DY "<<h_DY->Integral()<<endl;
cout<<"ST "<<h_ST->Integral()<<endl;
cout<<"TT "<<h_TT->Integral()<<endl;
cout<<"QCD "<<h_QCD->Integral()<<endl;

```

```

TCanvas*can = new TCanvas("can","can",900,600);
gStyle->SetOptStat(0);
can->SetGrid();

//gPad->SetLogy();

//hstack

THStack *hs = new THStack("hs","");

h_QCD->SetFillColor(kMagenta+3);
hs->Add(h_QCD);

h_Diboson->SetFillColor(kMagenta-3);
hs->Add(h_Diboson);

h_DY->SetFillColor(kCyan+2);
hs->Add(h_DY);

h_ST->SetFillColor(kRed-9);
hs->Add(h_ST);

h_TT->SetFillColor(kGreen+2);
hs->Add(h_TT);

h_WJets->SetFillColor(kRed);
hs->Add(h_WJets);

//hs->SetMaximum(30);

h_data->Draw("E");
hs->Draw("same hist");
h_data->Draw("same E");

h_data->GetXaxis()->SetTitle("mT [GeV]");
//h_data->GetYaxis()->SetTitle("Events");
//h_data->GetXaxis()->CenterTitle();
//h_data->GetYaxis()->CenterTitle();
can->Modified();

TLegend *leg = new TLegend(0.6,0.7,0.9,0.9);

leg->AddEntry(h_WJets,"WJets","f");
leg->AddEntry(h_DY,"DY","f");
leg->AddEntry(h_ST,"ST","f");
leg->AddEntry(h_TT,"TT","f");
leg->AddEntry(h_Diboson,"Diboson","f");
leg->AddEntry(h_QCD,"QCD","f");
leg->Draw();

float eWJetsfit = 1920.;

```

```

float eDibosonfit = 3250.;
float eDYfit = 0.;
float eSTfit = 1760.;
float eTTfit = 576.;
float eQCDfit = 485.;

TH1F *ratio = new TH1F("ratio","ratio",6,0,6);

ratio->SetBinContent(1,N_WJetsfit/n_WJets);
ratio->SetBinError(1, eWJetsfit/n_WJets);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(1, "WJets");

ratio->SetBinContent(2,N_Dibosonfit/n_Diboson);
ratio->SetBinError(2, eDibosonfit/n_Diboson);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(2, "Diboson");

ratio->SetBinContent(3,N_DYfit/n_DY);
ratio->SetBinError(3, eDYfit/n_DY);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(3, "DY");

ratio->SetBinContent(4,N_STfit/n_ST);
ratio->SetBinError(4, eSTfit/n_ST);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(4, "ST");

ratio->SetBinContent(5,N_TTfit/n_TT);
ratio->SetBinError(5, eTTfit/n_TT);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(5, "TT");

ratio->SetBinContent(6,N_QCDfit/n_qcd);
ratio->SetBinError(6, eQCDfit/n_qcd);
ratio->GetXaxis()->SetBinLabel(6, "QCD");

ratio->LabelsOption("v");
ratio->SetStats(0);
ratio->SetTitle("Ratio between post-fit/pre-fit values; ; ratio");
ratio->SetMarkerStyle(21);
ratio->SetMarkerColor(4);
ratio->SetMarkerSize(0.8);
TCanvas *c = new TCanvas("c", "ratio", 700, 600);
c->SetGrid();
ratio->Draw("ep");
}

```

Βιβλιογραφία

- [1] Εισαγωγή στη φυσική Υψηλών Ενεργειών, Donald H. Perkins
- [2] Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, Martinus Veltman
- [3] Particle Physics, B.R. Martin & G. Shaw
- [4] Introduction to Elementary Particles, David Griffiths
- [5] SUSY Search in Photon(s)+jets+MET final state with the Jet-Gamma Balance method in CMS at the LHC and development of instrumentation for the LHC experiments, Phd thesis, Eleni V. Ntomari
- [6] Tracker Detector <http://cms.web.cern.ch/news/tracker-detector>
- [7] “Μελέτη Διαφορικής Ενεργού Διατομής της παραγωγής ζεύγους top-antitop quark στον ανιχνευτή CMS”, Γεώργιος Μπάκας, Διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2018
- [8] <http://hypatia.phys.uoa.gr/applet/el/help.html>
- [9] Missing transverse energy performance of the CMS detector, The CMS collaboration, <https://arxiv.org/pdf/1106.5048.pdf>
- [10] “Έλεγχος για νέα φυσική με τελικές καταστάσεις φωτονίων και εγκάρσιας Ελλείπουσας Ενέργειας στο πείραμα CMS”, Γαρυφαλλιά Πασπαλάκη, Διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017
- [11] CERN, Root data analysis framework <https://root.cern.ch/>
- [12] Measurement of the production cross section for a W boson and two b jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, Thomas Perry, Jelena Luetic, Andrea Schizzi, Maria Cepeda, Alexander Savin, Isobel Ojalvo, Simon de Visscher, Giuseppe Della Ricca, Vuko Brigljevic, Michele de Gruttola, and Philippe Gras, 11 September 2015
- [13] The RooFit toolkit for data modeling, W. Verkerke University of California Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106, USA D. Kirkby University of California Irvine, Irvine CA 92697, USA
- [14] Triggering and data acquisition , <http://cms.web.cern.ch/detector/triggering-and-data-acquisition>