Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τμήμα Φυσικής – Τομέας Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών Σωματιδίων



Διπλωματική εργασία Μ.Δ.Ε.:

«Χρήση της μεθόδου των Boosted Decision Trees στην αναβάθμιση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης (run 2)»

Γιώργος Καραθανάσης

Α.Μ. 201218

e-mail: georgios.karathanasis@cern.ch

Επιβλέπων: Καθηγητής Παρασκευάς Σφήκας

Τριμελής: Καθηγητής Παρασκευάς Σφήκας, Καθηγήτρια Χριστίνα Κουρκουμέλη, Καθηγήτρια Νίκη Σαουλίδου

Αθήνα 2015

Περίληψη

Στο CERN γίνονταν συγκρούσεις πρωτονίων σε ενέργειες της τάξεως των 8 TeV. Τα περισσότερα από αυτά τα γεγονότα δεν έχουν κανένα ενδιαφέρων για την Φυσική (pile-up). Δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά του CMS έχουν συγκεκριμένο ρυθμό αποθήκευσης των 100 Hz, πρέπει να διαλέξουμε ορισμένα γεγονότα για αποθήκευση. Αυτή η λειτουργία λέγεται σκανδαλισμός. Το 2013-2014 ο επιταχυντής έκλεισε ώστε να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να φτάσουμε με ασφάλεια την ενέργεια των 13 TeV και σταδιακά και των 14 TeV. Αυτό όμως σε συνδυασμό με την αύξηση της φωτεινότητας αυξάνει τα pile-up γεγονότα που συμβαίνουν ανά σύγκρουση δεσμών. Ο σκανδαλιστής του CMS έχει αναβαθμιστεί αρκετά ώστε να διαχειριστή τον αυξημένο αριθμό των γεγονότων pile-up. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που να απορρίπτει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μη ενδιαφέροντα γεγονότα, με χρήση της μεθόδου BDT. Στο κεφάλαιο 1 περιγράφουμε το LHC και το CMS δίνοντας έμφαση στον σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου και την αναβάθμιση του. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζουμε σύντομα τις ανακαλύψεις του CMS μέχρι στιγμής και πως θα επηρεαστούν οι αναλύσεις από την αύξηση της ενεργείας και της φωτεινότητας. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται το λογισμικό του αναβαθμισμένου σκανδαλιστή που έχει ήδη φτιαχτεί και ορίζονται οι μεταβλητές που βασίζεται η μελέτη. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται το πακέτο TMVA με τις βασικές του επιλογές και τις μεθόδους του. Στο κεφάλαιο 5 εκπαιδεύουμε δύο μεθόδους αναλυτικά, φτάνοντας στην καλύτερη δυνατή εκπαίδευση. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των μεθόδων και τα συγκρίνουμε. Επίσης τα συγκρίνουμε με την σημερινή μέθοδο που χρησιμοποιείται στο CMS.

Περιεχόμενα

Περίληψη 3
1. Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC) 7
1.1 Εισαγωγή 7
1.2 Το Μηχάνημα 7
1.3 Ο ανιχνευτής του CMS 9
1.4 Αδρονικό καλορίμετρο 10
1.5 Σκανδαλιστής πρώτης τάξης μέχρι σήμερα 11
1.6 Η αναβάθμιση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης 11
1.6.1 Απαιτήσεις από την αναβάθμιση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης 11
1.6.2 Επισκόπηση των αναβαθμίσεων του σκανδαλιστή πρώτης τάξης 12
1.6.3 Καλοριμετρικός σκανδαλιστής πρώτης τάξης 13
1.6.4 Μιονικός σκανδαλιστής πρώτης τάξης 14
1.6.5 Παγκόσμιος σκανδαλιστής πρώτης τάξης 15
1.7 Σκοπός της εργασίας 16
2. Επισκόπηση αποτελεσμάτων 18
2.1 Αποτελέσματα του CMS 18
2.2 Αποτελέσματα της ηλεκτρασθενούς 18
2.3 Αποτελέσματα της μελέτης του top 24
2.4 Αποτελέσματα της QCD 27
2.5 Ανακάλυψη του μποζονίου Higgs και παρατήρηση των διασπάσεων του 29
2.5.1 H→γγ 30
2.5.2 H→4l 30
2.5.3 H→WW 31
2.5.4 H→ττ 31
2.5.5 H→bb 32
2.6 Μελέτη των ιδιοτήτων του μποζονίου Higgs και συμβατότητα με το Κ.Π. 32
2.6.1 Μάζα του H 32
2.6.2 Πλάτος του H 33
2.6.3 Ισχύς σήματος 33
2.6.4 Σθένος σύζευξης 34
2.6.5 Μέτρηση του σπιν του Higgs 35
2.7 Υπερσυμμετρία και οι μετρήσεις του CMS 35
2.8 Μελλοντικές αναλύσεις του CMS στα 13 TeV και το σύστημα σκανδαλισμού 37
2.8.1 H→ττ 38
2.8.2 WH→Wbb 39
2.8.3 H→WW 39

2.8.4 Παραγωγή των top squarks 40
2.8.5 Μοντέλα που παραβιάζουν την R-ομοτιμία 41
3. Μελέτη πιδάκων 43
3.1 Πίδακες 43
3.2 Εύρεση αδρονικών πιδάκων 43
3.2.1 Αλγόριθμος εύρεσης πιδάκων του L1 43
3.2.2 Αφαίρεση υποβάθρου 44
3.2.3 Η απόδοση του σκανδαλιστή πιδάκων 45
3.2.4 Η απόδοση του σκανδαλιστή αθροίσματος ενέργειας 46
3.3 Διαχωρισμός πιδάκων 47
3.3.1 Ο αριθμός των πύργων σκανδαλισμού 48
3.3.2 Η ενέργεια του κεντρικού πύργου σκανδαλισμού 49
3.3.3 Εμβαδόν κατειλημμένης επιφανείας πίδακα 49
3.3.4 Μέση τιμή πύργου σκανδαλισμού 51
3.3.5 Άθροισμα τις ενέργειας των πύργων σκανδαλισμού στο τετράγωνο 51
3.4 Μεταβλητές για επαλήθευση 52
3.4.1 Απόκλιση από την μέση τιμή 52
3.4.2 Διαφορά των μεγίστων και των ελαχίστων σε κάθε δακτύλιο 53
3.4.3 Διαφορά των μεγίστων γειτονικών δακτυλίων 54
3.4.4 Ποσοστό απώλειας ενέργειας ανάμεσα στους δακτυλίους 54
4. TMVA 56
4.1 Εισαγωγή 56
4.1.1 Factory 56
4.1.2 Reader 58
4.2 Υπερεκπαίδευση 58
4.3 Προεπεξεργασία 58
4.3.1 Κανονικοποίηση μεταβλητών 59
4.3.2 Αποσυσχέτιση μεταβλητών 59
4.3.3 Αποσυσχέτιση με χρήση της μεθόδου PCA 59
4.3.4 Μετατροπή σε ομοιόμορφη και κανονική κατανομή 60
4.4 Boosting 61
4.4.1 AdaBoost 61
4.4.2 Gradient boost 61
4.4.3 Bagging 62
4.5 Μέθοδοι MVA 62
5. Η εκπαίδευση των μεθόδων 63
5.1 Επιλογή μεθόδων 63

5.2 Likelihood 63
5.2.1 Αποσυσχετισμός 64
5.2.2 Κατασκευή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας 65
5.2.3 Κατασκευή του classifier 66
5.3 Boosted Decision Trees 68
5.3.1 Κατασκευή δέντρου 69
5.3.2 Κατασκευή δάσους 70
5.4 Ανακεφαλαίωση 75
6. Αποτελέσματα 77
6.1 Likelihood 77
6.2 BDT 78
6.4 Σύγκριση των μεθόδων Likelihood και BDT 79
6.5 Σύγκριση με την απλή εφαρμογή τιμών αποκοπών γεγονότων 80
6.6 Επαλήθευση αποτελεσμάτων 81
6.7 Συμπεράσματα 82
7. Βιβλιογραφία 83
Appendix 85
A1. Μέθοδοι 85
1 Rectangular Cuts 85
2 Likelihood 85
3 Probability Density Estimator Range Search(PDERS) 85
4 Multidimensional K-Nearest Neighbor(K-NN) 85
5 H-Matrix Estimator 85
6 Fisher Discriminant 85
7 Function Discriminanat Analysis(FDA) 85
8 Boosted Decision Trees (BDT) 85
9 Artificial Neural Network (ANN) 86
10 Rule-Fit 86
11 Support Vector Machine (SVM) 86

1. Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC)

1.1 Εισαγωγή

Το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής (Κ.Π.) είναι εξαιρετικά εδραιομένο και αδιαμφισβήτητα αποτελεί μία πολύ καλή περιγραφή της φύσης. Έχει επαληθευθεί από πολλά πειράματα σε όλον τον κόσμο. Παρόλα αυτά, έχει επιβεβαιωθεί μόνο μέχρι ενέργειες της τάξης του TeV. Το τι συμβαίνει μετά είναι απολύτως ανεπιβεβαίωτο. Ο πρώτος ρόλος του μεγάλου επιταχυντή αδρονίων, είναι να ρίξει φώς στην διάσπαση της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας, για την οποία ευθύνεται, όπως όλα δείχνουν, ο μηχανισμός Higgs. Ο μηχανισμός Higgs ευθύνεται και για τις μάζες των στοιχειωδών σωματιδίων. Όμως ο σκοπός του LHC δεν είναι μόνο η απλή επιβεβαίωση του Κ.Π. αλλά και η έρευνα για τυχόν νέα φυσική. Επίσης ακόμα και να μην υπάρχει τελική απάντηση στην ύπαρξη ή όχι νέας θεωρίας, είναι πολύ πιθανή η εύρεση ενδείξεων για το προς ποια κατεύθυνση πρέπει να στραφούν μετά οι έρευνες στην φυσική (τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο). Είναι αλήθεια ότι το Κ.Π. έχει αφήσει ανοιχτά αρκετά ερωτήματα, τα οποία ελπίζουμε να απαντηθούν σύντομα. Η ανακάλυψη του μποζονίου Higgs επιτρέπει την μέτρηση μεγεθών, όπως η σύζευξη του Higgs με τα σωματίδια, που μπορούν να μας επιβεβαιώσουν αν πρόκειται για το Higgs στο πλαίσιο του Κ.Π. ή για νέα φυσική. Είναι γεγονός ότι έχουμε έναν πολύ καλό υποψήφιο στα όρια μάζας του Higgs που προβλέπει το Κ.Π. με υπολογισμό των διορθώσεων. Στο κομμάτι της νέας φυσικής δεν έχουμε ακόμα κάποια ένδειξη, όμως με την αναβάθμιση του CMS υπάρχει αισιοδοξία για την εύρεσή της τα επόμενα χρόνια.

1.2 Το Μηχάνημα

Το LHC αποτελείται από 1232 διπολικούς μαγνήτες και κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων που σκοπός τους είναι η επιτάχυνση των πρωτονίων κατά την διέλευση τους[1]. Η ενέργεια των πρωτονίων αυξάνεται τυπικά κατά 0.5MeV/γύρο. Το LHC έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε η ενέργεια της δέσμης των πρωτονίων να φτάσει τα 7 TeV και φωτεινότητα να είναι ίση με $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Αυτή η τιμή της φωτεινότητας αντιστοιχεί σε ένα δισεκατομμύριο ανελαστικές συγκρούσεις το δευτερόλεπτο. Η φωτεινότητα δίνεται από την σχέση:

$$L = \frac{\gamma f k_B N_p^2}{4\pi\varepsilon_n \beta^*} F \tag{1.1}$$

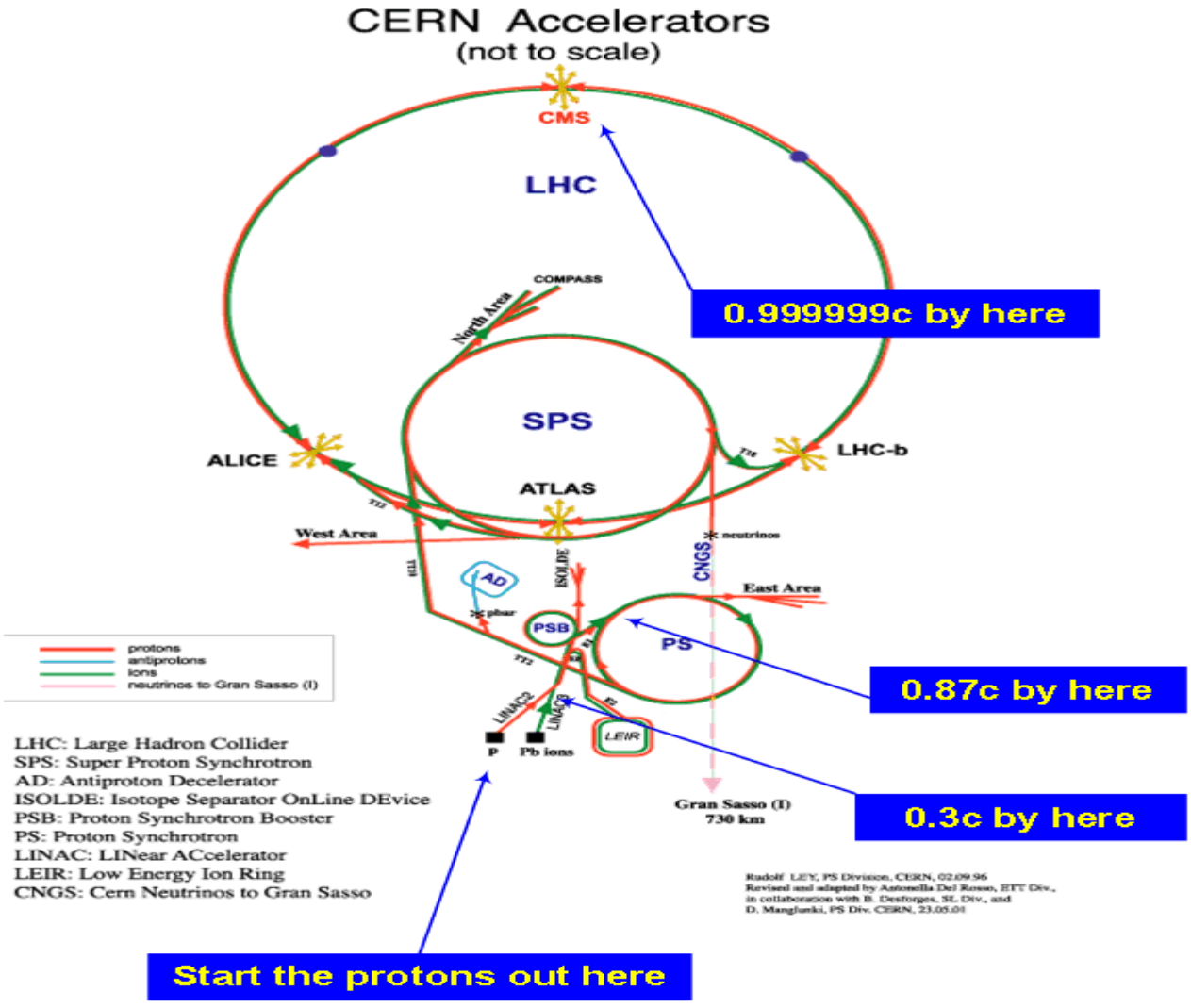
Με γ να είναι ο παράγοντας Lorentz, f η συχνότητα περιστροφής, k_B ο αριθμός των bunches, N_p ο αριθμός των πρωτονίων ανά bunch, ε_n η κανονικοποιημένη εγκάρσια εκπομπή, β^* είναι η συνάρτηση betatron και F η συνάρτηση που εισάγεται για να περιγράψει την γωνία σύγκρουσης.

Οι δέσμες δημιουργούνται στον επιταχυντή Proton Syghrotron (PS) με ενέργειες 26 GeV και έπειτα εισέρχονται στον Super Proton Syghrotron(SPS) όπου επιταχύνονται μέχρι τις ενέργειες των 262 GeV πριν εισαχθούν στον LHC (Εικόνα 1.1). Το κάθε bunch απέχει (χρονικά) από το επόμενο 25 ns. Σε κάθε σημείο του επιταχυντή παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις δέσμες, και για τυχόν αποκλίσεις από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ο LHC αυτήν την στιγμή δεν έχει φτάσει ακόμα στην ενέργεια των 7TeV ανά δέσμη. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της πρώτης μεγάλης διάρκειας απενεργοποίησης (Long Shutdown-LS1) το 2013-2015 γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές για να επιτευχτεί αυτός ο στόχος[2]. Οι αναβαθμίσεις που ήδη έγιναν είναι αρκετές, με τις βελτιώσεις των διασυνδέσεων μεταξύ των μαγνητών να πρωτοστατούν. Επιπροσθέτως έγιναν αρκετές μελέτες για να διασφαλιστεί η αντοχή των μαγνητών στα πολύ ισχυρά πεδία που απαιτεί μία δέσμη ενέργειας ίσης με 6.5TeV. Μετά το πέρας της LS1 το LHC αναμένεται να είναι σε θέση να παρέχει δεδομένα των συγκρούσεων πρωτονίων-πρωτονίων με ενέργεια κέντρου μάζας, τουλάχιστον 13TeV. Με σταδιακή αύξηση της ενέργειας των επιταχυνόμενων πρωτονίων, περιμένουμε να φτάσουμε με ασφάλεια το όριο των 14TeV.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι πιθανές τιμές μεγεθών κατά την λειτουργία του επιταχυντή την επόμενη περίοδο. Να τονίσουμε ότι αν η χρονική απόσταση μεταξύ των bunches των πρωτονίων είναι 50 ns, η φωτεινότητα πρέπει να μειωθεί ανάλογα, ώστε να πετύχουμε μείωση του αριθμού των γεγονότων υποβάθρου (pile-up) σε ανεκτά επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο, είτε για 25 ns, είτε για 50 ns τα γεγονότα υποβάθρου παραμένουν στην τάξη των 50 ανά σύγκρουση δεσμών. Μετά και την δεύτερη μακράς διαρκείας απενεργοποίηση (LS2), που προορίζεται για το 2018 η φωτεινότητα προγραμματίζεται να φτάσει τουλάχιστον την τιμή των $2\times10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Μία πολύ μεγάλη αύξηση της φωτεινότητας μπορεί να επιτευχτεί και μετά την τρίτη (και τελευταία) απενεργοποίηση (LS3) το 2022, όταν και αναμένεται να φτάσει το όριο των $5\times10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Scenario	# bunches	I_p ($\times10^{11}$)	Emittance (μm)	$\mathcal{L}$ (Hz/cm^{2}s)	Pile-up	L (fb^{-1}/year)
25 ns	2760	1.15	3.5	9.2×10^{33}	21	24
25 ns low emit	2320	1.15	1.9	1.6×10^{34}	43	42
50 ns	1380	1.6	2.3	$0.9–1.7 \times 10^{34}$	40–76	45
50 ns low emit	1260	1.6	1.6	2.2×10^{34}	108	–

Πίνακας 1.1 Τα πιθανά σενάρια λειτουργίας του LHC.



Εικόνα 1.1 Σχεδιάγραμμα της διαδρομής των πρωτονίων.

1.3 Ο ανιχνευτής του CMS

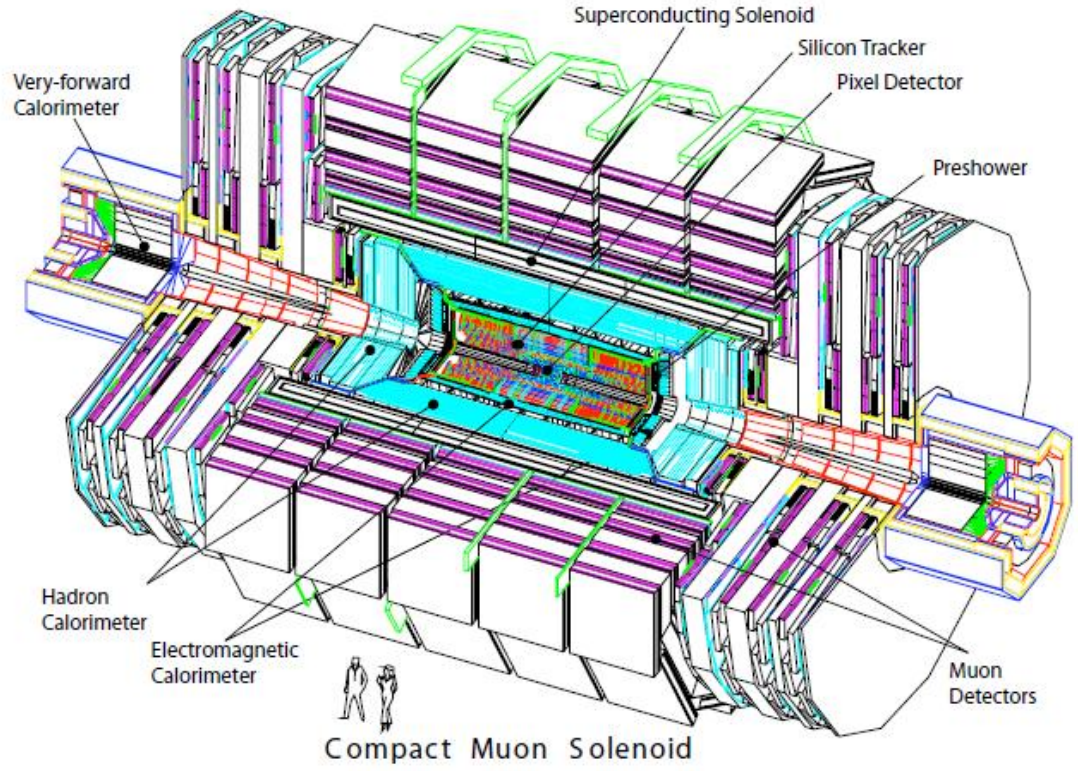
Το πείραμα συμπαγούς σωληνοειδούς μιονίου (Compact Muon Solenoid, CMS) είναι ένα από τα δύο μεγαλύτερα πειράματα γενικής φυσικής του CERN. Ο ανιχνευτής του, έχει σχεδιαστεί με σκοπό να ικανοποιεί τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Υψηλή ανάλυση στην μέτρηση της ορμής φορτισμένων σωματιδίων και αποτελεσματική ανακατασκευή των τροχιών τους στον εσωτερικό ανιχνευτή τροχιών. Χρήση ανιχνευτών εικονοστοιχείου που να επιτρέπουν την αναγνώριση πιδάκων προερχομένων από b quarks.
- Ανίχνευση των μιονίων με καλή ευκρίνεια στην μέτρηση της ορμής για ένα μεγάλο εύρος ορμών στην περιοχή $|\eta| < 2.5$, ακριβής ανάλυση στην μέτρηση μάζας διμιονίων και την ικανότητα να ξεχωρίζει το φορτίο μιονίων με $p < 1TeV$
- Υψηλή ανάλυση στην μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, της μάζας των διφωτονίων και των διηλεκτρωνίων σε ένα μεγάλο γεωμετρικό εύρος. Μέτρηση της κατεύθυνσης των φωτονίων, εύρεση του πρωταρχικού σημείου αλληλεπίδρασης, απόρριψη των π^0
- Ακρίβεια στην μέτρηση της χαμένης ενέργειας ($\not{E}_T$) και της μάζας των αδρονικών διπιδάκων.

Η σύγκρουση πρωτονίων με ενέργεια κέντρου μάζας 14TeV έχει ενεργό διατομή περίπου 100mb. Αυτό αντιστοιχεί σε 10^9 ανελαστικές κρούσεις/δευτερόλεπτο που είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης όλων των δεδομένων που συνδέονται με τόσες κρούσεις. Άρα χρειάζεται να διαχωριστούν τα γεγονότα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από τα υπόλοιπα. Η διαδικασία επιλογής των γεγονότων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον λέγεται σκανδαλισμός. Το σύστημα σκανδαλισμού είναι επιφορτισμένο με την επιλογή και την αποθήκευση των γεγονότων που είναι ενδιαφέροντα για τις αναλύσεις της φυσικής. Εξαιτίας του περιορισμού στον ρυθμό αποθήκευσης των γεγονότων, ο σκανδαλιστής απαιτείται να μειώσει τον αριθμό των γεγονότων από μερικά δισεκατομμύρια γεγονότα ανά δευτερόλεπτο σε περίπου 100 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο, που είναι ο μέγιστος ρυθμός αποθήκευσης. Ο πολύ μικρός χρόνος μεταξύ δύο συγκρούσεων (25ns) απαιτεί την κατασκευή ειδικών συστημάτων σκανδαλισμού και αποθήκευσης. Στην φωτεινότητα που λειτουργούσε το LHC τα τρία πρώτα χρόνια, είχαμε 20 με 25 ανελαστικές συγκρούσεις ταυτόχρονα με αυτήν που μας ενδιαφέρει, δηλαδή μία παραγωγή 1000 φορτισμένων σωματιδίων κάθε 25 ns. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δημιουργείται το πρόβλημα της μη σωστής καταχώρισης των σωματιδίων στην αντίστοιχη αλληλεπίδραση (pile up). Το πρόβλημα χειροτερεύει όταν τα ηλεκτρονικά έχουν μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης από τα 25 ns. Γι΄ αυτό και χρειαζόμαστε ανιχνευτή με πολύ καλή ακρίβεια στην μέτρηση του χρόνου και πολλά διαθέσιμα κανάλια.

Κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του CMS, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην χρήση ενός αρκούντος ισχυρού μαγνητικού πεδίου για την μέτρηση της ορμής των μιονίων. Χρειάζεται ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο για την ακριβή μέτρηση της ορμής των φορτισμένων σωματιδίων, για αυτό τον λόγο η χρήση υπεραγώγιμων μαγνητών κρίθηκε απαραίτητη. Οι διαστάσεις του CMS είναι κυλινδρικές με μήκος 21.6 m και διάμετρο 14.6 m ενώ το βάρος του ανέρχεται περίπου στους 12 500 τόνους (Εικόνα 1.2). Στο εσωτερικό του βρίσκεται ένα σωληνοειδές μήκους 13 m και διαμέτρου 5.9 m, που μπορεί να παράγει μαγνητικό πεδίο έως 4 T. Ο ανιχνευτής αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα ανίχνευσης: τον εσωτερικό ανιχνευτή τροχιάς, το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο, το αδρονικό καλορίμετρο και τους θαλάμους μιονίων. Το ηλεκτρομαγνητικό και το αδρονικό καλορίμετρο καθώς και ο ανιχνευτής τροχιάς είναι εντός του σωληνοειδούς ενώ οι θάλαμοι μιονίων εκτός. Ο ανιχνευτής τροχιάς έχει μήκος 5.8 m και διάμετρο 2 m. Αποτελείται από 10 επίπεδα ανιχνευτών πυριτίου μικρολωρίδας (silicon microstrip) που μας παρέχουν την απαιτούμενη διακριτική ικανότητα και ακρίβεια. Επίπροσθέτως στο σημείο των συγκρούσεων, έχουν τοποθετηθεί τρία επίπεδα ανιχνευτών εικονοκυττάρου (silicon pixel) για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια. Ακριβώς μετά τον ανιχνευτή τροχιών υπάρχει το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους $PbWO_4$ που παράγουν σπινθηρισμούς κατά την διέλευση ιονίζουσας ακτινοβολίας. Οι σπινθηρισμοί ανιχνεύονται είτε από φωτοδιόδους πυριτίου, είτε από φωτοτριώδους κενού, ανάλογα με την

περιοχή του ανιχνευτή που βρίσκονται (barrel ή endcap). Το επόμενο κομμάτι του ανιχνευτή είναι το αδρονικό καλορίμετρο. Το αδρονικό καλορίμετρο αποτελείται από επίπεδα σπινθηριστών και απορροφητών εναλλάξ. Ως απορροφητής χρησιμοποιήθηκε ορείχαλκος επειδή έχει σχετικά μικρό μήκος αλληλεπίδρασης και εύκολα μετατρέπεται σε συγκεκριμένη μορφή. Ειδικά διαμορφωμένα καλώδια συλλέγουν το σήμα από τους σπινθηριστές, οδηγώντας το σε φωτοανιχνευτές (photodetectors). Το τελευταίο κομμάτι του ανιχνευτή βρίσκεται εκτός σωληνοειδούς και δεν είναι άλλο από τους θαλάμους μιονίων. Στο CMS δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το κομμάτι και έτσι έχουμε τριών τεχνολογιών ανιχνευτές: τους θαλάμους ολίσθησης (drift tubes) τους θαλάμους καθοδικού σωλήνα (cathode strip chambers) και τους θαλάμους πλακών αντίστασης (resistive plate chambers).



Εικόνα 1.2 Σχεδιάγραμμα του ανιχνευτή

1.4 Αδρονικό καλορίμετρο

Το αδρονικό καλορίμετρο μετρά την ενέργεια των αδρονίων, δηλαδή των σωματιδίων που αποτελούνται από quarks και gluons. Επίσης συνεισφέρει στην έμμεση μέτρηση των σωματιδίων που διαφεύγουν του ανιχνευτή, όπως τα νετρίνα. Διάφορες θεωρίες της φυσικής πέραν του καθιερωμένου προτύπου προβλέπουν την ύπαρξη σωματιδίων που δεν ανιχνεύονται, για παράδειγμα η υπερσυμμετρία έχει το LSP. Τέτοιες μετρήσεις έχουν ιδιαίτερη σημασία γιατί μπορεί να περιέχουν ενδείξεις νέας φυσικής. Για την ανίχνευση αυτών των σωματιδίων το αδρονικό καλορίμετρο κατασκευάστηκε με τετοιόν τρόπο ώστε να είναι ερμητικά κλειστό και να καλύπτει όσον τον δυνατό μεγαλύτερο γεωμετρικό εύρος, αποκλείοντας έτσι την διαφυγή των σωματιδίων του Κ.Π. (εκτός των νετρίνων) χωρίς να εντοπιστούν. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται στο ελάχιστο τις ανισορροπίες στην συνολική εγκάρσια ενέργεια και ορμή εξαιτίας του Κ.Π. Οι ανισορροπίες ενδέχεται να περιέχουν την πληροφορία για την ύπαρξη νέων σωματιδίων που διαφεύγουν από τον ανιχνευτή.

Για να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ανίχνευση των σωματιδίων του Κ.Π., τα επίπεδα του αδρονικού καλοριμέτρου, κατασκευάστηκαν έτσι ώστε να μην υπάρχουν κενά σε ευθεία από το κέντρο του ανιχνευτή. Το αδρονικό καλορίμετρο του CMS είναι ένα δειγματοληπτικό καλορίμετρο. Η μέτρηση της ενέργειας σε ένα δειγματοληπτικό καλορίμετρο βασίζεται στην εναλλαγή επιπέδων απορροφητών και σπινθηριστών. Ένα

αδρόνιο περνώντας μέσα από τον απορροφητή αλληλεπιδρά μαζί του και παράγει δευτερεύοντα σωματίδια. Αυτά με την σειρά τους παράγουν και άλλα. Στο τέλος έχουμε έναν καταιγισμό σωματιδίων μικρής ενέργειας σε σχέση με το αρχικό. Τα σωματίδια περνούν μέσα από τον σπινθηριστή, ο οποίος εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 1mm. Το σήμα μεταφέρεται με καλώδια οπτικών ινών σε συγκεκριμένα σημεία όπου αναλύεται από τα ηλεκτρονικά. Το κάθε επίπεδο σπινθηριστών του καλοριμέτρου χωρίζεται σε μέρη (τα υπερπλακάκια) η επιφάνεια των οποίων καθορίζεται από την γεωμετρική τους θέση, έτσι ώστε κάθε μέρος να δέχεται τον ίδιο αριθμό πρωτογενών σωματιδίων. Το σήμα από διαδοχικά υπερπλακάκια αθροίζεται ώστε να υπολογιστεί η ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου. Η οπτική άθροιση των διαδοχικών υπερπλακών σχηματίζει έναν «πύργο» ενέργειας που δείχνει την κατεύθυνση του σωματιδίου. Τα οπτικά σήματα μετατρέπονται σε γρήγορους ηλεκτρικούς παλμούς μέσω υβριδικών φωτοπολλαπλασιαστών. Οι υβριδικοί φωτοπολλαλαπλασιαστές κατασκευάστηκαν ειδικά για τις ανάγκες του CMS, το οποίο έχει ένα πολύ ισχυρό πεδίο μέσα στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν. Η συλλογή των σημάτων από ολόκληρο το καλορίμετρο παρέχει απαραίτητες πληροφορίες στον σκανδαλιστή. Το αδρονικό καλορίμετρο είναι οργανωμένο σε επιμέρους κομμάτια, που βρίσκονται σε διαφορετική περιοχή του ανιχνευτή. Έτσι έχουμε το καλορίμετρο που βρίσκεται στην περιοχή βαρελιού, (barel region) στις άκρες (endcaps) και το προωθημένο (forward region-HF). Το αδρονικό καλορίμετρο είναι το τελευταίο μέρος του ανιχνευτή μέσα στο σωληνοειδές. Το προωθημένο καλορίμετρο εισήχθηκε για την μέτρηση σωματιδίων που έχουν κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη με την δέσμη. Εξαιτίας της μεγάλης ακτινοβολίας που δέχεται αυτό το κομμάτι του καλοριμέτρου, έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικά υλικά για την κατασκευή του.

1.5 Σκανδαλιστής πρώτης τάξης μέχρι σήμερα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα τρία χρόνια λειτουργίας του LHC, γινόντουσαν περίπου 10^9 αλληλεπιδράσεις το δευτερόλεπτο. Αυτός ο αριθμός είναι πολύ μεγάλος αλλά και απαγορευτικός για την αποθήκευση όλων των γεγονότων. Συνεπώς , πρέπει να μειωθεί σε ένα επίπεδο της τάξης των 100 αλληλεπιδράσεων ανά δευτερόλεπτο, που αντιστοιχεί στον μέγιστο ρυθμό αποθήκευσης. Το σύστημα σκανδαλιστή και αποθήκευσης πληροφορίας στο CMS χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα: τα ηλεκτρονικά των ανιχνευτών, τον σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου (Level 1 trigger-L1), το δίκτυο μεταφοράς πληροφοριών και τέλος τον σκανδαλιστή ανώτερης τάξης.

Υπάρχει μία απόσταση από τον ανιχνευτή μέχρι το σημείο όπου βρίσκονται τα ηλεκτρονικά του σκανδαλιστή πρώτης τάξης, που σημαίνει ότι απαιτείται κάποιος χρόνος για την μετάδοση του σήματος. Χρειάζεται επίσης χρόνος για να αποφασίσει ο σκανδαλιστής εάν ένα γεγονός πρέπει να αποθηκευτεί, αλλά και για να μεταδώσει την απόφασή του, στα αντίστοιχα ηλεκτρονικά. Συνολικά για όλη την διεργασία χρειάζονται 3.8 μs, ενώ για να πάρει ο σκανδαλιστής την απόφασή του, λιγότερο από 1μs. Στο πείραμα, οι δέσμες συγκρούονται ανά 25 ns, γεγονός που σημαίνει ότι τα γεγονότα πρέπει να αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι να πάρει ο σκανδαλιστής την απόφασή του. Το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων διαγράφεται από αυτήν την διαδικασία, ενώ ένα μικρότερο της τάξης του 1/1000 αποθηκεύεται. Ο σκανδαλιστής τα τρία πρώτα χρόνια της λειτουργίας του, βασιζόταν σε ειδικά ηλεκτρονικά που ήταν φτιαγμένα για αυτόν και μόνο τον σκοπό. Τα ηλεκτρονικά χρησιμοποιώντας, πληροφορίες από τα καλορίμετρα και τους θαλάμους μιονίων κατασκεύαζαν αναπαραστάσεις των αδρονικών πιδάκων, των ηλεκτρονίων, των μιονίων και της χαμένης ενέργειας. Οι αναπαραστάσεις ήταν χαμηλής ευκρίνειας αλλά κατασκευαζόντουσαν σε μικρό χρονικό διάστημα. Η απόφαση για το εάν ένα γεγονός είναι χρήσιμο βασιζόταν στις εν λόγω αναπαραστάσεις. Ο σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου χωρίζεται σε τμήματα αναλόγως από ποιό υποσύστημα του ανιχνευτή αντλεί δεδομένα. Έτσι έχουμε τον σκανδαλιστή του καλοριμέτρου, τον μιονικό και τον παγκόσμιο.

1.6 Η αναβάθμιση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης

1.6.1 Απαιτήσεις από την αναβάθμιση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης

Το CMS επωφελούμενο το LS1 του επιταχυντή έκανε κάποιες σημαντικές αναβαθμίσεις στον σκανδαλιστή πρώτης τάξης (L1). Ο L1 μετά την αναβάθμιση πρέπει να παρουσιάζει ευαισθησία σε φυσική της κλίμακας

του TeV και της κλίμακας των ηλεκτρασθενών, ίδια με αυτήν που είχε πριν την LS1. Πρέπει να το επιτύχει σε ένα περιβάλλον με φωτεινότητα της τάξη του $2\times10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ και ενέργειας κέντρου μάζας της τάξης των 14 TeV . Με την αύξηση της ενέργειας και της φωτεινότητας περιμένουμε διπλάσια γεγονότα υποβάθρου από ότι είχαμε μέχρι τώρα, δηλαδή 50 ανά σύγκρουση δεσμών. Ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών του L1 ήταν να φτάσουν έναν μέγιστο ρυθμό λειτουργίας της τάξης των 100 kHz. Για να ξεπεράσουν αυτόν τον φραγμό πρέπει να γίνουν πολλές και σημαντικές αλλαγές σε διάφορα μέρη του ανιχνευτή, που δεν προβλέπονται να γίνουν αυτήν την στιγμή.

Επομένως πρέπει να αυξηθούν σημαντικά οι στάθμες των σκανδαλιστών για να μην ξεπεραστεί ο ρυθμός σκανδαλισμού των 100kHz. Οι αναλύσεις που επηρεάζονται περισσότερο από την αύξηση του υποβάθρου, είναι όσες βασίζονται σε ανεύρεση πολλών φυσικών αντικειμένων (πίδακες, ηλεκτρόνια κ.λ.π.). Οι στάθμες σκανδαλισμού αυτών των αναλύσεων πρέπει να αυξηθούν πολύ, εξαιτίας του περιορισμού των 100kHz και των πολλών γεγονότων. Οι επιπτώσεις μίας τέτοιας ενέργειας επηρεάζουν άμεσα την φυσική που καταγράφεται από το CMS, και ειδικότερα την φυσική στην κλίμακα των ηλεκτρασθενών. Μπορούμε όμως αντί να αυξήσουμε τις στάθμες και να χάσουμε φυσική να βελτιώσουμε τον ήδη υπάρχοντα σκανδαλιστή, ώστε να είναι πιο αποδοτικός. Ο σκανδαλιστής μπορεί να βελτιωθεί στους εξής τομείς:

- Βελτιστοποίηση στην απομόνωση αντικειμένων του ηλεκτρομαγνητικού καλοριμέτρου, χρησιμοποιώντας κατανομές ενέργειας με αφαίρεση του υποβάθρου (pile up)
- Βελτιστοποιημένη εύρεση των αδρονικών πιδάκων με αφαίρεση του υποβάθρου
- Βελτιστοποίηση στην εύρεση του tau μέσω αδρονικών διασπάσεων
- Βελτιστοποιημένη μέτρηση της εγκάρσιας ορμής των μιονίων
- Απομόνωση των μιονίων χρησιμοποιώντας κατανομές ενέργειας από τα καλορίμετρα
- Βελτιστοποίηση συνολικά του σκανδαλιστή πρώτης τάξης χρησιμοποιώντας πιο «έξυπνους» και περισσότερους σκανδαλισμούς

Το σύστημα σκανδαλισμού και αποθήκευσης γεγονότων του CMS δεν πρέπει να τεθεί ποτέ υπό αμφισβήτηση. Σε όλη την διάρκεια του πειράματος πρέπει να έχουμε έναν σκανδαλιστή που να λειτουργεί με την μέγιστη απόδοση και να γνωρίζουμε ακριβώς την λειτουργία του. Κρίθηκε αναγκαίο λοιπόν να υπάρχει αρκετός χρόνος έλεγχου του αναβαθμισμένου L1 στον οποίο ο τωρινός L1 συνεχίζει την λειτουργία του.

Τέλος, ο αναβαθμισμένος L1 πρέπει να είναι τεχνολογικά ευέλικτος σε μελλοντικές βελτιώσεις. Το καινούργιο σύστημα πρέπει να είναι η βάση, και κάθε νέο κομμάτι να εγκαθίσταται χωρίς ιδιαίτερη διεργασία, προσθέτοντας υπολογιστική δύναμη.

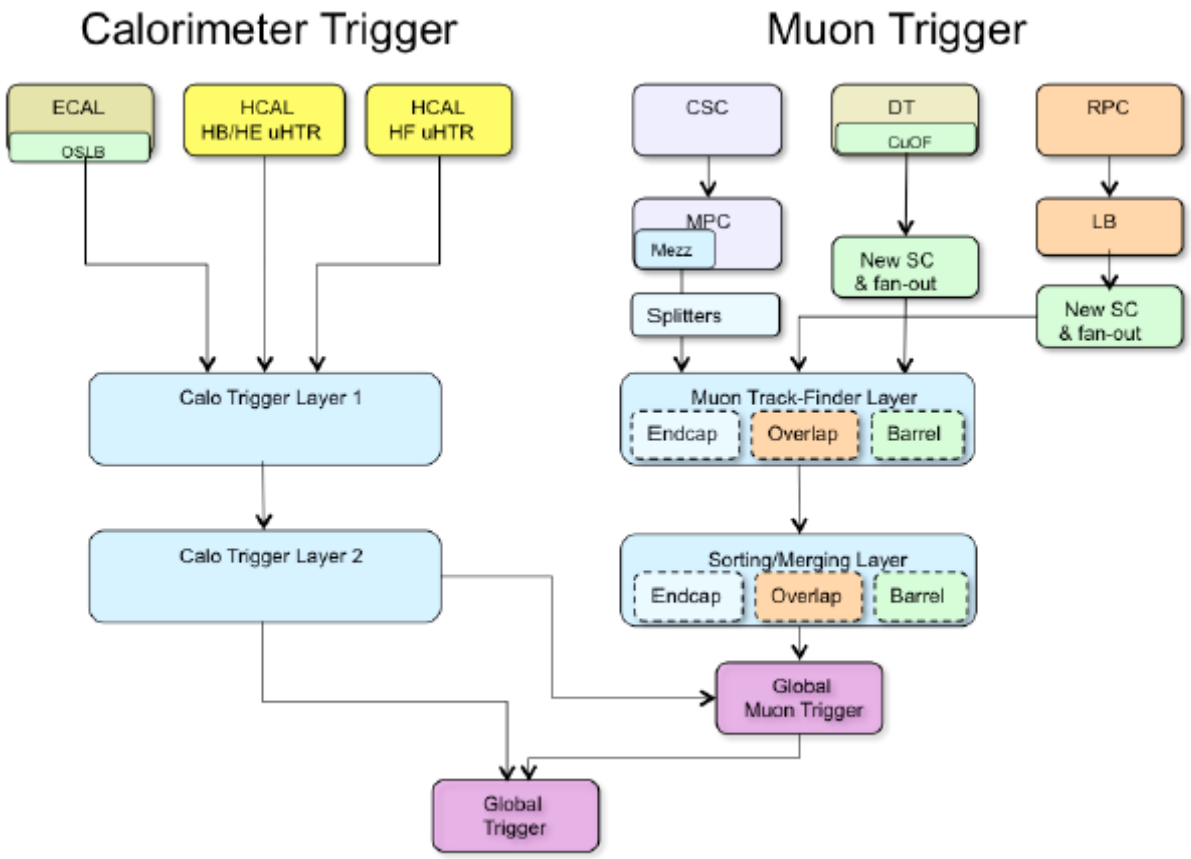
1.6.2 Επισκόπηση των αναβαθμίσεων του σκανδαλιστή πρώτης τάξης

Η τεχνολογική ευελιξία για το CMS ήταν και είναι, από την ίδρυση του LHC, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για να μπορούμε να προσαρμοζόμαστε στις διαρκώς εξελισσόμενες συνθήκες του LHC. Με τις αλλαγές της LS1 η τεχνολογική ευελιξία του L1 αυξάνεται κατακόρυφα. Στον L1, πρέπει συνεχώς να αναπτύσσονται πιο αποδοτικοί αλγόριθμοι, με ακριβέστερη επιλογή γεγονότων και χαμηλότερους ρυθμούς σκανδαλισμού. Η ευελιξία υλοποιείται μέσω της χρήσης οπτικών καλωδίων για την επικοινωνία μεταξύ των καρτών σκανδαλισμού και την χρήση σύγχρονων FPGAs με μεγάλη μνήμη. Η χρήση των FPGAs δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκοι αλγόριθμοι, ενώ οι οπτικές συνδέσεις επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ καρτών σκανδαλισμού.

Το τωρινό σύστημα σκανδαλιστή χρησιμοποιεί ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών καρτών, γεγονός που αλλάζει στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή. Στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή χρησιμοποιείται ένας μικρός αριθμός προγραμματιζόμενων καρτών γενικής χρήσης, με την λειτουργία τους να μεταβάλλεται ανάλογα με το ποιά εργασία εκτελούν. Η ίδια λογική ισχύει και για τους αλγορίθμους των καρτών. Μία σημαντική απαίτηση του CMS είναι να μην τεθεί πότε σε κίνδυνο το σύστημα συλλογής δεδομένων, αλλά να έχουμε

πάντα ένα σύστημα που να κατανοούμε πλήρως την λειτουργία του και να έχει μέγιστη απόδοση. Επομένως κρίθηκε απαραίτητο να υπάρχει ένα χρονικό διάστημα, από την έναρξη του 2015 στο οποίο τίθενται σε λειτουργία και ο τωρινός και ο αναβαθμισμένος L1 παράλληλα, πριν ο αναβαθμισμένος γίνει μόνιμος. Το βελτιστοποιημένο σύστημα σκανδαλιστή αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το 2016. Το τωρινό σύστημα L1 σχεδιάζεται να παραμείνει σε κατάσταση ετοιμότητας μέχρι την LS2.

Έχουν προγραμματιστεί να γίνουν αλλαγές και στον τωρινό L1. Πρόκειται για μικρές αλλαγές που δεν επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία του. Η αρχιτεκτονική του αναβαθμισμένου L1 δεν έχει κάποια διαφορά από την αρχιτεκτονική του τωρινού, και οι αλλαγές περιορίζονται στα υποσυστήματα του, δηλαδή τον καλοριμετρικό L1, τον μιονικό L1 και τον παγκόσμιο L1. Το διάγραμμα ροής πληροφοριών του νέου σκανδαλιστή είναι στην εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3 Η ροή δεδομένων στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή

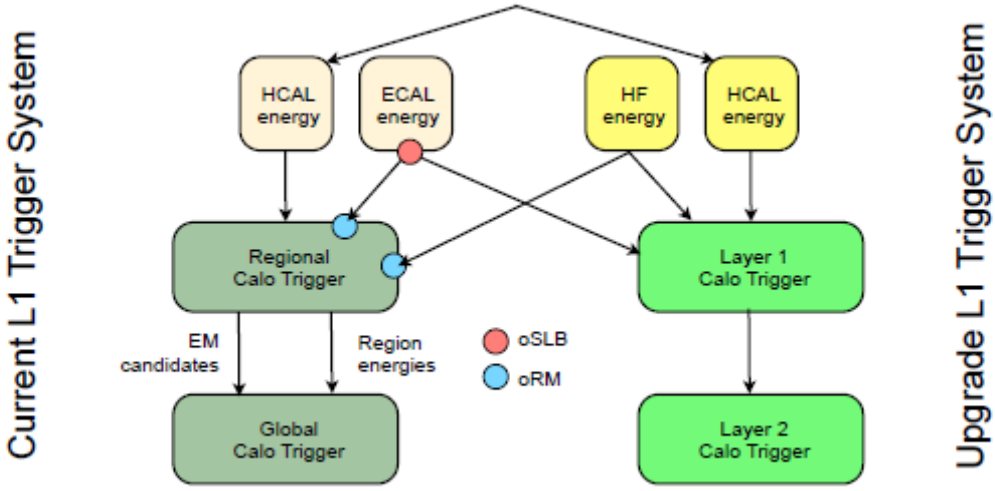
1.6.3 Καλοριμετρικός σκανδαλιστής πρώτης τάξης

Ο καλοριμετρικός σκανδαλιστής λαμβάνει πληροφορίες από τα δύο καλορίμετρα του CMS (ηλεκτρομαγνητικό και αδρονικό). Το αδρονικό καλορίμετρο αναμένεται να βελτιστοποιηθεί στην LS1 και στην LS2. Συγκεκριμένα στην LS1 έχει προγραμματιστεί η αλλαγή των ηλεκτρονικών του HF, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που στέλνονται στον σκανδαλιστή να έχουν μεγαλύτερη ευκρίνεια. Κατά την LS2 έχει προγραμματιστεί να αναβαθμιστούν τα ηλεκτρονικά του barrel και των endcaps, με πιο σύγχρονα που βελτιώνουν την χρονική ακρίβεια και προσθέτουν την πληροφορία τμηματοποίησης στο βάθος. Τα αναβαθμισμένα ηλεκτρονικά έχουν την δυνατότητα να αντιγράφουν το σήμα και να το στέλνουν ταυτόχρονα στον παλιό και στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή. Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο αναβαθμίζεται και αυτό με καινούργιες ηλεκτρονικές κάρτες που μετατρέπουν το σήμα σε οπτικό και το αντιγράφουν, ώστε να στέλνεται σε δύο σκανδαλιστές (Εικόνα 1.4).

Ο τωρινός καλοριμετρικός L1 βασίζεται στην λογική της σταδιακής μείωσης του αριθμού των γεγονότων από ένα στάδιο στο επόμενο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο σταδίων. Συγκεκριμένα σε κάθε στάδιο αναγνωρίζονται τα αντικείμενα, ταξινομούνται και οι καλύτεροι υποψήφιοι στέλνονται στο επόμενο στάδιο. Η εύρεση των πιδάκων βασίζεται στον υπολογισμό αδρών αθροισμάτων των δεδομένων των πύργων του αδρονικού καλοριμέτρου. Αυτή η λογική εφαρμόζεται από ηλεκτρονικές κάρτες ASICs και FPGAs.

Στον αναβαθμισμένο καλοριμετρικό L1 οι ηλεκτρονικές κάρτες είναι μόνο FPGAs, πιο σύγχρονες και πιο ισχυρές που σε συνδυασμό με τις ταχύτατες οπτικές συνδέσεις, επιτρέπουν την χρήση δεδομένων μεγαλύτερης ευκρίνειας. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη βελτίωση του εντοπισμού της θέσης και της ενέργειας των αντικειμένων. Επιπλέον οι καινούργιες κάρτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αλγόριθμους που να αφαιρούν το υπόβαθρο, κάτι το οποίο κρίθηκε αναγκαίο δεδομένου ότι ο αριθμός των γεγονότων υποβάθρου ήταν μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο το 2012. Η εγκατάσταση των FPGAs επιτρέπει την ανάπτυξη βελτιωμένων αλγορίθμων που προσαρμόζονται καλύτερα στο νέο περιβάλλον του LHC. Με αυτήν την στρατηγική μπορεί να εξελίσσεται ένας αλγόριθμος (ή να εφαρμοστεί ένας καινούργιος) αν και όταν αυτό απαιτηθεί. Δεν μπορούν όμως όλοι οι αλγόριθμοι να εφαρμοστούν με σταθερή ροή πληροφοριών, όπως ήταν η ροή του τωρινού καλοριμετρικού L1. Για αυτό τον λόγο, στον αναβαθμισμένο L1 χρησιμοποιείται μία καινοτόμο αρχιτεκτονική, που νοηματικά ταιριάζει περισσότερο με τον σκανδαλιστή ανώτερης τάξης, δηλαδή μία διαδικασία όπου πολλά ανεξάρτητα γεγονότα επεξεργάζονται παράλληλα. Μελέτες έχουν αποδείξει ότι μία τέτοια αρχιτεκτονική είναι δυνατή, αλλά αν προκύψουν τυχόν προβλήματα, μπορούμε να γυρίσουμε άμεσα στην προηγούμενη.

Κατά την LS1 αναμένεται να βελτιωθεί και ο τωρινός καλοριμετρικός L1. Συγκεκριμένα έχει προγραμματιστεί η αλλαγή ηλεκτρονικών καρτών του Global Calorimeter Trigger με σύγχρονες πρωτότυπες κάρτες που βελτιώνουν την απόδοση του.



Εικόνα 1.4 Η ροή των γεγονότων στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή καλοριμέτρου.

1.6.4 Μιονικός σκανδαλιστής πρώτης τάξης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το CMS χρησιμοποιεί τρία υποσυστήματα ανιχνευτών για να εντοπίζει τα μιόνια. Συνδυάζοντας τις πληροφορίες και από τα τρία μπορούμε να έχουμε έναν πολύ αποδοτικό σκανδαλισμό. Το μειονέκτημα του τωρινού μιονικού L1 έγκειται στο ότι οι πληροφορίες από τα τρία υποσυστήματα συνδυάζονται αργά στην διαδικασία σκανδαλισμού. Ο αναβαθμισμένος μιονικός L1 συνδυάζει τις πληροφορίες από τα υποσυστήματα νωρίτερα στην διαδικασία σκανδαλισμού, πετυχαίνοντας μεγαλύτερη απόδοση και μείωση του ρυθμού σκανδαλισμού. Στον τωρινό σκανδαλιστή κάθε ένα από τα υποσυστήματα ανίχνευσης μιονίων είχε έναν ξεχωριστό τρόπο εύρεσης τροχιών. Στον αναβαθμισμένο, ο τρόπος εύρεσης τροχιών είναι κοινός και για τους τρείς ανιχνευτές, γίνεται μέσω του Muon Track Finder (Εικόνα 1.5). Γνωρίζοντας ότι κάθε σημείο στην τροχιά των μιονίων βελτιώνει την απόρριψη των ψεύτικων

μιονίων και βελτιώνει την μέτρηση της ορμής τους, η αναβάθμιση στοχεύει στον συνδυασμό των πληροφοριών εξαρχής. Η αλλαγή όμως δεν έγκειται μόνο στον συνδυασμό των πληροφοριών, αλλά και σε νέους αλγόριθμους που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργούν καλύτερα σε περιβάλλον με πολλά γεγονότα υποβάθρου, όπως το LHC μετά την LS1. Στον αναβαθμισμένο L1, οι αλγόριθμοι αξιοποιούν τις πληροφορίες από τα τρία υποσυστήματα ανάλογα με το που υπερτερεί το καθένα. Ο Muon Track Finder αναμένεται να αντικαταστήσει τους ανεξάρτητους τρόπους εύρεσης τροχιάς των υποσυστημάτων σε βάθος χρόνου.

Μελέτες που συγκρίνουν τον τωρινό με τον αναβαθμισμένο L1 δείχνουν ότι περιμένουμε βελτίωση αποτελεσμάτων σε αρκετούς τομείς. Με την χρήση του αναβαθμισμένου L1 πετυχαίνουμε σημαντική αύξηση στην ανάλυση της μέτρησης της εγκάρσιας ορμής των μιονίων. Έτσι αποκόπτονται γεγονότα που η ορμή τους κατά την διαδικασία σκανδαλισμού μετριόταν περισσότερο από την πραγματική της τιμή και λανθασμένα αποθηκευόντουσαν, πράγμα που συνέβαινε έως τώρα. Αξιοποιώντας συγχρόνως, πληροφορίες από τα καλορίμετρα πετυχαίνουμε υψηλή απόδοση σκανδαλισμού σε σήματα φυσικής, διατηρώντας χαμηλό ρυθμό σκανδαλισμών.

Η LS1 χρησιμοποιείται ώστε να επιλυθούν και κάποια τεχνικά ζητήματα. Στον ανιχνευτή CSC υπάρχουν οι ηλεκτρονικές κάρτες mezzanine που έχουν περιορισμένο αριθμό κομματιών των μιονικών τροχιών που μπορούν να στείλουν στα ηλεκτρονικά για την ανακατασκευή των τροχιών των μιονίων. Ο περιορισμός των κομματιών των μιονικών τροχιών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση στην απόδοση των γεγονότων όπου πολλά μιόνια βρίσκονται σε μικρό γεωμετρικό εύρος. Επίσης, περιμένουμε να δημιουργήσει κατακόρυφη πτώση της απόδοσης σε ένα περιβάλλον με αυξημένο υπόβαθρο. Το σύστημα DT έχει πολλές παράλληλες συνδέσεις για τοπική επεξεργασία, γεγονός που κάνει δύσκολη την συντήρησή του και μειώνει την αξιοπιστία του.

Κρίνεται αναγκαία η αντικατάσταση των καρτών mezzanine με άλλες ώστε να αρθεί ο περιορισμός των κομματιών των τροχιών που στέλνονται και να βελτιωθεί η ποιότητα των δεδομένων στα οποία βασίζεται ο σκανδαλισμός. Οι νέες κάρτες εκτός ότι μπορούν να στέλνουν περισσότερα δεδομένα στα ηλεκτρονικά, επιτρέπουν την αντιγραφή του σήματος ώστε να σταλεί και στον αναβαθμισμένο και στον τωρινό L1. Επίσης οι οπτικές συνδέσεις μεταξύ του συστήματος RPC και του τωρινού L1 αναμένεται να μεταφερθούν και στον αναβαθμισμένο. Μία άλλη αλλαγή είναι η μεταφορά των ηλεκτρονικών του DT στο counting room του CMS. Αυτή η κίνηση παρέχει την απαραίτητη ευελιξία και ελευθερία για την αναβάθμιση του μηχανισμού εύρεσης της μιονικής τροχιάς ανεξάρτητα από το αν δουλεύει ο επιταχυντής ή όχι. Επίσης επιτρέπει την χρήση νέων ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούν οπτικά καλώδια για την μεταφορά δεδομένων σε διάφορα σημεία του μηχανισμού εύρεσης μιονικής τροχιάς στον αναβαθμισμένο L1. Το ίδιο έχει προγραμματιστεί και για τον ανιχνευτή RPC.

Σημαντική είναι και η αντικατάσταση του ανιχνευτή τροχιάς. Αρχικά αναμένεται να λειτουργούν και τα δύο συστήματα, με το καινούργιο (Muon Track Finder) να λαμβάνει σήμα από τον CSC και RPC καθώς και ένα τμήμα του σήματος του DT. Οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για τον νέο σκανδαλιστή μοιάζουν με αυτούς που ήδη υπάρχουν αλλά αυτό αναμένεται να αλλάξει και να αντικατασταθούν οι τρεις ξεχωριστοί σκανδαλιστές από έναν, σε βάθος χρόνου. Ο παγκόσμιος σκανδαλιστής μιονίων (Global Muon Trigger, GMT) έχει προγραμματιστεί να αναβαθμιστεί ώστε να δέχεται περισσότερα πιθανά μιόνια. Ο GMT είναι υπεύθυνος και για την εύρεση της απομόνωσης των μιονίων. Ο υπολογισμός αυτού του μεγέθους γίνεται με χρήση των δεδομένων των καλοριμέτρων. Τα αποτελέσματα στέλνονται στον παγκόσμιο σκανδαλιστή.

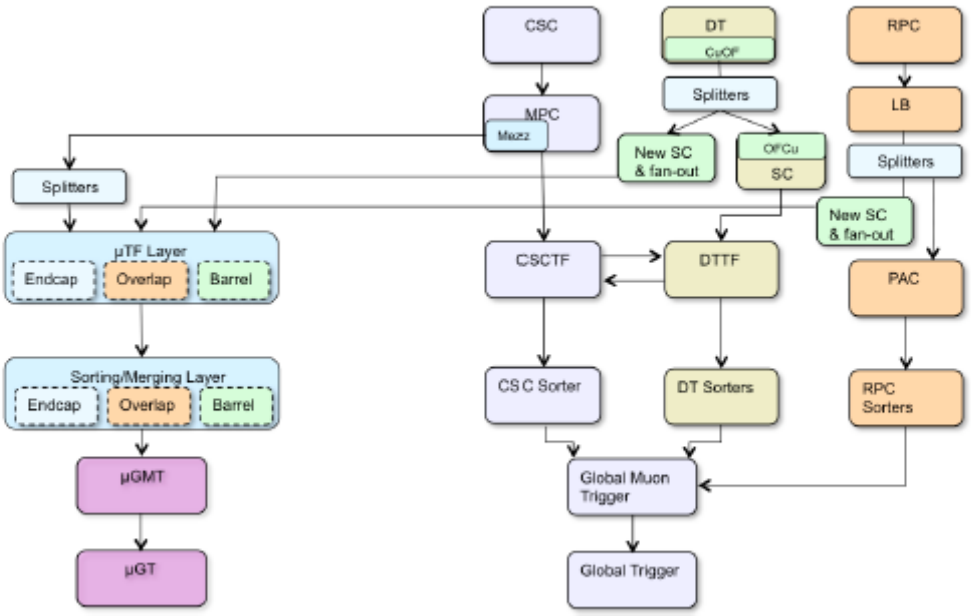
1.6.5 Παγκόσμιος σκανδαλιστής πρώτης τάξης

Ο τωρινός παγκόσμιος L1 (Global Trigger, GT) επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία 128 αλγορίθμων προκειμένου να αποφασίσει αν ένα γεγονός πρέπει να αποθηκευτεί ή όχι. Το CMS είναι ένα πείραμα γενικού ενδιαφέροντος και σαν τέτοιο, πρέπει να συλλέγει γεγονότα για πολλές και διαφορετικές αναλύσεις και για

πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς. Επίσης χρειάζονται εξειδικευμένοι σκανδαλιστές που έχουν ως σκοπό να μετρούν την απόδοση του ανιχνευτή και να μεταδίδουν στοιχεία για την βαθμονόμησή του.

Ο αναβαθμισμένος GT είναι ικανός να δεχτεί τα διπλάσια υποψήφια αντικείμενα (ηλεκτρόνια, μιόνια κ.λπ.) σε σχέση με τον τωρινό. Τα αντικείμενα που δέχεται, έχουν υψηλότερη ευκρίνεια, με βελτιωμένη μέτρηση της εγκάρσιας ορμής και στην περίπτωση των δεδομένων των καλοριμέτρων μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια. Το πλεονέκτημα των δεδομένων μεγάλης ευκρίνειας είναι να επιτρέπουν τον υπολογισμό χωρικών συσχετισμών σε υψηλή ανάλυση, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα, στην εύρεση των b quarks με μεγαλύτερη επιτυχία και στον υπολογισμό της αναλλοίωτης μάζας. Γενικά, ο L1 μετά την αναβάθμιση του GT, γίνεται ισχυρότερος με λειτουργίες που παραπέμπουν πιο πολύ στον σκανδαλιστή ανώτερης τάξης.

Ένα σημαντικό στοιχείο αναβάθμισης του GT είναι ο διαχωρισμός του αλγορίθμου, από το σύστημα ελέγχου σκανδαλιστή (Trigger Control System, TCS) που σχετίζεται με την αποθήκευση των δεδομένων, τον έλεγχο του σκανδαλιστή και στην παροχή πληροφοριών βαθμονόμησης. Στον αναβαθμισμένο L1,το TCS είναι μέρος του Trigger Timing and Control. Με την μεταφορά πετυχαίνουμε τον διαχωρισμό μεταξύ των αλγορίθμων που ασχολούνται με την φυσική από τους αλγόριθμους που ασχολούνται με την αποθήκευση δεδομένων. Το σύστημα του παγκόσμιου σκανδαλιστή έχει φτιαχτεί έτσι ώστε να είναι εύκολα επεκτάσιμο, με την πρόσθεση επιπλέον ηλεκτρονικών καρτών. Συνεπώς μπορεί να αυξηθεί ο αριθμός των διαθέσιμων αλγορίθμων και να ελέγχονται νέοι αλγόριθμοι άμεσα. Επίσης η χρήση σύγχρονων FPGAs επιτρέπει την εκτέλεση «εξυπνότερων» αλγορίθμων.



Εικόνα 1.5 Το διάγραμμα ροής των δεδομένων του μιονικού L1.

1.7 Σκοπός της εργασίας

Η αύξηση της ενέργειας και της φωτεινότητας του LHC αναμένεται να επηρεάσει άμεσα το σύστημα σκανδαλισμού και συλλογής δεδομένων του CMS, λόγω του πολύ μεγαλυτέρου αριθμού των γεγονότων υπόβαθρου που περιμένουμε. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά έχουν έναν συγκεκριμένο ρυθμό σκανδαλισμού των 100 kHz και πρέπει να γίνουν μεγάλες αλλαγές για να αρθεί αυτός ο περιορισμός, έχουμε δύο επιλογές:

την αύξηση των κατωφλιών σκανδαλισμού ή την ανάπτυξη πιο σύγχρονων αλγορίθμων. Η πρώτη επιλογή οδηγεί σε σημαντική απώλεια γεγονότων φυσικής, γιατί πολλά γεγονότα σήματος δεν θα καταφέρουν να περάσουν το κατώφλι σκανδαλισμού. Οπότε, εάν δεν θέλουμε να χάσουμε Φυσική, πρέπει να αναπτύξουμε νέους αλγόριθμους.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που χρησιμοποιεί σύγχρονες μεθόδους για τον διαχωρισμό σήματος και υποβάθρου για τον L1 αδρονικό σκανδαλιστή. Ο ανδρονικός σκανδαλιστής δέχεται ως δεδομένα τους πίδακες που προέρχονται από το αδρονικό καλορίμετρο. Ορίζουμε ως πίδακα τον στενό κώνο αδρονίων και άλλων σωματιδίων που δημιουργούνται σε ένα πείραμα στοιχειωδών σωματιδίων. Η ανάπτυξη του αλγορίθμου έγινε με χρήση του πακέτου Toolkit for MultiVariarte Analysis (TMVA) και ο αλγόριθμος γράφτηκε σε C++. Το TMVA επιτρέπει την εκπαίδευση μιάς μεθόδου σε ένα σύνολο γεγονότων, που εκ των προτέρων γνωρίζουμε ποιό κομμάτι τους αντιστοιχεί σε σήμα και ποιό σε υπόβαθρο. Από τα γεγονότα αυτά αντλούμε πληροφορίες που έχουν να κάνουν με εγγενή χαρακτηριστικά των πιδάκων. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι γεωμετρικές, να έχουν σχέση με κατανομές ενεργείας στον πίδακα κ.λ.π.. Από τις πληροφορίες βρίσκουμε διαφορές μεταξύ των πιδάκων σήματος και του υποβάθρου. Οι πληροφορίες αυτές εκφράζονται από τις μεταβλητές που παρουσιάζουμε στο κεφάλαιο 3. Το πακέτο TMVA παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.

Η μέθοδος που διαλέξαμε να εκπαιδεύσουμε είναι η Boosted Decision Trees (BDT). Η μέθοδος των Decision Trees ελέγχει όλες τις μεταβλητές για να βρει σε ποια μεταβλητή και σε ποιο σημείο του φασικού της χώρου διαχωρίζεται βέλτιστα το υπόβαθρο από το σήμα. Σε εκείνο το σημείο θέτει ένα cut, φτιάχνοντας με αυτόν τον τρόπο δύο υποσύνολα. Συνεχίζει με την ίδια λογική χωρίζοντας το αρχικό σύνολο σε όλο και περισσότερα υποσύνολα. Στο τέλος έχουμε πολλά υποσύνολα ενός χώρου πολλών διαστάσεων (κάθε μεταβλητή αντιστοιχεί σε μία διάσταση), που το κάθε ένα χαρακτηρίζεται ως σήμα ή υπόβαθρο, ανάλογα με την πλειονότητα των γεγονότων που εσωκλείει. Όταν λοιπόν μας έρχεται ένα γεγονός που πρέπει να το κατατάξουμε, κοιτάμε σε ποιό υποσύνολο βρίσκεται και ανάλογα το χαρακτηρίζουμε ως σήμα ή υπόβαθρο. Τα BDT είναι μια εξέλιξη της μεθόδου Decision Trees κατά την οποία δεν αναπτύσσουμε ένα δέντρο αλλά ένα ολόκληρο δάσος, αλλάζοντας κάθε φορά τα βάρη των γεγονότων εκπαίδευσης. Στην μέθοδο BDT για να αποφασίσουμε εάν ένα γεγονός είναι σήμα ή υπόβαθρο παίρνουμε υπόψη μας την απόφαση της πλειοψηφίας των δέντρων για το συγκεκριμένο γεγονός. Η πλήρης περιγραφή της μεθόδου καθώς και η εκπαίδευση της, βρίσκονται στο κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης καθώς και συγκρίσεις της μεθόδου, βρίσκονται στο κεφάλαιο 6.

2. Επισκόπηση αποτελεσμάτων

2.1 Αποτελέσματα του CMS

Το LHC λειτούργησε για δύο χρόνια με ενέργεια στο κέντρο μάζας ίση με 7 TeV, ενώ το 2012 έφτασε μέχρι τα 8 TeV που είναι η υψηλότερη ενέργεια μέχρι στιγμής σε επιταχυντή σωματιδίων παγκοσμίως. Το CMS, εκμεταλλευόμενο τις συγκρούσεις υψηλών ενεργειών, συνέλεξε γεγονότα για διάφορες αναλύσεις φυσικής. Τα γεγονότα χρησιμοποιούνται για να ελέγξουμε την θεωρία του Κ.Π. αλλά και για έρευνα σχετικά με νέα φυσική. Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των αναλύσεων στο CMS και τα αποτελέσματα τους.

2.2 Αποτελέσματα της ηλεκτρασθενούς

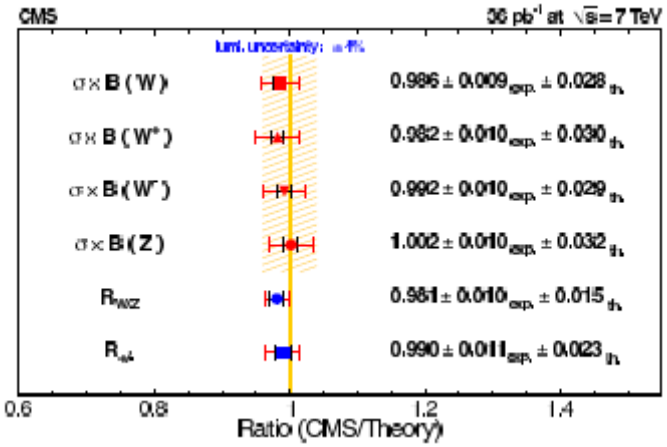
Στον LHC, που είναι ένας επιταχυντής πρωτονίων, η κύρια πηγή παραγωγής των μποζονίων W, Z είναι η σκέδαση των quark σθένους με anti-quark θαλάσσης. Επίσης μία άλλη πηγή είναι η σύγκρουση quark θαλάσσης με anti-quark θαλάσσης. Η λεπτονική διάσπαση των μποζονίων W και Z έχει μελετηθεί αρκετές φορές, και θεωρείται γνωστή σε ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης έχουν σχετικά λίγα γεγονότα υποβάθρου. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η χρήση των W, Z για να μειωθεί η αβεβαιότητα των συναρτήσεων κατανομής παρτονίων (parton distribution functions-PDFs) και για να έλεγχο των υπολογισμών που μας δίνουν τους δεύτερους και τρίτους σημαντικότερους όρους (next to leading order-NLO, next to next to leading order-NNLO). Επίσης, τα μποζόνια W και Z μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βαθμονόμηση του ανιχνευτή, για κατανόηση της λειτουργίας του και για μέτρηση της αποδοτικότητάς του μέσω της μεθόδου "tag and probe". Οι διαδικασίες της ηλεκτρασθενούς θεωρίας δεν χρησιμοποιούνται μόνο για έλεγχο του ανιχνευτή και της απόδοσής του, αλλά και ως υπόβαθρο για την νέα φυσική. Η παραγωγή ενός διανυσματικού μποζονίου και πιδάκων ή δύο διανυσματικών μποζονίων είναι η κύρια πηγή υποβάθρου σε αρκετά σήματα νέας φυσικής.

Το μποζόνιο W παράγεται με ρυθμό 10^6 μποζονίων ανά fb^{-1}, ενώ το Z με ρυθμό 10^5 μποζονίων ανά fb^{-1}. Το σήμα του W έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την ύπαρξη ενός απομονωμένου λεπτονίου με εγκάρσια ορμή μεγαλύτερη των 25 GeV και εγκάρσια χαμένη ενέργεια εξαιτίας του νετρίνο. Η ενέργεια του λεπτονίου χρησιμοποιείται ως απαίτηση σκανδαλισμού. Το σήμα του W το εξάγεται με την χρήση της κατανομής της εγκάρσιας μάζας που κατασκευάζεται από την εγκάρσια ορμή του λεπτονίου και την χαμένη εγκάρσια ορμή. Το σήμα του Z χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δύο λεπτονίων μεγάλης ορμής και είναι πιο εύκολη η εύρεσή του μέσω του υπολογισμού της αναλλοίωτης μάζας των λεπτονίων. Το κυρίως υπόβαθρο αυτής της διαδικασίας προέρχεται από τις διαδικασίες πολλών πιδάκων της QCD, εκ των οποίων ένας χαρακτηρίζεται λανθασμένα ως λεπτόνιο. Το υπόβαθρο από την QCD μπορεί να μειωθεί σημαντικά απαιτώντας αυστηρά κριτήρια απομόνωσης των λεπτονίων. Το κομμάτι του υποβάθρου της QCD που παραμένει, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανιχνευτή γι αυτό καθορίζεται μέσω διαδικασιών που χρησιμοποιούν πραγματικά γεγονότα και όχι μέσω προσημειώσεων. Οι υπόλοιπες πηγές υποβάθρου αποτελούνται από γεγονότα $t\bar{t} \to Wb\bar{b}$, διμποζόνια, διασπάσεις του W και Z σε tau που διασπάται λεπτονικά και σε γεγονότα όπου το λεπτόνιο περνά από τον ανιχνευτή χωρίς να εντοπιστεί. Η συνεισφορά όλων αυτών των διεργασιών καθορίζεται μέσω προσομοιώσεων[7]. Στην εικόνα 2.1 βλέπουμε την ενεργό διατομή των W και Z και την σύγκριση με την θεωρία. Η στατιστική αβεβαιότητα θεωρείται αμελητέα, με εξαίρεση της αβεβαιότητας από την φωτεινότητα (4%). Η συστηματική αβεβαιότητα είναι μικρότερη (1%) και η θεωρητική κυμαίνεται στο 3% .

Το μποζόνιο Z μέσω της διάσπασης του σε tau $Z \to \tau^+\tau^-$ αποτελεί μία σημαντική πηγή ενεργητικών λεπτονίων tau και μας επιτρέπει την μέτρηση της αποδοτικότητας της ταυτοποίησης των tau και των σκανδαλιστών του tau. Στο CMS τα tau ανακατασκευάζονται μέσω του αλγορίθμου HPS που βασίζεται σε γεγονότα από τον particle flow αλγόριθμο. Η $Z \to \tau^+\tau^-$ αποτελεί πηγή υποβάθρου αρκετών αναλύσεων της νέας φυσικής, οπότε πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια. Η εικόνα 2.2 δείχνει την ολική ενεργό διατομή της

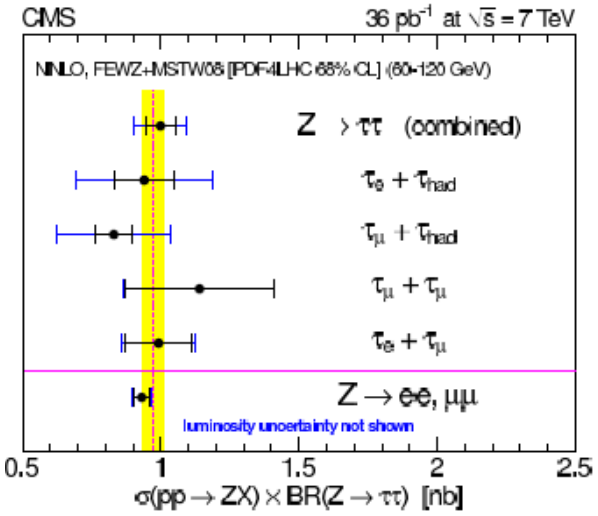
$Z \to \tau^+\tau^-$ έτσι όπως μετρήθηκε και μέσω θεωρητικών προβλέψεων[8]. Η κύρια αβεβαιότητα αυτής της μέτρησης προέρχεται από την μη έγκυρη ταυτοποίηση των tau και ανέρχεται στο 23%.

Ο μεγάλος αριθμός των παραγόμενων Z μποζονίων επιτρέπει την μελέτη της διαφορικής ενεργού διατομής ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής και της ωκύτητας. Τέτοιες μελέτες επιτρέπουν τον έλεγχο των θεωρητικών προβλέψεων. Η εικόνα 2.3 παρουσιάζει την διαφορική ενεργό διατομή του Z σαν συνάρτηση της p_T του λεπτονίου[9]. Οι θεωρητικές προβλέψεις έχουν υπολογιστεί με χρήση των λογισμικών PYTHIA και FEWZ. Για χαμηλές τιμές της p_T, όπου δεν λαμβάνονται υπόψη οι διορθώσεις ανωτέρας τάξης, χρησιμοποιείται το λογισμικό PYTHIA, ενώ για υψηλότερες το FEWZ.



Εικόνα 2.1 Η πειραματική μέτρηση της ενεργούς διατομής και η σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις.

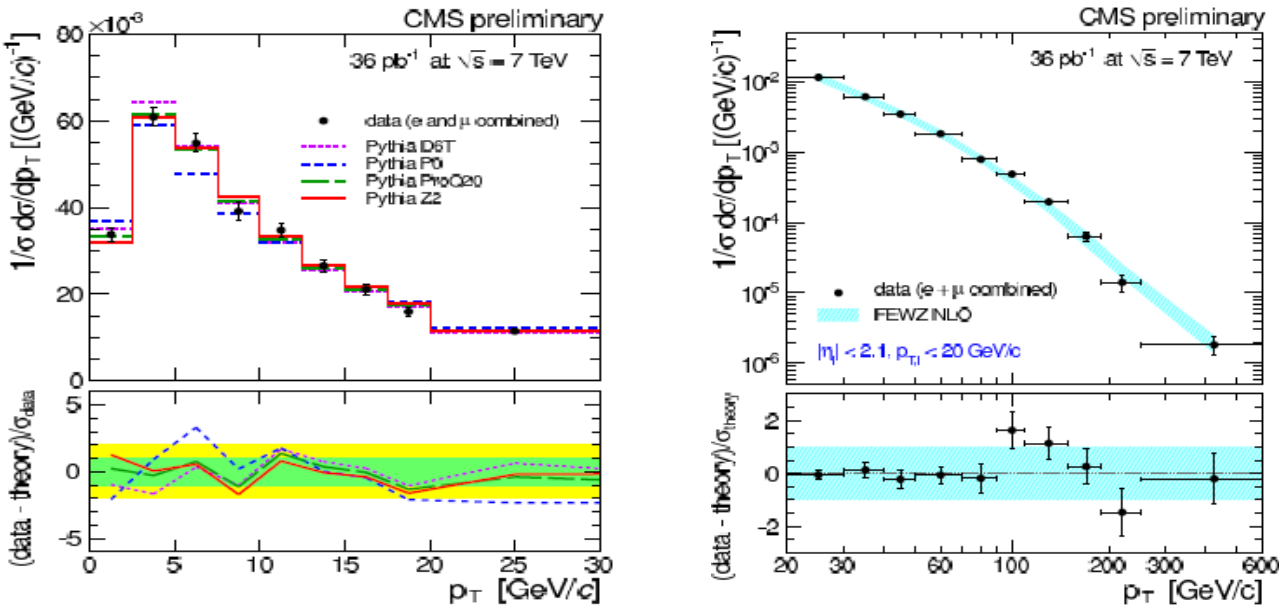
Η κατανομή της διαφορικής ενεργούς διατομής της διαδικασίας Drell-Yan μακριά από την περιοχή συντονισμού του Z είναι ουσιώδης γιατί μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη νέας φυσικής. Η ενεργός διατομή είναι ευαίσθητη σε υποθέσεις που κάναμε κατά την κατασκευή των PDFs και των διορθώσεων της ηλεκτρασθενούς. Στην εικόνα 2.4 βλέπουμε την ενεργό διατομή ως συνάρτηση της αναλλοίωτης μάζας, κανονικοποιημένη (με βάση την ενεργό διατομή την περιοχή του Z), και έχοντας συμπεριλάβει διορθώσεις για την απόδοση του ανιχνευτή, την διακριτική του ικανότητα και την γεωμετρική αποδοχή που παρουσιάζει[10].



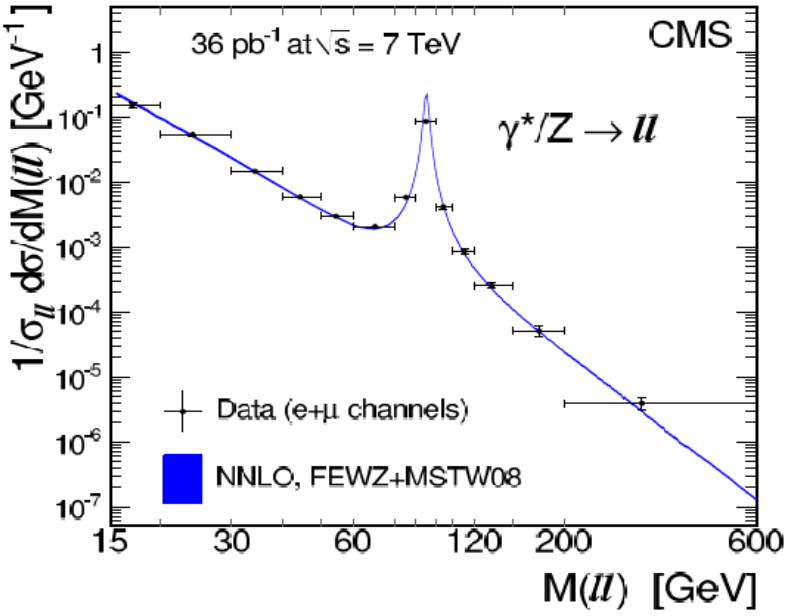
Εικόνα 2.2 Η συνολική ενεργός διατομή της διαδικασίας Z→ττ και οι θεωρητικές προβλέψεις.

Εξαιτίας των αναλύσεων του μποζονίου Higgs στο CMS μελετήσαμε την παραγωγή δύο μποζονίων βαθμίδας μεγάλης μάζας, μετρώντας τις ενεργές διατομές των διαδικασιών WW, WZ και ZZ. Όλες οι αναλύσεις εστιάζουν στις καθαρά λεπτονικές διασπάσεις των σωματιδίων επειδή δίνουν σήματα στα οποία η συνεισφορά του υπόβαθρου είναι μικρή. Έχουν όμως μικρότερη πιθανότητα να συμβούν σε σχέση με της ημι-λεπτονικές διαδικασίες. Εστιάζοντας στις λεπτονικές διασπάσεις και απαιτώντας κατάλληλα κριτήρια, αποφεύγονται οι πιο σημαντικές πηγές υποβάθρου, όπως η παραγωγή ενός W και πιδάκων, το υπόβαθρο εξαιτίας των top quark, διαδικασίες Drell-Yan και γεγονότα της QCD πολλών πιδάκων. Το υπόβαθρο που απομένει αφαιρείται με μεθόδους που βασίζονται στις μετρήσεις. Η διαδικασία WW έχει 626 γεγονότα, η WZ έχει περίπου 70 εκ των οποίων το 10% προέρχεται από διαδικασίες υποβάθρου. Η διαδικασία ZZ έχει περίπου 10 γεγονότα με το υπόβαθρο να είναι αμελητέο. Οι εικόνες 2.5 είναι οι κατανομές των αναλλοίωτων μαζών των δύο λεπτονίων για την διαδικασία WW, τεσσάρων για την ZZ και του Z για την διαδικασία WZ [11]. Οι ενεργές διατομές της παραγωγής διλεπτονίων για κάθε μία από τις παραπάνω διαδικασίες, μετρήθηκαν από το CMS ως εξής:

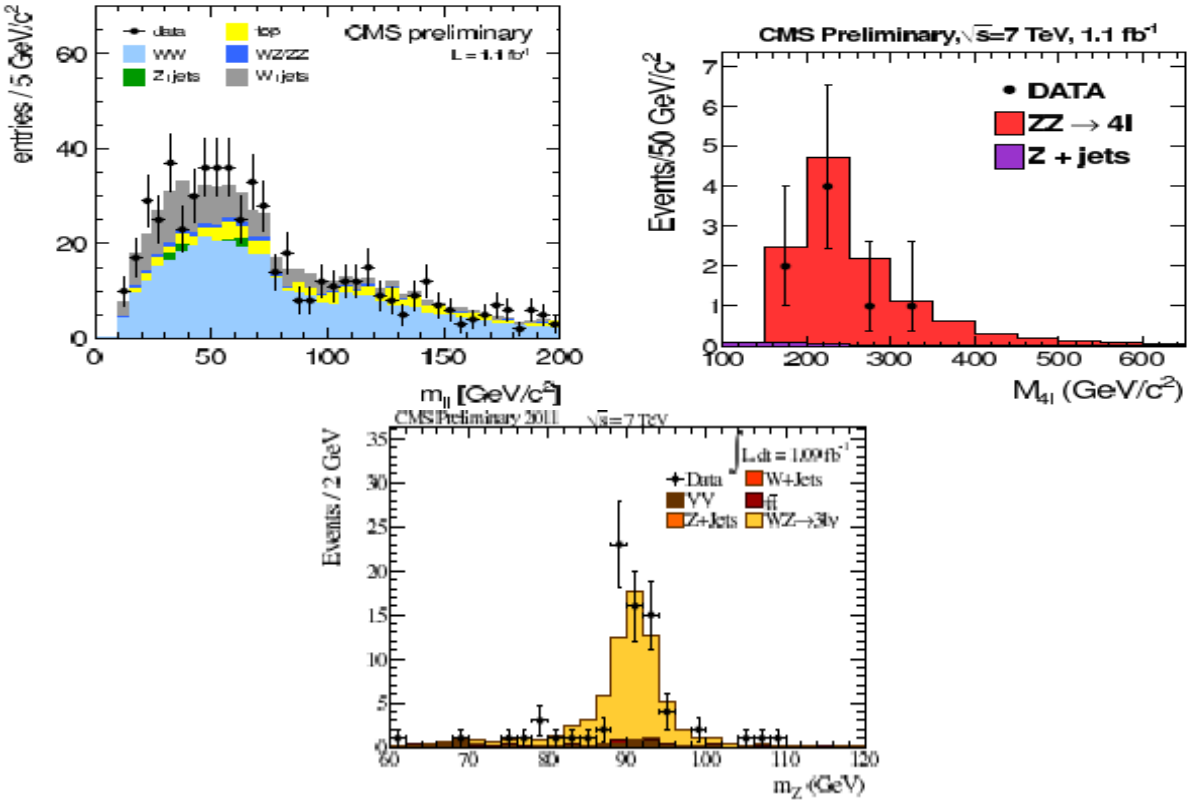
- $\sigma(pp \to WW + X) = 55.3 \pm 3.3(stat.) \pm 6.9(syst.) \pm 3.3(lumi.)\, pb$
- $\sigma(pp \to WZ + X) = 17.0 \pm 2.4(stat.) \pm 1.1(syst.) \pm 1.0(lumi.)\, pb$
- $\sigma(pp \to ZZ + X) = 3.8^{+1.5}_{-1.2}(stat.) \pm 0.2(syst.) \pm 0.2(lumi.)\, pb$



Εικόνα 2.3 Η μέτρηση της εγκάρσιας τιμής του μποζονίου Z για χαμηλές ορμές (αριστερά) και για υψηλές (δεξιά). Οι πρώτες συγκρίνονται με το λογισμικό PYTHIA και η δεύτερες με το FEWZ.



Εικόνα 2.4 Η ενεργός διατομή των διλεπτονίων ως συνάρτηση της αναλλοίωτης μάζας τους.

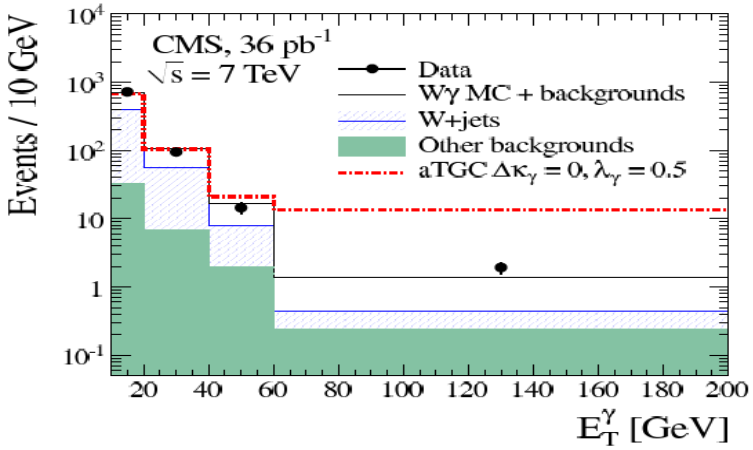


Εικόνες 2.5 Πάνω αριστερά: Το ιστόγραμμα της αναλλοίωτης μάζας δύο λεπτονίων (WW), Πάνω δεξιά: Το ιστόγραμμα της αναλλοίωτης μάζας τεσσάρων λεπτονίων (ZZ), Κάτω: Το ιστόγραμμα αναλλοίωτης μάζας του Z (WZ).

Η παραγωγή των μποζονίων W και Z σε συνδυασμό με φωτόνια είναι σημαντική, γιατί το Κ.Π. έχει μηδενική ή μικρή συνεισφορά σε αυτά τα κανάλια. Η παραγωγή τους γίνεται από ακτινοβολία φωτονίων αρχικής και τελικής κατάστασης (initial and final state radiation). Τα κριτήρια επιλογής για το μποζόνιο Z απαιτούν την ύπαρξη δύο απομονωμένων λεπτονίων με εγκάρσιες ορμές μεγαλύτερες από 20GeV, και αναλλοίωτη μάζα μεγαλύτερη από 50 GeV. Για το μποζόνιο W απαιτείται ένα απομονωμένο λεπτόνιο με εγκάρσια ορμή μεγαλύτερη από 20 GeV και χαμένη ενέργεια μεγαλύτερη από 25 GeV. Και για τις δύο αναλύσεις απατώνται φωτόνια $p_T > 10GeV$. Η εικόνα 2.6 παρουσιάζει την κατανομή του φωτονίου της

διαδικασίας W+γ ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής. Οι ενεργές διατομές των διαδικασιών μετρήθηκαν ως εξής[12]:

- $\sigma(pp \to W\gamma + X, W \to l\nu) = 56.3 \pm 5.0(stat.) \pm 5.0(syst.) \pm 2.3(lumi.)\, pb$
- $\sigma(pp \to Z\gamma + X, Z \to ll) = 9.4 \pm 1.0(stat.) \pm 0.6(syst.) \pm 0.4(lumi.)\, pb$

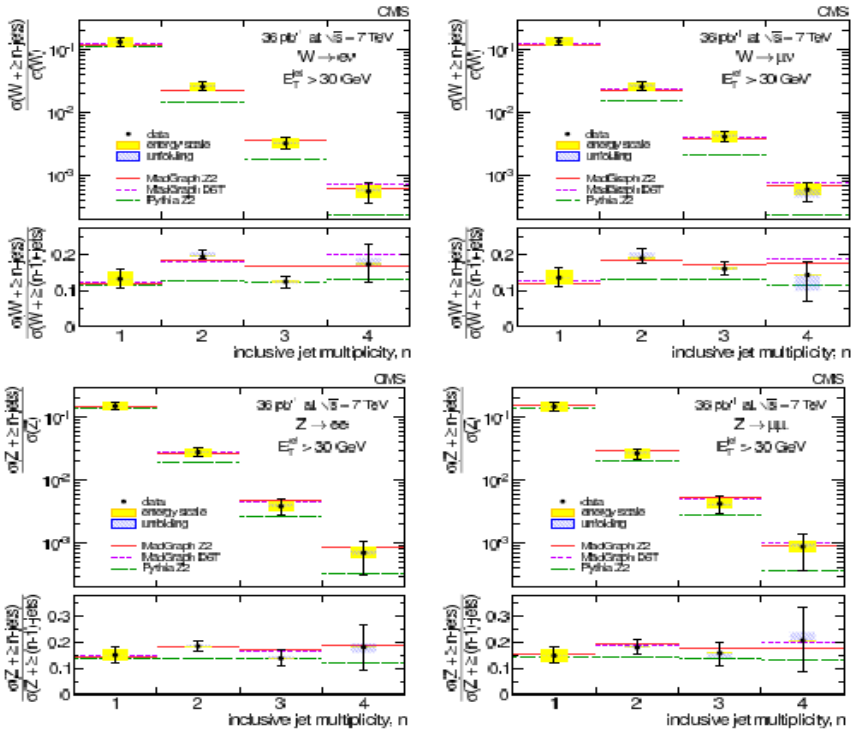


Εικόνα 2.6 Η κατανομή των φωτονίων στην διαδικασία W+γ.

Η παραγωγή μποζονίων W και Z σε συνδυασμό με αδρονικούς πίδακες, επιτρέπει τον έλεγχο των υπολογισμών σε τάξη NLO της QCD, που χρησιμοποιείται ως υπόβαθρο για την έρευνα σχετικά με το μποζόνιο Higgs, την νέα φυσική και τις έρευνες που σχετίζονται με το top. Τα κριτήρια επιλογής των W και Z είναι ίδια με τα κριτήρια που τίθενται κατά την μέτρηση της ενεργού διατομής. Για τους πίδακες επιβάλλεται την επιλογή μόνον όσων έχουν $p_T > 30GeV$ [13]. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν για να επαλειφθεί η επίδραση του ανιχνευτή. Για να μειωθούν τις συστηματικές αβεβαιότητες, υπολογίσαμε κλάσματα των ενεργών διατομών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.7 ως συνάρτηση του αριθμού των πιδάκων. Τα θεωρητικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν με το λογισμικό MadGraph.

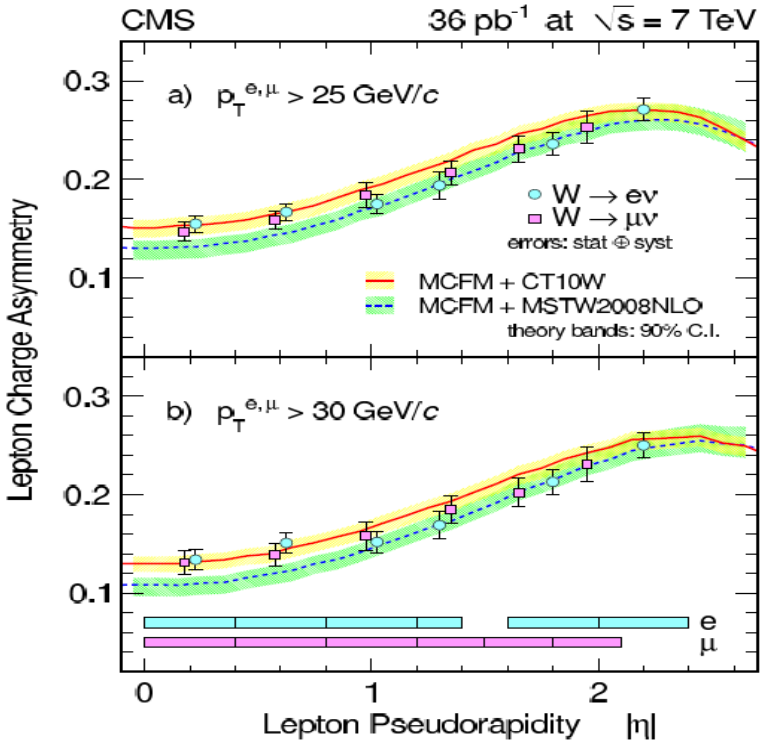
Δύο μελέτες με ξεχωριστό ενδιαφέρον, είναι η παραγωγή Z και πιδάκων εκ των οποίων τουλάχιστον ένας πίδακας έχει χαρακτηριστεί ως b quark και η παραγωγή W σε συνδυασμό με c quark.. Η μελέτη των γεγονότων Z+b είναι σημαντική γιατί επιτρέπει την άντληση πληροφοριών για δύο διαφορετικούς μηχανισμούς παραγωγής: ένα ζευγάρι από b παράγεται από σκεδάσεις quark με quark ή gluon με gluon, ενώ ένα b μόνο του παράγεται σε επίπεδο παρτονίων[14]. Η μελέτη των γεγονότων W+c είναι σημαντική γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις κατανομές του strange και του anti-strange στο πρωτόνιο[15].

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ασυμμετρία φορτίου κατά μήκος της δέσμης, που παρατηρείται κατά την παραγωγή του W. Η μελέτη της παρέχει πληροφορίες για την διαφορά μεταξύ των πυκνοτήτων των quark και των anti-quark[16]. Στο CMS μελετήθηκε ο λόγος W^+/W^- για να απαλειφθούν οι συστηματικές αβεβαιότητες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.8.

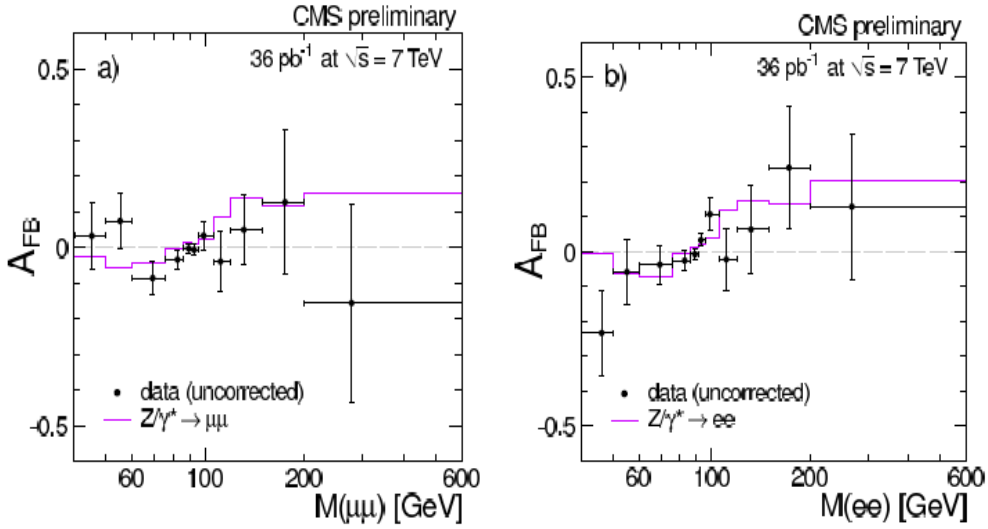


Εικόνα 2.7 Οι κοινωνικοποιημένες ενεργές διατομές ως συνάρτηση του αριθμού των πιδάκων. Τα επάνω διαγράμματα αντιστοιχούν στα W και τα κάτω στα Z. Τα αριστερά διαγράμματα είναι για την διάσπαση σε ηλεκτρόνιο και τα δεξιά σε μιόνιο.

Η σύζευξη των φερμιονίων με τα μποζόνια βαθμίδας εξαρτάται άμεσα από την γωνία Weinberg. Η γωνία Weinberg μετράται κυρίως από τις εξής διαδικασίες: $u\bar{u}, d\bar{d} \to \gamma^* / Z \to \mu^- \mu^+$ μελετώντας τα δεδομένα δύο μιονίων[17]. Το αποτέλεσμα είναι $\sin^2 \theta_{eff} = 0.2278 \pm 0.002(stat.) \pm 0.0025(syst.)$ και είναι σε συμφωνία με τις προβλέψεις του Κ.Π. και με τα αποτελέσματα από προηγούμενα πειράματα. Από την διαδικασία $\gamma^* / Z \to \mu^- \mu^+, e^+ e^-$ μετράμε και την forward-backward ασυμμετρία ως συνάρτηση της μάζας, μέτρηση που είναι ευαίσθητη σε σήμα νέας φυσικής[18]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.8 Η ασυμμετρία φορτίου του λεπτονίου από την διάσπαση του W. Στην εικόνα a) απαιτήσαμε οι ενέργειες των λεπτονίων να είναι πάνω από 25GeV ενώ στην εικόνα b) πάνω από 30GeV.

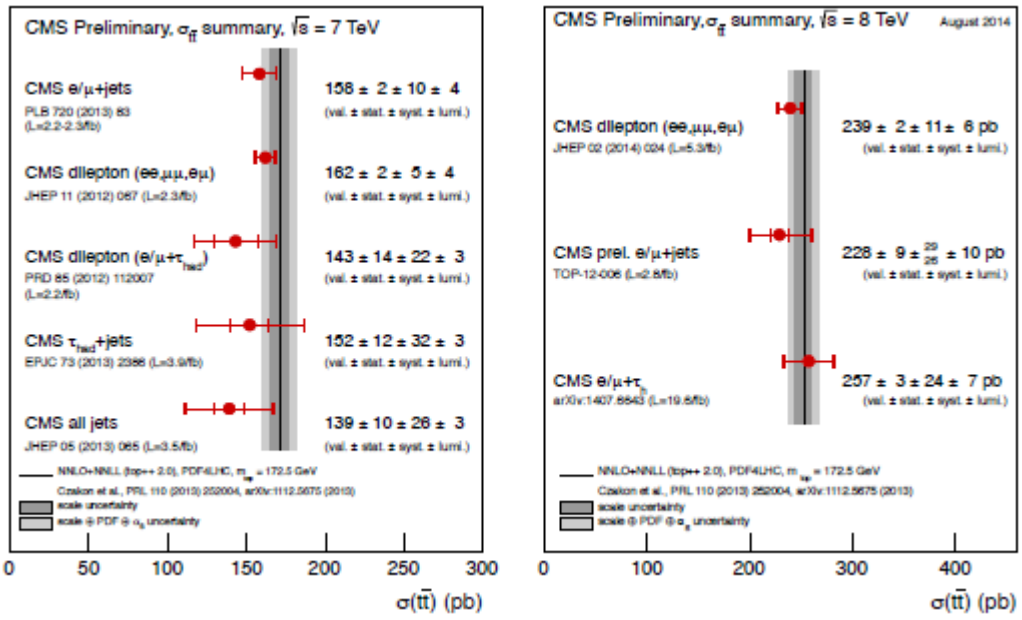


Εικόνα 2.9 Η ασυμμετρία forward-backward για a) ηλεκτρόνια αντιθέτου φορτίου b) μιόνια αντίθετου φορτίου.

2.3 Αποτελέσματα της μελέτης του top

Το top quark είναι το quark με την μεγαλύτερη μάζα. Λόγω της μεγάλης μάζας του διασπάται μέσα σε χρονικό διάστημα 5×10^{-25}s, δηλαδή πριν την αδρονοποίηση του, και έτσι επιτρέπει την μελέτη των ιδιοτήτων του (όπως σπίν ή φορτίο). Το top εξαιτίας της μεγάλης μάζας του, παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό των διορθώσεων της μάζας του Higgs. Επίσης τα top quarks παρέχουν πληροφορίες για τις διαδικασίες της QCD. Η μελέτη των γεγονότων top συνεισφέρει στον διαχωρισμό μεταξύ διαφόρων διαταραχτικών προσεγγίσεων και στον καθορισμό παραμέτρων της QCD. Στο Κ.Π. τα top διασπώνται κυρίως σε W και b. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η μεγάλη τιμή του όρου V_{tb} του πίνακα CKM. Η διάσπαση του W σε λεπτόνια ή quark διαχωρίζει τα κανάλια διάσπασης του top. Στο LHC η παραγωγή των top συμβαίνει κατά κύριο λόγο μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Επίσης μία άλλη διαδικασία παραγωγής

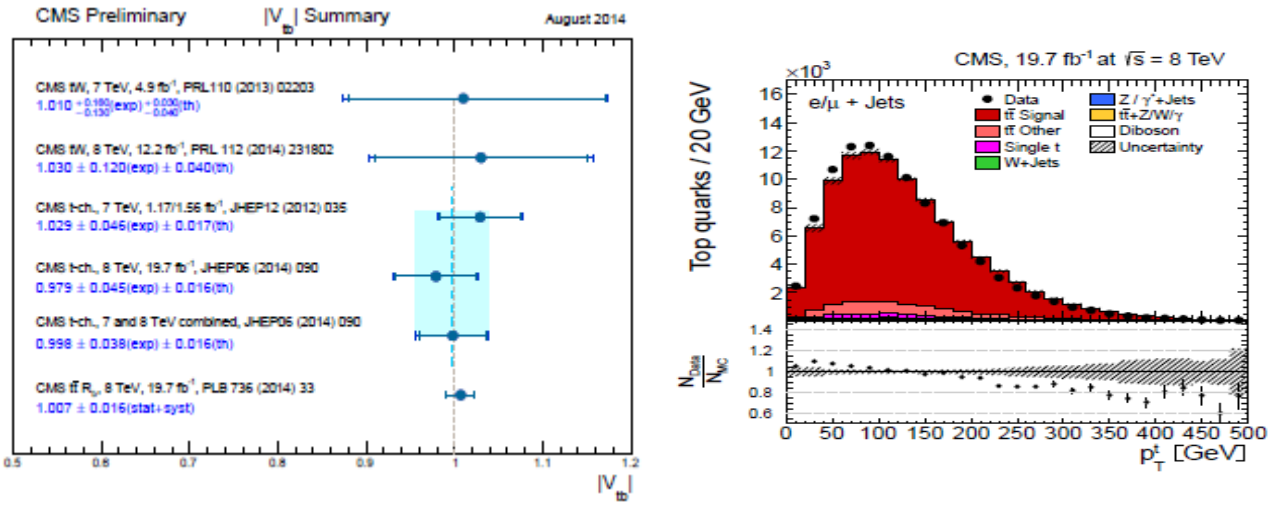
των top είναι μέσω της ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης. Κατά την λειτουργία του LHC, στο CMS παρήχθησαν περίπου πέντε εκατομμύρια top, εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος επιλέχτηκε από τον σκανδαλιστή σωστά και αποθηκεύτηκε. Κατά την διάσπαση του top αναμένομε δύο πίδακες που προέρχονται από τα b quarks. Χαρακτηριστικό των b είναι ο μεγάλος χρόνος ζωής τους που τους επιτρέπει να κινηθούν πριν διασπαστούν. Επομένως περιμένουμε οι πίδακες των b να απέχουν λίγο από το πραγματικό σημείο της αλληλεπίδρασης. Στην εικόνα 2.10 βλέπουμε την μέτρηση της ενεργούς διατομής ενός ζεύγους top στο CMS για 7 και 8 TeV[19]. Επίσης παρατηρείται και ο θεωρητικός υπολογισμός για κάθε μία από τις ενέργειες. Η ενεργός διατομή του ζεύγους των top μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί η τιμή της σταθεράς σύζευξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης a_s. Η σταθερά εξαρτάται από την μάζα του top. Παίρνοντας την μάζα ίση με $173.2 \pm 1.4 GeV$ η σταθερά σύζευξης έχει την τιμή $a_s = 0.1151^{+0.0028}_{-0.0027}$. Έγιναν λεπτομερείς μελέτες της διαφορικής ενεργούς διατομής ως συνάρτηση της p_T των σωματιδίων των τελικών καταστάσεων αλλά και άλλων μεταβλητών όπως το βαθμωτό άθροισμα της ενέργειας των σωματιδίων στα γεγονότα. Επίσης, μετρήθηκαν οι κατανομές των πιδάκων, που συμμετέχουν στα γεγονότα των top για τα κανάλια λεπτονίων+πιδάκων και διλεπτονίων. Ανάμεσα στα πιο ενδιαφέροντα ευρήματα συγκαταλέγεται η πιο απότομη κλίση της κατανομής της εγκάρσιας ορμής του top σε σχέση με την θεωρητική πρόβλεψη[20]. Η διαφορά ανάμεσα στα δεδομένα και την θεωρία εξετάζεται ακόμα. Το CMS μελέτησε γεγονότα ενός ζεύγους top και ενός ακόμα σωματιδίου στην τελική κατάσταση $t\bar{t} + X$ όπου $X = b\bar{b}$, Z, W ή γ [21]. Αυτά τα γεγονότα των top είναι σημαντική πηγή υπόβαθρου για διάφορες αναλύσεις μία εκ των οποίων είναι και η ανάλυση του Higgs, και συγκεκριμένα όταν το Higgs παράγεται μαζί με ένα ζεύγος top.



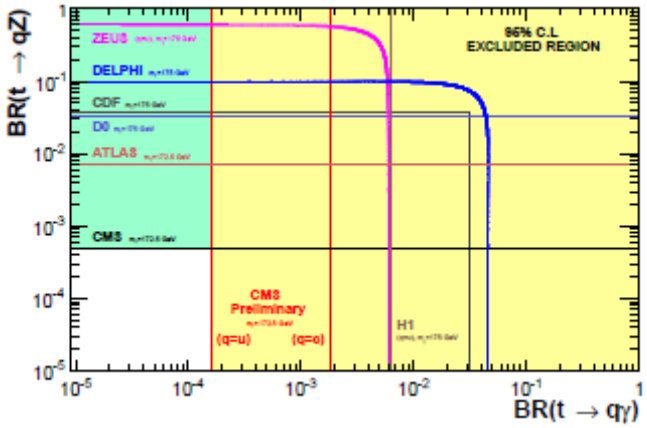
Εικόνα 2.10 Η ενεργός διατομή του ζεύγους των top για 7 TeV(αριστερά) και 8TeV(δεξιά).

Οι διαδικασίες του Κ.Π. που παράγουν ένα top ανήκουν στην ηλεκτρασθενή αλληλεπίδραση. Αναλόγως με το εάν το μποζόνιο W είναι χωροειδές, χρονοειδές ή πραγματικό μετρήθηκαν διαφορετικές ενεργές διατομές. Η ενεργός διατομή για χωροειδή είναι $83.6 \pm 2.3 \pm 7.4\, pb$, για πραγματικά $23.4 \pm 5.4\, pb$ ενώ για τα χρονοειδή τέθηκε ένα πάνω όριο στην τιμή $11.5\, pb$ [22]. Όλες οι τιμές είναι σε συμφωνία με τις προβλέψεις του Κ.Π.. Η μελέτη των top επιτρέπει τον καθορισμό του στοιχείου V_{tb} του πίνακα CKM, που περιγράφει το σθένος της σύζευξης ανάμεσα στα W, t και b. Στην εικόνα 2.11 (δεξιά) μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα[23].

Εάν τα top quarks είναι σωματίδια με σπιν ½ και συμπεριφέρονται όπως προβλέπει το Κ.Π., τότε πρέπει να μην είναι πολωμένα όταν παράγονται σε ζευγάρια, και τα σπιν τους πρέπει να συσχετίζονται. Αυτό το στοιχείο μπορεί να ελεγχθεί με την μέτρηση της γωνιακής κατανομής των λεπτονίων που προέρχονται από διασπάσεις του W. Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως άνω όρια για νέες διεργασίες φυσικής με ανώμαλες συζεύξεις που οδηγούν σε αλλαγή των κατανομών[24](Εικόνα 2.11 Αριστερά). Μελετήθηκε και η πόλωση των top από διαδικασίες που παράγουν ένα top μόνο και βρέθηκε σε συμφωνία με αυτό που περιμέναμε από το Κ.Π.[25]. Τα Flavour-Changing Neutral Currents είναι μία πολύ ασθενής διαδικασία του Κ.Π. που προβλέπεται μόνο πέρα από το tree level. Ακόμα και εκεί οι πιθανότητες είναι πολύ μικρές. Μία εύρεσή τους με μεγαλύτερες πιθανότητες θα ήταν ένδειξη νέας φυσικής. Τα αποτελέσματα του CMS για αυτήν την έρευνα φαίνονται στην εικόνα 2.12[26].



Εικόνα 2.11 Δεξιά: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της V_{tb} για παραγωγή ενός top και ενός ζεύγους Αριστερά: Η εγκάρσια ορμή του top.

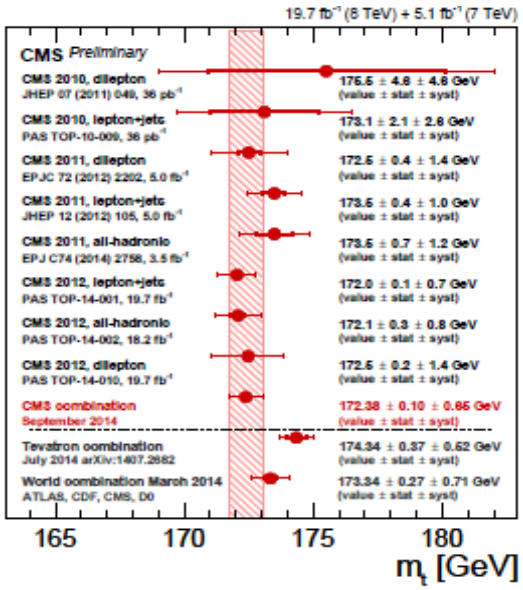


Εικόνα 2.12 Τα άνω όρια των διαδικασιών t→Zq και t→qγ που ερευνήθηκαν στα πλαίσια της αναζήτησης των Flavour-Changing Neutral Currents.

Η μάζα του top είναι μία πολύ βασική παράμετρος του Κ.Π. και επηρεάζει ένα μεγάλο εύρος των υπολογισμών των διορθώσεων πρώτης τάξης. Πειραματικά η μάζα του top μετράται μέσω της ανακατασκευής των προϊόντων της διάσπασής του. Το CMS μέτρησε την μάζα του top από γεγονότα $t\bar{t}$, στα κανάλια διλεπτονίων, λεπτονίων + πιδάκων και μόνο πιδάκων. Η εικόνα 2.13 δείχνει την ανακατασκευασμένη μάζα του top με δεδομένα που έχουν ενέργεια 8TeV. Συνδυάζοντας όλες τις μετρήσεις της μάζας του top του CMS, η τιμή της μάζας υπολογίστηκε $172.2 \pm 0.1 \pm 0.7 GeV$ [27].

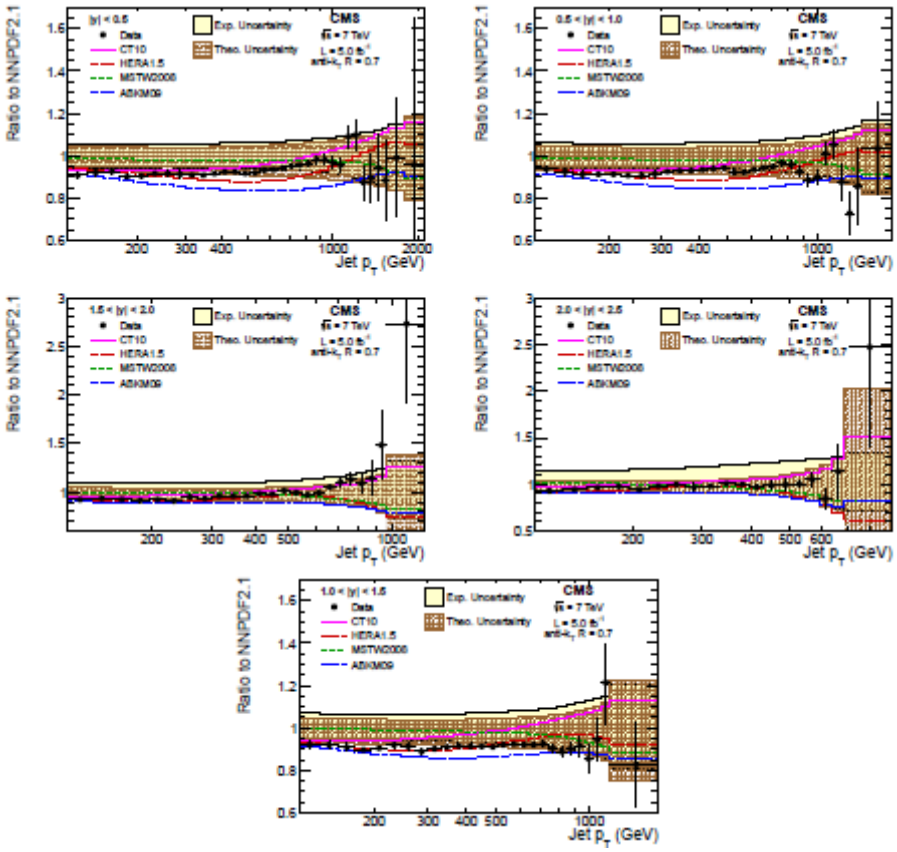
2.4 Αποτελέσματα της QCD

Οι μετρήσεις της QCD στα πειράματα του LHC είναι σημαντικές επειδή επιτρέπουν τον έλεγχο της διαταραχτικής QCD σε ένα νέο εύρος ενεργειών. Επίσης μέσω αυτών των μετρήσεων μπορεί να καθοριστεί η σταθερά σύζευξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης a_s, να αντληθούν πληροφορίες για τα PDFs του πρωτονίου και να ρυθμιστούν οι παράμετροι των μοντέλων που αναπαριστούν το Κ.Π. ώστε να είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με τα δεδομένα. Επίσης είναι πηγή υπόβαθρου για πολλές αναλύσεις. Ακόμα είναι ευαίσθητες στην ύπαρξη νέας φυσικής.



Εικόνα 2.13 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μάζας του top στα διάφορα πειράματα του CMS.

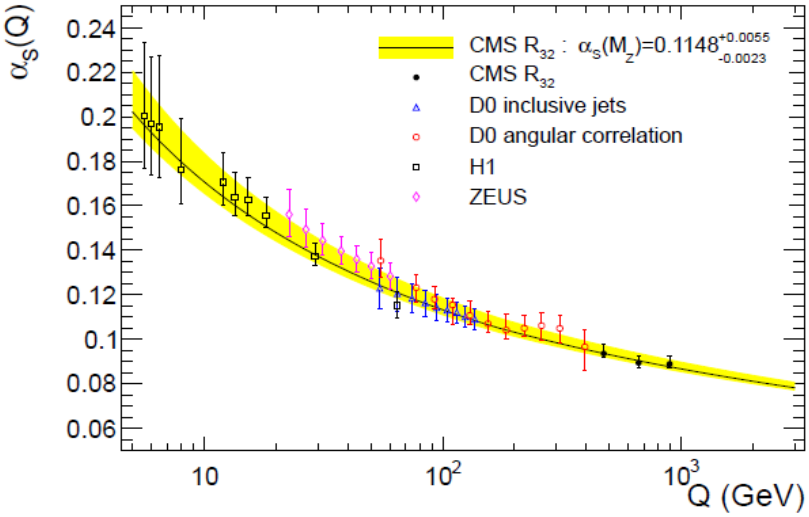
Οι πίδακες ανακατασκευάζονται με χρήση του αλγορίθμου anti-kt και πρέπει να ικανοποιούν την απαίτηση $0.5 \leq \Delta R \leq 0.7$ [28]. Τα δεδομένα που εισάγονται στον αλγόριθμο είναι οι τετραορμές των ανακατασκευασμένων σωματιδίων όπως δίνονται από τον αλγόριθμο particle flow, που συνδυάζει δεδομένα από αρκετά υποσυστήματα του ανιχνευτή. Η αβεβαιότητα στην εγκάρσια ορμή των πιδάκων είναι της τάξης του 1%, για πίδακες με ορμή $p_T > 100 GeV$ [29]. Οι μετρήσεις της ενεργούς διατομής των πιδάκων και των διπιδάκων χρησιμοποιούνται για έλεγχο των προβλέψεων της διαταρακτικής QCD, την θέσπιση όρια στα PDFs του πρωτονίου και για την ύπαρξη τυχόν αποκλίσεων από το Κ.Π.. Τα αποτελέσματα για διαφορετικά εύρη της οκύτητας φαίνονται στην εικόνα 2.14[30]. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα θεωρητικά προβλεπόμενα.



Εικόνα 2.14 Η συνολική ενεργός διατομή ως συνάρτηση της p_T για διάφορες τιμές ωκύτητας.

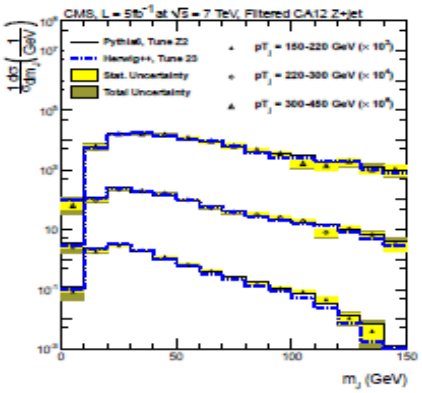
Η μέτρηση της σταθεράς a_s είναι σημαντική, όχι μόνο γιατί είναι η θεμελιώδης σταθερά σύζευξης της QCD, αλλά και γιατί η τιμή της, σε γεγονότα που παρουσιάζουν μεγάλη μεταφορά ορμής, επηρεάζεται από την ύπαρξη θεωριών όπως η υπερσυμμετρία. Το CMS έχει παρουσιάσει μία μέτρηση της a_s χρησιμοποιώντας τον λόγο των γεγονότων με δύο και τρεις πίδακες[31]. Το πλεονέκτημα του υπολογισμού κλασμάτων είναι ότι με αυτόν τον τρόπο αφαιρούνται οι θεωρητικές και οι πειραματικές αβεβαιότητες. Στην εικόνα 2.15 βλέπουμε τα αποτελέσματα.

Η μάζα των πιδάκων είναι σημαντική γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει τους πίδακες που προέρχονται από σωματίδια από αυτούς που προέρχονται από την QCD. Επίσης έχουν αναπτυχθεί τεχνικές με τις οποίες παρατηρείται οι εσωτερική δομή των πιδάκων. Με αυτούς τους τρόπους διαχωρίζονται οι πίδακες που προέρχονται από διάσπαση σωματιδίων από αυτούς που προέρχονται από τα gluons και τα quarks που έχουν μεγάλη μάζα. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με την χρήση του αλγορίθμου Cambridge-Aachen και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.16[32]. Τα πειραματικά δεδομένα είναι σε συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις.

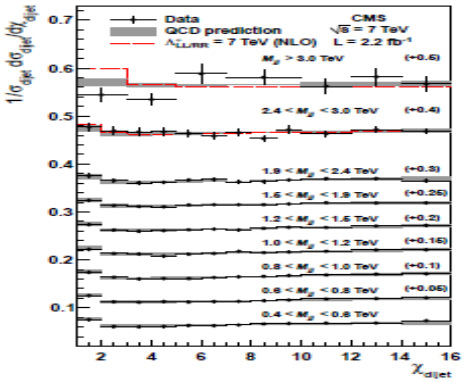


Εικόνα 2.15 Η τιμή της σταθεράς σύζευξης των ισχυρών αλληλεπιδράσεων ως συνάρτηση της μεταφερόμενης ορμής Q.

Η γωνιακή κατανομή των διπιδάκων περιμένουμε να είναι επίπεδη για την QCD και να παρουσιάζει αποκλίσεις με την ύπαρξη νέας φυσικής. Το προτέρημα μίας τέτοιας μελέτης είναι οι σχετικά μικρές αβεβαιότητες που παρουσιάζει[33]. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στην εικόνα 2.17 και δεν παρατηρείται διαφορά από τις προβλέψεις του Κ.Π.



Εικόνα 2.16 Η ενεργός διατομή ως συνάρτηση της μάζας του πίδακα, χρησιμοποιώντας γεγονότα Z+πίδακες και τεχνικές διαχωρισμού των πιδάκων.



Εικόνα 2.17 Η γωνιακή κατανομή για διάφορες τιμές της μάζας των διπιδάκων.

2.5 Ανακάλυψη του μποζονίου Higgs και παρατήρηση των διασπάσεων του

Τον Ιούλιο του 2012 τα πειράματα ATLAS και CMS ανακοίνωσαν την ανακάλυψη ενός σωματιδίου που είναι συμβατό με το μποζόνιο Higgs του Κ.Π.. Οι μετρήσεις που έγιναν μέχρι στιγμής είναι σε συμφωνία με

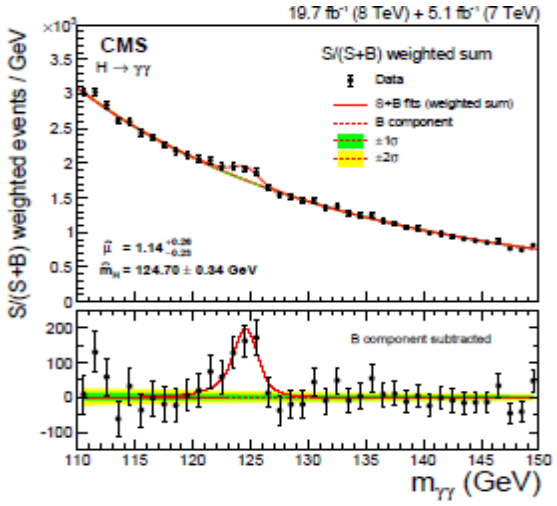
τις θεωρητικές τιμές που προβλέπει το Κ.Π., ωστόσο δεν μπορεί να αποκλειστεί ακόμα το ενδεχόμενο να προέρχεται από νέα φυσική, οπότε οι μελέτες συνεχίζονται. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται προέρχονται από δεδομένα που συλλέχτηκαν το 2011 και το 2012 με ενέργεια του κέντρου μάζας 7 TeV και 8 TeV αντίστοιχα. Οι κύριες διαδικασίες παραγωγής του μποζονίου Higgs είναι μέσω gluon-gnluon fusion (ggF), vector boson fusion (VBF) καθώς και η παραγωγή σε συνδυασμό είτε με ένα διανυσματικό μποζόνιο (VH) όπου το διανυσματικό μποζόνιο είναι W ή Z και είτε με top quark (ttH). Τα πέντε πιο ευαίσθητα κανάλια των διασπάσεων του Higgs είναι σε γγ, σε 4 λεπτόνια, σε WW, σε ττ και σε bb[34].

2.5.1 H→γγ

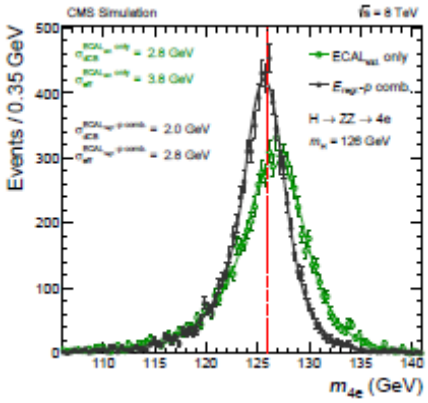
Το κανάλι διάσπασης $H \to \gamma\gamma$ χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο αριθμό γεγονότων σήματος. Το μειονέκτημα αυτού του καναλιού είναι η ύπαρξη μεγάλου αριθμού γεγονότων υποβάθρου, που οδηγεί σε μικρή τιμή του κλάσματος του αριθμού των γεγονότων σήματος προς τον αντίστοιχο αριθμό γεγονότων υποβάθρου. Το συγκεκριμένο κανάλι προσφέρει υψηλής ακρίβειας μετρήσεις μάζας και συνεισφέρει σε μέγιστο βαθμό στην μέτρηση της μάζας του Higgs. Η επιλογή των γεγονότων δύο φωτονίων γίνεται με διάφορα κριτήρια, που στοχεύουν στους διαφορετικούς τρόπους παραγωγής[35]. Για την παραγωγή μέσω VBF απαιτείται να υπάρχουν αδρονικοί πίδακες μεγάλης οκύτητας. Για την παραγωγή μέσω VH απαιτούνται λεπτόνια ή λεπτόνια και χαμένη ενέργεια, ενώ για τον τρόπο ttH απαιτείται τοπολογία που ταιριάζει με ένα ζευγάρι top quark. Ανεξάρτητα του τρόπου παραγωγής, απαιτούνται δύο φωτόνια, με αναλλοίωτη μάζα $m_{\gamma\gamma}$ πάνω από ένα όριο. Το υπόβαθρο σε αυτό το κανάλι προέρχεται από γεγονότα που περιέχουν φωτόνια όπως γ + πίδακες, διπίδακες και το συνεχές υπόβαθρο γγ. Υπολογίζοντας την αναλλοίωτη μάζα των φωτονίων μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μία περίσσεια γεγονότων για τιμές $m_{\gamma\gamma} \approx 125 GeV$ (Εικόνα 2.18). Παρατηρούνται περισσότερα γεγονότα Higgs από αυτά που θεωρητικά προβλέπει το Κ.Π.. Η διαφορά όμως είναι εντός μίας τυπικής απόκλισης σ.

2.5.2 H→4l

Ο ρυθμός της διάσπασης $H \to 4l$ είναι μικρός σε σχέση με τον ρυθμό άλλων καναλιών, ωστόσο έχει αισθητά μικρότερο υπόβαθρο. Και σε αυτό το κανάλι η μέτρηση της αναλλοίωτης μάζας είναι εξαιρετικά ακριβής, και συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην μέτρηση τη μάζας του Higgs (Εικόνα 2.19). Η συγκεκριμένη ανάλυση απαιτεί την ύπαρξη τεσσάρων λεπτονίων[36]. Υπάρχουν και επιπλέον απαιτήσεις που στοχεύουν στους διαφορετικούς τρόπους παραγωγής. Η σημαντικότερη πηγή συνεχούς υποβάθρου προέρχεται από την παραγωγή ZZ^*. Το υπόβαθρο εκτιμάται από διαδικασίες προσομοίωσης και ελέγχεται συγκρίνοντας το με συγκεκριμένες περιοχές της κατανομής της μάζας. Και σε αυτό το κανάλι παρατηρούνται στην περιοχή των 125 GeV περισσότερα γεγονότα από τις προβλέψεις του Κ.Π. χωρίς την παρουσία του μποζονίου Higgs.



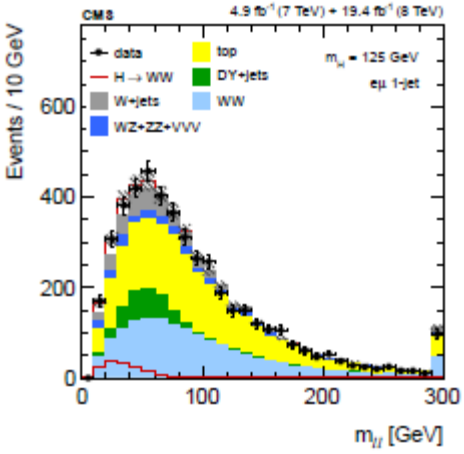
Εικόνα 2.18 Η κατανομή της $m_{\gamma\gamma}$.



Εικόνα 2.19 Η κατανομή της μάζας τεσσάρων λεπτονίων.

2.5.3 H→WW

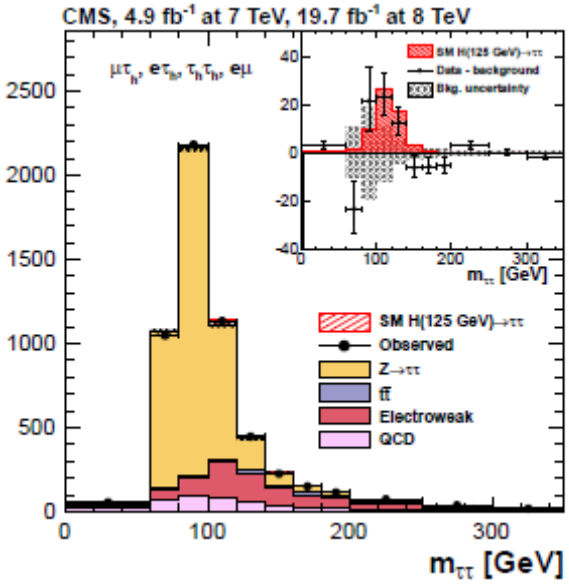
Η διάσπαση του Higgs σε δύο W έχει το πλεονέκτημα ότι δίνει σχετικά μεγάλο αριθμό γεγονότων. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτού του καναλιού είναι η χαμηλή ακρίβεια στην μέτρηση της μάζας των δύο W και επομένως σε πολλά γεγονότα του συνεχούς υποβάθρου WW τα οποία δεν μπορούν να διαχωριστούν από το σήμα. Η χαμηλή ανάλυση στην μέτρηση της μάζας προέρχεται από την ύπαρξη νετρίνων κατά την διάσπαση του W. Επίσης υπάρχουν πηγές υποβάθρου που μπορούν να εκτιμήθούν και προέρχονται από τα γεγονότα W +πιδάκων αλλά και την παραγωγή ενός ζεύγους top[37]. Το υποκανάλι διάσπασης με την μεγαλύτερη ευαισθησία είναι αυτό που έχει τελική κατάσταση $e\nu\mu\nu$ και μικρό αριθμό πιδάκων. Ο κυριότερος τρόπος παραγωγής είναι ο ggF. Το ιστόγραμμα της μάζας αυτού του υποκαναλιού φαίνεται στην εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.20 Η κατανομή της αναλλοίωτης μάζας για γεγονότα ενός πίδακα.

2.5.4 H→ττ

Η ανάλυση που βασίζεται στην διάσπαση $H \to \tau\tau$ είναι ανάμεσα στις πολυπλοκότερες αναλύσεις. Η αιτία αυτού είναι η ύπαρξη πολλών τρόπων διασπάσεων των tau, καταλήγουν στα εξής κανάλια ee, $e\mu$, $\mu\mu$, $e\tau_h$, $\mu\tau_h$ και $\tau_h\tau_h$ όπου τ_h είναι η αδρονική διάσπαση του tau, με τα νετρίνα να παραλείπονται. Για αυτά τα κανάλια μπορούμε να έχουμε κατηγορίες ανάλογα με την διαδικασία παραγωγής. Ανάμεσα στους τρόπους παραγωγής αυτού του καναλιού είναι οι VBF, VH και ttH[38]. Η αναλλοίωτη μάζα $m_{\tau\tau}$ υπολογίζεται με την χρήση κινηματικών μεταβλητών από όλη την διαδικασία διάσπασης λόγω του μεγάλου αριθμού των νετρίνων που διαφεύγουν. Το κύριο υπόβαθρο προέρχεται από διασπάσεις $Z/\gamma^* \to \tau\tau$. Σε αυτό το κανάλι δεν έχουμε ανακάλυψη του Higgs αλλά ένδειξη στο επίπεδο των 3.2σ (Εικόνα 2.21).



Εικόνα 2.21 Η κατανομή της $m_{\tau\tau}$.

2.5.5 H→bb

Το κανάλι $H \to b\bar{b}$ είναι εξαιρετικά δύσκολο να μελετηθεί παρόλο που το μεγαλύτερο κλάσμα των Higgs διασπώνται σε αυτό. Η αιτία που συμβαίνει αυτό προέρχεται από το μεγάλο υπόβαθρο της παραγωγής των $b\bar{b}$ από τις διαδικασίες της QCD. Η παραγωγή του μέσω του μηχανισμού ggF δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί, ενώ μέσω VBF τα πράγματα είναι ελάχιστα καλύτερα. Έτσι πρέπει να στηριχθεί η συγκεκριμένη ανάλυση[39], στα γεγονότα του τρόπου VH ενώ ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν και του ttH. Το υπόβαθρο στο συγκεκριμένο κανάλι προέρχεται από πολλές πηγές όπως Z, W, tt, VV και γεγονότα πολλών πιδάκων. Στο CMS η διαδικασία παρατηρήθηκε με 2.1σ.

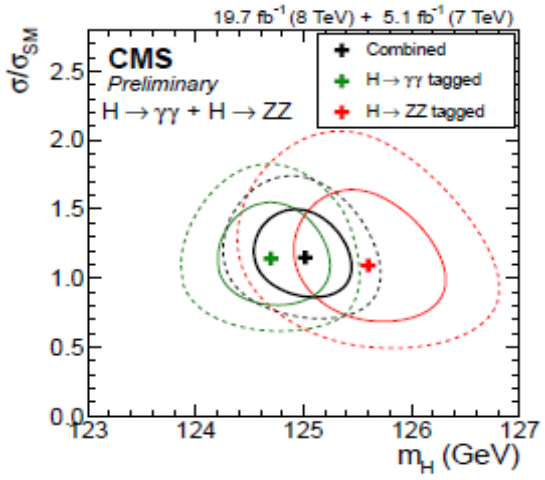
2.6 Μελέτη των ιδιοτήτων του μποζονίου Higgs και συμβατότητα με το Κ.Π.

Η ανακάλυψη ενός σωματιδίου που είναι μποζόνιο με μάζα περί τα 125GeV έχει επηρεάσει καταλυτικά το LHC. Για να επιβεβαιώσουμε ότι όντως είναι το σωματίδιο του Higgs του Κ.Π. πρέπει να μετρηθούν οι κβαντικοί αριθμοί που το χαρακτηρίζουν και να δούμε κατά πόσο είναι σε συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις. Είναι μεγάλης σημασίας η ανίχνευση των σωματιδίων στα οποία διασπάται και η πιθανότητα με την οποία συμβαίνει η διάσπαση. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μέτρηση των branching fractions των φερμιονίων, που είναι δύσκολες αλλά αναμένεται να επωφεληθούν στην μετά LS1 εποχή. Τέτοιες μετρήσεις είναι αναγκαίες για να διερευνηθεί ο ρόλος του μποζονίου Higgs στην δημιουργία της μάζας των φερμιονίων και κατά ποσό συμβαδίζει με το Κ.Π.. Μία μεγάλη απόκλιση από τις προβλέψεις του Κ.Π. ενδέχεται να φανερώνει την ύπαρξη νέας φυσικής. Στο CMS έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στον βέλτιστο δυνατό σκανδαλισμό των τελικών καταστάσεων του Higgs.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων του Higgs, για διάφορους τρόπους δημιουργίας και διάσπασης, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για τις ιδιότητες του μποζονίου. Για κάθε ιδιότητα που μετράται πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός συνδυασμός καναλιών. Ανάμεσα στις ποσότητες που μετρήθηκαν είναι η μάζα, το πλάτος και η σύζευξη του Higgs με τα υπόλοιπα σωματίδια του Κ.Π..

2.6.1 Μάζα του H

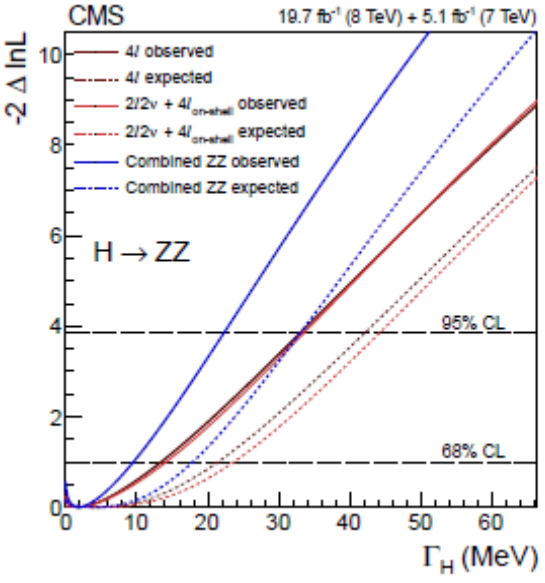
Η μάζα του μποζονίου Higgs μετράται χρησιμοποιώντας γεγονότα από διασπάσεις $H \to 4l$ και $H \to \gamma\gamma$. Και στα δύο κανάλια η μάζα μπορεί να ανακατασκευαστεί με μεγάλη ακρίβεια. Στην εικόνα 2.22 βλέπουμε τα αποτελέσματα. Η μάζα μετρήθηκε από το CMS ίση με $m_H = 125.03^{+0.26}_{-0.27}(stat)^{+0.13}_{-0.15}(syst)GeV$ [40].



Εικόνα 2.22 Η μέτρηση της μάζας του μποζονίου Higgs.

2.6.2 Πλάτος του Η

Το πλάτος που προβλέπει το Κ.Π. για το μποζόνιο Higgs είναι περίπου 4MeV. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να το μετρηθεί πειραματικά. Μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αναλύοντας το πλάτος των κατανομών των μαζών $m_{\gamma\gamma}$, m_{4l}. Αυτή η μέθοδος περιορίζεται από την πειραματική διακριτική ικανότητα που είναι τρεις τάξεις μεγαλύτερη από το πλάτος που προβλέπει το Κ.Π., δηλαδή 2.4GeV. Επίσης, μπορεί να μετρηθεί και έμμεσα συγκρίνοντας γεγονότα διάσπασης στον φλοιό μάζας με γεγονότα εκτός του φλοιού μάζας, του καναλιού διάσπασης Higgs σε τέσσερα λεπτόνια[41]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέτρηση έχει οχτώ φορές μεγαλύτερη τιμή από την προβλεπόμενη (Εικόνα 2.23).

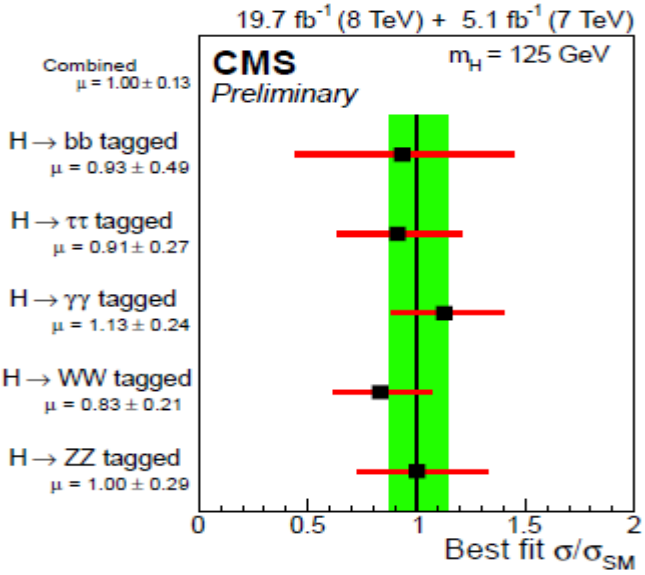


Εικόνα 2.23 Το άνω όριο του πλάτους του Higgs από την διαδικασία H→4 λεπτόνια.

2.6.3 Ισχύς σήματος

Η ισχύς σήματος (signal strength) μ ορίζεται ως η μετρούμενη ενεργός διατομή επί το branching ratio[1] μίας διαδικασίας προς την προβλεπόμενη τιμή του Κ.Π. της ίδιας διαδικασίας[40]. Αυτή η ποσότητα είναι σημαντική γιατί επιτρέπει τον έλεγχο της ισχύς του Κ.Π.. Το CMS μέτρησε αυτήν την ποσότητα $\mu = 1.00 \pm 0.13$ άρα βρίσκεται σε συμφωνία με το Κ.Π. (Εικόνα 2.24).

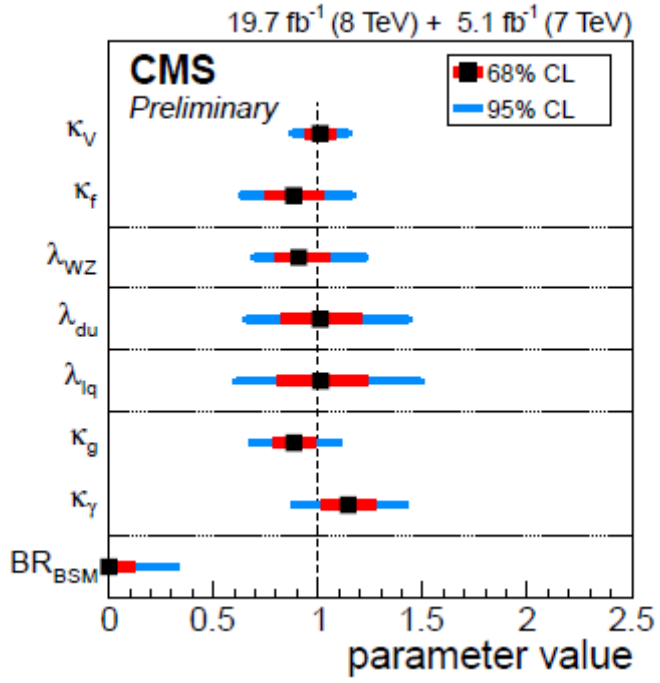
[1] το κλάσμα των γεγονότων των διασπάσεων μίας διαδικασίας δια του συνολικού αριθμού των διασπάσεων



Εικόνα 2.24 Η ισχύς του σήματος μ όπως μετρήθηκε από το CMS.

2.6.4 Σθένος σύζευξης

Οι παράμετροι κ_i της ισχύος της σύζευξης, είναι οι κυριότεροι όροι μίας παραμετροποίησης της σύζευξης του Higgs με ένα σωματίδιο i δια της τιμής που προβλέπει το Κ.Π.. Η λ_{ik} είναι ο λόγος των κ_i και κ_k. Οι μετρήσεις είναι αποτέλεσμα χρήσης ενός μεγάλου υποσυνόλου των αναλύσεων του Higgs. Εξαιτίας των πολλών ελεύθερων παραμέτρων έπρεπε να γίνουν ορισμένες υποθέσεις, όπως ότι το πλάτος του Higgs είναι όσο προβλέπει το ΚΠ.. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στην εικόνα 2.25 και είναι σε συμφωνία με το Κ.Π.[40].



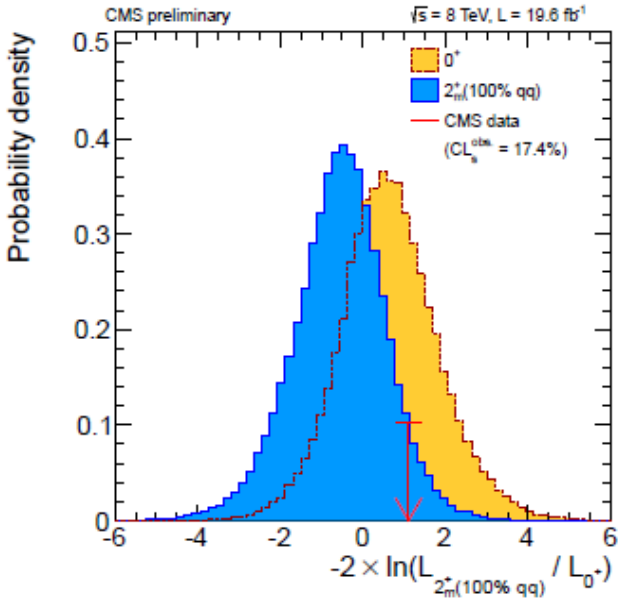
Εικόνα 2.25 Η μέτρηση των παραμέτρων του σθένους σύζευξης.

2.6.5 Μέτρηση του σπιν του Higgs

Η διάσπαση του μποζονίου Higgs σε δύο φωτόνια, υποδηλώνει ότι το σπιν του είναι διαφορετικό από την μονάδα. Αυτό αφήνει δύο δυνατές επιλογές: να έχει σπίν 0 όπως προβλέπει το Κ.Π. ή να έχει σπιν 2. Τα δύο μοντέλα εξετάζονται και συγκρίνονται με την χρήση της μεθόδου test statistic. Σε αυτήν την μέθοδο ορίζουμε ένα q:

$$q = -2\ln\left(\frac{L_{0+bkg}}{L_{2+bkg}}\right) \tag{2.1}$$

Όπου L_{0+bkg} η πιθανότητα να έχουμε σπιν 0 και L_{2+bkg}. Τα αποτελέσματα για τις δύο υποθέσεις φαίνονται στην εικόνα 2.26 με το βέλος να δείχνει την μέτρηση του CMS[44].



Εικόνα 2.26 Τα δύο μοντέλα για το σπίν του Higgs. Το κόκκινο βέλος δείχνει την τιμή της μέτρησης.

Ακόμα και αν το νέο μποζόνιο Higgs στα 125 GeV είναι ακριβώς έτσι όπως περιγράφεται στο Κ.Π. η γενική αίσθηση είναι ότι πρέπει να υπάρχει κάποια νέα φυσική που να εξηγεί την διατήρηση της μάζας του σε σχετικά χαμηλή επίπεδα. Οπότε, συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό η έρευνα για την εύρεση μίας λύσης, όπως η υπερσυμμετρία που να λύνει φυσικά το πρόβλημα της ιεραρχίας. Οι τετραγωνικές αποκλίσεις της μάζας του Higgs ευθύνονται για την απόκλιση της μάζας του στο Κ.Π.. Σημαντικό ρόλο σε αυτόν τον υπολογισμό, παίζουν τα top quarks. Στο πλαίσιο της υπερσυμμετρίας η απόκλιση από τα top αντισταθμίζεται από τα stop quarks, που είναι το υπερσυμμετρικό αντίστοιχο του top. Εξαιτίας του ιδιαίτερα μεγάλου υποβάθρου, που προέρχεται από τα top, η ανακάλυψη τους γίνεται ιδιαιτέρα δύσκολη.

2.7 Υπερσυμμετρία και οι μετρήσεις του CMS

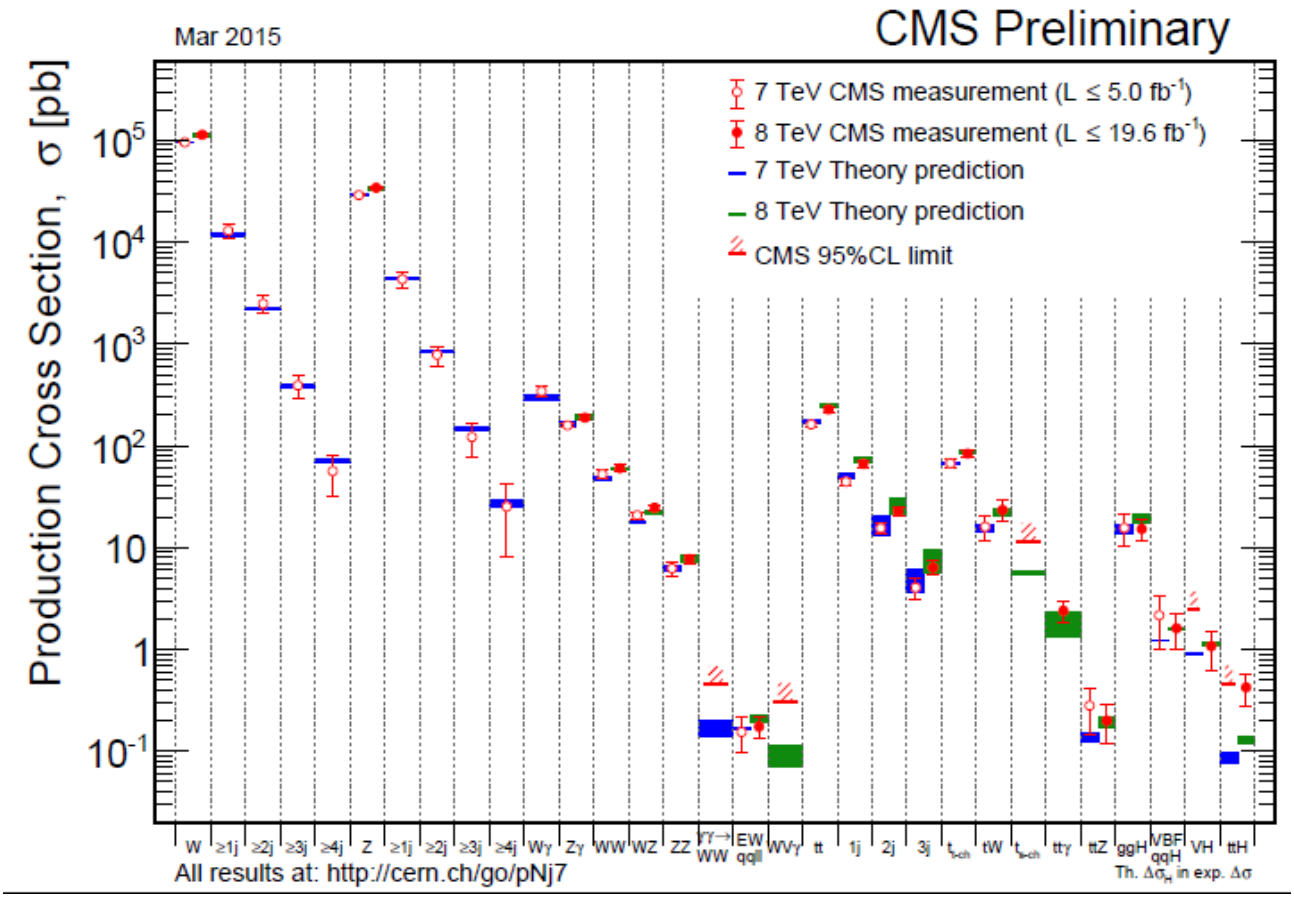
Η υπερσυμμετρία είναι μία υποψήφια θεωρία για την επέκταση του Κ.Π.. Η υπερσυμμετρία εισήχθη με κίνητρο την διατήρηση της μάζας του Higgs σε χαμηλά επίπεδα. Η μάζα του Higgs, εξαιτίας των διορθώσεων πρώτης τάξης, έπρεπε να αποκλίνει τετραγωνικά σε μία θεωρία όπου το Κ.Π. ισχύει μέχρι ένα ορισμένο ενεργειακό επίπεδο. Η λύση που μας παρέχει η υπερσυμμετρία σε αυτό το πρόβλημα, είναι μία ακόμα συμμετρία με την ιδιότητα να «μετατρέπει» τα φερμιόνια σε μποζόνια και το αντίθετο. Η βασική πρόβλεψη της υπερσυμμετρίας είναι ότι για κάθε βαθμό ελευθερίας σωματιδίων, υπάρχει και ένας υπερσυμμετρικών σωματιδίων που το σπίν τους διαφέρει κατά μισό από το σπίν των σωματιδίων του Κ.Π.. Οι γεννήτορες της υπερσυμμετρίας μετατίθενται με τους γεννήτορες της SU(3)×SU(2)×U(1) συμμετρίας του Κ.Π. και της ομάδας Poincare΄. Αν η υπερσυμμετρία δεν είναι διασπασμένη, τότε η μάζα των

υπερσυμμετρικών σωματιδίων έπρεπε να ισούται με την μάζα των κανονικών. Επειδή κάτι τέτοιο δεν έχει παρατηρηθεί υποθέτουμε ότι η υπερσυμμετρία διασπάται. Μία σημαντική φαινομενολογική μελέτη της υπερσυμμετρίας προϋποθέτει την εισαγωγή του ελαχίστου δυνατού αριθμού σωματιδίων και αλληλεπιδράσεων που να αποτρέπει τις τετραγωνικές αποκλίσεις της μάζας. Η θεωρία αυτή ονομάζεται Ελάχιστο Υπερσυμμετρικό Καθιερωμένο Πρότυπο (Minimal Supersymmetric Standard Model-MSSM). Το MSSM χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό ελεύθερων παραμέτρων που φτάνει τις 125.

Ανάλογα με τις υποθέσεις που κάνουμε, καταλήγουμε σε διαφορετικά μοντέλα υπερσυμμετρίας. Δύο πολύ σημαντικά μοντέλα είναι το μοντέλο της ελάχιστης υπερβαρύτητας (mSUGRA) όπου η διάσπαση της υπερσυμμετρίας είναι αποτέλεσμα της βαρυτικής αλληλεπίδρασης και το μοντέλο GMSB όπου η διάσπαση συμβαίνει εξαιτίας πεδίων βαθμίδας. Τα δύο μοντέλα δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Μία σημαντική διαφορά αφορά το LSP. Στη περίπτωση της mSUGRA το LSP είναι το ελαφρύτερο neutralino που είναι το γραμμικός συνδυασμός διάφορων σωματιδίων, ενώ στην περίπτωση του μοντέλου GMSB το LSP είναι το gravitino, που είναι το υπερσυμμετρικό αντίστοιχο του graviton. Για κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα, διάφορες μεταβλητές έχουν διαφορετικές τιμές. Τέλος, υπάρχουν αρκετές διαδικασίες του Κ.Π. που αποτελούν το υπόβαθρο για την έρευνα στη υπερσυμμετρία. Κάποιες από αυτές είναι $t\bar{t}$, $W + h$, $Z + h$ και αδρονικοί πίδακες από διεργασίες της QCD.

Για να διασφαλίσουμε την διατήρηση του βαρυονικού και του λεπτονικού αριθμού χρειάζεται να εισάγουμε έναν επιπλέον κβαντικό αριθμό την ομοτιμία-R (R-Parity). Μπορούμε να φτιάξουμε μοντέλα που να την παραβιάζουν ή να την σέβονται. Στο LHC μελετώνται και τα δύο ενδεχόμενα. Αν απαιτήσουμε την ύπαρξη της ομοτιμίας-R τότε οδηγούμαστε σε ένα πολύ ιδιαίτερο σήμα. Τα υπερσυμμετρικά σωματίδια πρέπει να γεννιούνται σε ζευγάρια και τελικά να διασπώνται στο ελαφρύτερο υπερσυμμετρικό σωματίδιο (LSP) το οποίο το θεωρούμε σταθερό. Από κοσμολογικής άποψης το LSP είναι ένας ιδανικός υποψήφιος για την σκοτεινή ύλη, που αποτελείται από ένμαζα σωματίδια τα οποία αλληλεπιδρούν μόνο ασθενώς αλληλεπίδραση. Ένα χαρακτηριστικό σε αυτό το μοντέλο είναι ότι εξαιτίας της μεγάλης μάζας των LSP η χαμένη ενέργεια αναμένουμε να είναι πολύ μεγάλη.

Δυστυχώς μέχρι σήμερα τόσο το CMS όσο ο ATLAS δεν έχουν κάποια εντοπίσει κάποια ένδειξη Υπερσυμμετρίας ή άλλης νέας Φυσικής. Τα αποτελέσματα του CMS μέχρι στιγμής είναι σε συμφωνία με το Κ.Π. όπως φαίνεται και από την συνολική εικόνα των αναλύσεων (Εικόνα 2.28).



Εικόνα 2.27 Η συνολική επισκόπηση των αναλύσεων. Όπως παρατηρούμε είναι σε συμφωνία με τις προβλέψεις του Κ.Π..

2.8 Μελλοντικές αναλύσεις του CMS στα 13 TeV και το σύστημα σκανδαλισμού

Ενώ το Κ.Π. των ηλεκτρασθενών και των ισχυρών αλληλεπιδράσεων βρίσκεται σε αντιστοιχία με τα πειραματικά δεδομένα, η φυσική που ευθύνεται για την διάσπαση της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας παραμένει ανεπιβεβαίωτη. Στο Κ.Π. ο μηχανισμός Higgs θεωρείται ότι ευθύνεται για την διάσπαση της συμμετρίας. Ένας τέτοιος μηχανισμός εισάγει στην Λαγκρανζιανή μία διπλέτα δύο μιγαδικών βαθμοτών πεδίων από τα οποία ο μόνος βαθμός ελευθερίας που επιβιώνει είναι το μποζόνιο Higgs. Υπάρχουν πολλά μοντέλα που επεκτείνουν τον συγκεκριμένο μηχανισμό. Ένα που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι το Ελάχιστα Υπερσυμμετρικό Καθιερωμένο Πρότυπο (Minimal Supersymmetric Standard Model-MSSM). Θεωρητικά η μάζα του Higgs επηρεάζεται από την κλίμακα ενεργειών που εμφανίζεται η νέα φυσική. Το MSSM αποτελείται από δύο μιγαδικές διπλέτες Higgs. Το γεγονός αυτό, οδηγεί όχι σε ένα αλλά σε πέντε μποζόνια Higgs. Τρία από αυτά είναι ουδέτερα (h, H και A) και δύο φορτισμένα ($H^{\pm}$). Στο επίπεδο που δεν υπολογίζονται όροι ανώτερης τάξης (tree level), το κομμάτι των πεδίων που ευθύνονται για τον μηχανισμό Higgs, χαρακτηρίζεται πλήρως από δύο παραμέτρους, την μάζα του ουδέτερου A, m_A και το $\tan\beta$ που είναι ο λόγος των αναμενόμενων τιμών κενού των δύο διπλετών Higgs. Οι διορθώσεις πρώτης τάξης επηρεάζουν σημαντικά τις σχέσεις του βασικού επιπέδου. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση στη μάζα του ελαφρύτερου μποζονίου Higgs (h) που είναι, στο tree level, μικρότερη από την μάζα του Z. Υπολογίζοντας τις διορθώσεις από τα υπερσυμμετρικά σωματίδια το άνω όριο της μάζας του h , φτάνει στα επίπεδα του σωματιδίου Higgs που έχει ήδη ανακαλυφθεί. Είναι δηλαδή δύσκολο να το διαχωρίσουμε από το μποζόνιο του Higgs του Κ.Π.. Τα υπόλοιπα μποζόνια, αναμένουμε να έχουν ένα πολύ ιδιαίτερο σήμα νέας φυσικής. Το σωματίδιο Higgs του Κ.Π. μπορεί να διασπαστεί στα εξής: $H \to b\bar{b}, \tau^+\tau^-, \gamma\gamma, ZZ, WW$.

Σε αυτήν την εργασία μας απασχολεί περισσότερο η απόδοση του σκανδαλιστή πρώτης τάξης για κάθε μία από τις αναλύσεις που αναφέραμε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα ασχολούμαστε με την διάσπαση του Higgs

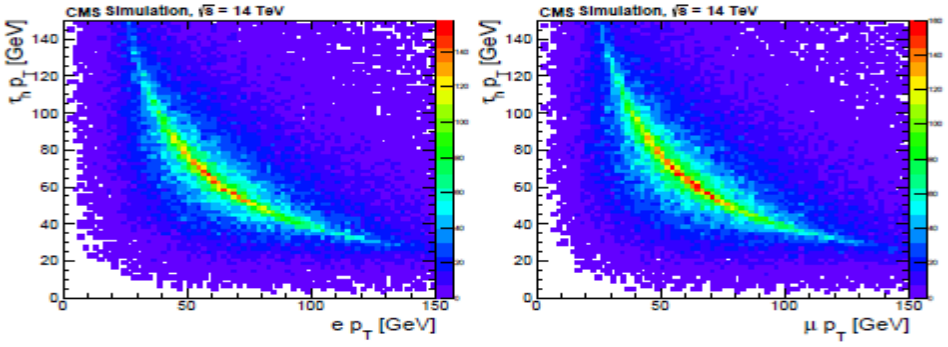
σε δύο tau $H \to \tau^+\tau^-$, την διάσπαση του Higgs σε bottom $H \to b\bar{b}$ και σε δύο W $H \to WW$. Δεν ασχολούμαστε με τις διασπάσεις του Higgs σε δύο φωτόνια και σε δύο Z, επειδή και οι δύο έχουν την μέγιστη δυνατή απόδοση. Στην διάσπαση σε δύο φωτόνια $H \to \gamma\gamma$ τα φωτόνια που προέρχονται από αυτήν την διαδικασία έχουν πολύ μεγαλύτερες ενέργειες από την στάθμη του σκανδαλιστή που απαιτείται από άλλες διεργασίες φυσικής. Για την διάσπαση $H \to ZZ$ όπου εν συνεχεία έχουμε την διάσπαση των Z σε τέσσερα λεπτόνια, η πιθανότητα τα λεπτόνια να περάσουν τις στάθμες του σκανδαλιστή είναι πολύ μεγάλη, γιατί τα όρια έχουν τεθεί πολύ χαμηλά εξαιτίας άλλων φαινομένων που πρέπει να εξεταστούν.

2.8.1 H→ττ

Το CMS έχει ενδείξεις για την εύρεση του μποζονίου Higgs μέσω της διάσπασής του σε ένα ζεύγος tau με περίπου 3σ σημαντικότητα. Χρειάζεται όμως ακριβέστερη μέτρηση για την πλήρη εξέταση των φερμιονικών συζεύξεων. Αξιολογήθηκε και μελετήθηκε η διαφορά στην αποδοτικότητα καταγραφής μποζονίων Higgs αυτής της ανάλυσης, με χρήση του αναβαθμισμένου και του τωρινού L1, για τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του LHC (Εικόνα 1.1). Οι μελέτες αυτές προϋποθέτουν ένα μποζόνιο Higgs του Κ.Π. με μάζα 125 GeV, που παράγεται από συγκρούσεις πρωτονίων με ενέργεια κέντρου μάζας 14 TeV μέσω VBF και διασπάται σε δύο tau. Υπάρχουν τρεις πιθανές τελικές καταστάσεις των διαδικασιών με δύο tau: $\mu\tau_h + X$, $e\tau_h + X$ και $\tau_h\tau_h + X$ οπού τ_h μία διάσπαση του tau μόνο σε αδρόνια.

Οι σκανδαλιστές αυτής της ανάλυσης συνδυάζουν σκανδαλιστές μιονίων, ηλεκτρονίων και tau. Ο αλγόριθμος particle flow χρησιμοποιήθηκε για την ανακατασκευή τον σωματιδίων από τον high level trigger. Εξαιτίας της διαφοράς στην απόκριση των καλοριμέτρων για τα δύο σενάρια λειτουργίας του LHC, περιμένουμε μικρές διαφορές στην απόδοση της ανακατασκευής των tau για 25ns και 50ns.

Για την αξιολόγηση των L1 απαιτείται το λιγότερο εγκάρσια ορμή του αδρονικώς διασπασμένου tau ίση με 25 GeV στην περίπτωση που έχουμε λεπτόνιο και tau στην τελική κατάσταση, και 40 GeV για το απομονωμένο tau στην τελική κατάσταση των δύο tau. Το μη απομονωμένο tau απαιτείται να έχει ορμή το λιγότερο ίση με 50 GeV. Η εικόνα 2.28 μας δείχνει την κατανομή της εγκάρσιας ορμής, για τις τελικές καταστάσεις όπου υπάρχει ένα λεπτόνιο (μιόνιο και ηλεκτρόνιο) και ένα tau, με την εγκάρσιας ορμή των πιδάκων που προέρχονται από το tau. Τα αποτελέσματα της αποδοτικότητας του αναβαθμισμένου και του παλιού σκανδαλιστή για την μελέτη της διαδικασίας $H \to \tau\tau$ φαίνονται στον πίνακα 2.1.



Εικόνα 2.28 Η κατανομή της εγκάρσιας ορμής των παραγώγων από του tau στις διάφορες τελικές καταστάσεις που περιέχουν λεπτόνιο.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Final state	Current L1	Upgraded L1	Current L1	Upgraded L1
$\mu\tau_h$ using IsoMu+Tau	–	25.6%	–	25.1%
$\mu\tau_h$ using Single Mu	42.6%	50.6%	19.4%	42.0%
$\mu\tau_h$ using Single IsoMu	–	48.1%	–	43.3%
$\mu\tau_h$ using Single IsoMu OR IsoMu+Tau	–	51.3%	–	48.4%
$e\tau_h$ using IsoEG+Tau	–	17.7%	–	17.7%
$e\tau_h$ using Single IsoEG	24.4%	41.3%	14.0%	32.5%
$e\tau_h$ using Single IsoEG OR IsoEG+Tau	24.4%	44.3%	14.0%	39.0%
$\tau_h\tau_h$ using IsoTau+Tau	3.3%	13.9%	3.3%	10.2%
$\tau_h\tau_h$ using Single (Iso)Tau	15.9%	53.7%	13.2%	50.1%
$\tau_h\tau_h$ using Single IsoTau OR IsoTau+Tau	17.2%	53.7%	14.9%	50.1%

Πίνακας 2.1 Η αποδοτικότητα του σήματος H→ττ χρησιμοποιώντας ίδιες στάθμες σκανδαλιστή και φωτεινότητα 2.2×10^{34} για τον τωρινό και τον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή.

2.8.2 WH→Wbb

Όπως και στην περίπτωση των διασπάσεων με δύο tau, η μελέτη της διάσπασης του Higgs σε δύο bottom είναι σημαντική γιατί μας δείχνει την φύση του Higgs διαμέσου των συζεύξεων του με διαφορετικά φερμιόνια. Σε αυτό το κομμάτι μελετάμε την αποδοτικότητα του σκανδαλιστή για τις περιπτώσεις που από την σύγκρουση πρωτονίων προκύπτει ένα σωματίδιο Higgs και ένα διανυσματικό μποζόνιο W ($pp \to WH$). Ο τρόπος παραγωγής είναι VH. Εν συνεχεία το W, διασπάται σε νετρίνο και λεπτόνιο και το Higgs σε δύο bottom ($WH \to (e\nu)(b\bar{b})$ ή $WH \to (\mu\nu)(b\bar{b})$).

Η αποδοτικότητα του αναβαθμισμένου και του τωρινού L1 αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας ηλεκτρόνια και μιόνια συγκεκριμένης ενέργειας (20 GeV). Στους πίνακες 2.2 και 2.3 μπορούμε να δούμε τις στάθμες και τις αποδοτικότητες των σκανδαλιστών. Η διαφορά στην απόδοση είναι αισθητή.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Final state	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
Single isoEG	38	27	52	31
Single Muon	23	18	42	22

Πίνακας 2.2 Οι στάθμες σκανδαλισμού για τον τωρινό και τον βελτιωμένο σκανδαλιστή στην μελέτη των διαδικασιών WH→Wbb.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Final state	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
$e\nu$	57.7%	87.0%	37.5%	71.5%
$\mu\nu$	95.9%	100%	69.6%	97.9%

Πίνακας 2.3 Η αποδοτικότητα του σήματος WH→Wbb για τους δύο σκανδαλιστές.

2.8.3 H→WW

Η διάσπαση του σωματιδίου Higgs σε δύο W έχει πλήρως ανακαλυφθεί. Παρ' όλα αυτά δεδομένης της κεντρικής σημασίας που έχουν οι μποζονικές συζεύξεις στον καθορισμό του νέου σωματιδίου ως υπευθύνου για την διάσπαση της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας, απαιτείται επιπλέον μελέτη. Για αυτό μελετάμε την απόδοση των σκανδαλιστών του ενός και των δύο λεπτονίων που χρειάζονται για την μέτρηση της τελικής κατάστασης με δύο λεπτόνια και δύο νετρίνα $H \to WW \to 2l2\nu$. Η ανάλυση βασίζεται στην ταυτοποίηση ενός γεγονότος με δύο απομονωμένα αντιθέτου φορτιού λεπτόνια (ηλεκτρόνια ή μιόνια) με μεγάλη εγκάρσια ορμή και μεγάλη χαμένη ενέργεια εξαιτίας των νετρίνων. Οι πίνακες 2.4 και 2.5 δείχνουν την αποδοτικότητα των σκανδαλιστών και τις στάθμες σκανδαλισμού. Βλέπουμε πως ο τωρινός L1 έχει μικρότερη απόδοση από τον αναβαθμισμένο ειδικά για διλεπτόνια στο σενάριο των 25ns.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Final state	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
Single EG	46	45	67	57
Single IsoEG	38	27	52	31
Single Muon	23	18	42	22
Single IsoMuon	–	17	–	19
IsoEG+EG	24, 15	22, 16	26, 16	23, 16
IsoMu+Mu	18, 10	14, 10	20, 12	15, 10
IsoEG+Mu	21, 11	19, 10	24, 12	21, 10
IsoMu+EG	18, 14	16, 14	20, 15	18, 15

Πίνακας 2.4 Οι στάθμες των σκανδαλιστών για την ανάλυση H→WW→2l2ν για τα δύο σενάρια λειτουργίας.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Final state	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
ee	91.4%	97.8%	74.2%	95.3%
$\mu\mu$	99.9%	99.9%	89.3%	99.9%
eμ	97.6%	99.4%	86.9%	99.3%
μe	99.6%	99.5%	90.7%	99.7%

Πίνακας 2.5 Η αποδοτικότητα του σήματος H→WW→2l2ν για κάθε ένα από τα σενάρια λειτουργίας του LHC.

2.8.4 Παραγωγή των top squarks

Ένα σενάριο της νέας φυσικής που εξετάζεται στο CMS είναι η απευθείας παραγωγή των υπερσυμμετρικών αντίστοιχων των top quark, που είναι τα stop. Τα μικρής μάζας stop quarks έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον μετά την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs εξαιτίας της συνεισφοράς των top quarks στις διορθώσεις της μάζας του. Οι διορθώσεις αποκλίνουν τετραγωνικά, και το top συνεισφέρει σε αυτές σε μεγάλο βαθμό. Οπότε η εισαγωγή του stop, τελείως φυσικά, ακυρώνει μεγάλο μέρος αυτών των αποκλίσεων.

Ο ρυθμός παραγωγής των stop quarks αναμένεται να είναι μικρός σε σύγκριση με τα άλλα υπερσυμμετρικά αντίστοιχα των quarks των άλλων γενιών. Ένα σημαντικό ενδεχόμενο που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η περίπτωση η μάζα του top είναι πολύ κοντά με την μάζα του stop. Τότε το σήμα τους αναμένεται να μοιάζει πολύ με το σήμα ενός ζεύγους top, anti-top. Ο διαχωρισμός τους είναι μία ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση. Επίσης ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζουν τα μοντέλα στα οποία η μάζα του stop και του LSP παρουσιάζει μικρή διαφορά. Η τελική κατάσταση αυτών των μοντέλων έχει σωματίδια με πολύ μικρές ορμές, γεγονός που δυσκολεύει τον σκανδαλισμό τους. Για αυτό και κατά την αναβάθμιση του L1 δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον σκανδαλισμό τέτοιων αντικειμένων.

Μία τέτοια πιθανή διάσπαση του stop ($\tilde{t}$) που εξετάζεται είναι η $\tilde{t} \to b\tilde{\chi}^{\pm} \to bW^{\pm}\tilde{\chi}^{0}$ όπου $\tilde{\chi}^{0}$ το neutralino και $\tilde{\chi}^{\pm}$ το chargino. Εάν η μάζα του $\tilde{\chi}^{\pm}$ είναι κατά 10GeV μεγαλύτερη από του W, τότε τα W δεν είναι δυνητικά αλλά πραγματικά. Το $\tilde{\chi}^{0}$ είναι το ελαφρύτερο υπερσυμμετρικό σωματίδιο. Αυτό το σενάριο ονομάζεται T2bw.

Σε ένα από τα σενάρια που μελετήθηκαν το ένα από τα W διασπάται αδρονικά και το άλλο λεπτονικά. Συνολικά για μία τέτοια διαδικασία περιμένουμε ένα λεπτόνιο, τέσσερις αδρονικούς πίδακες και κάποια χαμένη ενέργεια. Η χαμένη ενέργεια δεν είναι απαραιτήτως μεγάλη, επειδή τα neutralinos μπορούν να παραχθούν αντισυμμετρικά. Εάν σε μία τέτοια διαδικασία η μάζα του stop και του neutralino είναι πολύ κοντά, τα παράγωγα (πίδακες, λεπτόνια) έχουν γενικά μικρές ενέργειες. Μεγάλη απόδοση αυτού του σεναρίου παρουσιάζουν οι σκανδαλιστές με ένα λεπτόνιο και έναν πίδακα.

Στον πίνακα 2.6 βλέπουμε τις στάθμες του τωρινού και του αναβαθμισμένου L1 για το σενάριο T2bw. Στον πίνακα 2.7 βλέπουμε την αποδοτικότητα των σκανδαλιστών.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Trigger	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
Single iso e/γ + Jet	32, 68	23, 66	38, 82	27, 78
Single Mu + Jet	22, 43	16, 55	27, 54	18, 52

Πίνακας 2.6 Οι στάθμες των σκανδαλιστών για τα σενάρια λειτουργίας του LHC.

		1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Scenario	Trigger	Current L1	Upgraded L1	Current L1	Upgraded L1
T2bw	Single iso e/γ + Jet	74.7%	83.2%	74.9%	84.0%
(600,150)	Single Mu + Jet	83.4%	87.6%	85.0%	88.3%
T2bw	Single iso e/γ + Jet	55.8%	68.2%	50.3%	64.8%
(600,450)	Single Mu + Jet	78.1%	81.6%	76.4%	84.5%

Πίνακας 2.7 Οι αποδοτικότητες των σημάτων για τα διάφορα σενάρια του μοντέλου T2bw.

2.8.5 Μοντέλα που παραβιάζουν την R-ομοτιμία

Ενώ τα όρια απόρριψης μαζών των squarks και gluinos για διάφορα μοντέλα της υπερσυμμετρίας που διατηρούν την R-ομοτιμία έχουν ήδη φτάσει σε ενέργειες άνω του 1TeV, στα μοντέλα που δεν την διατηρούν (R parity violating-RPV) τα όρια είναι αισθητά μικρότερα. Μία από τις προκλήσεις του LHC μετά την αναβάθμιση της LS1, είναι ο σκανδαλισμός γεγονότων με πολλούς πίδακες. Αυτό ενέχει μία δυσκολία διότι, εκτός της συνεισφοράς των γεγονότων υποβάθρου στην ενέργεια των πιδάκων, υπάρχουν και πίδακες που προέρχονται εξ ολοκλήρου από τα γεγονότα υπόβαθρου. Ενώ κάποια μοντέλα που διατηρούν την R-ομοτιμία απαιτούν την ύπαρξη μεγάλης χαμένης ενέργειας, γεγονός που τα ξεχωρίζει αποτελεσματικά από το υπόβαθρο του Κ.Π., τα μοντέλα που δεν την διατηρούν συνήθως δεν απαιτούν μεγάλη χαμένη ενέργεια.

Ένα ενδιαφέρον σενάριο υπερσυμμετρίας RPV, το οποίο πρέπει να δίνει καλή αποδοτικότητα σκανδαλισμού είναι το μοντέλο που τα stop quarks διασπώνται σε δύο πίδακες. Το σήμα που περιμένουμε είναι δύο συζευγμένων διπιδάκων. Τέτοιες περιπτώσεις είχαν μελετηθεί στο LHC και στο Tevatron αλλά ήταν αρκετά περιορισμένες. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι μέχρι στιγμής έχουν αποκλειστεί μόνο έως 125 GeV της μάζας του stop. Για αυτό πρέπει να διασφαλιστεί η χρήση σκανδαλιστών με καλύτερη απόδοση για χαμηλής μάζας stop στις μελλοντικές μελέτες Η προηγούμενη έρευνα του CMS βασίστηκε στους σκανδαλιστές δύο πιδάκων ή τεσσάρων και στον H_T, γεγονός που μένει αμετάβλητο και μετά την LS1 εποχή. Στους πίνακες 2.8 και 2.9 βλέπουμε τις στάθμες των σκανδαλιστών και τις αποδοτικότητες τους για διαφορετικές τιμές μάζας του stop. Ο αναβαθμισμένος L1 έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα για σήμα που προέρχεται από stop μάζας μικρότερης των 300GeV.

	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Trigger	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
Double Jet	140	125	170	130
Quad Jet	71	51	96	55
H_T	500	350	580	380

Πίνακας 2.8 Οι στάθμες των διαφόρων ασκανδάλιστων πριν και μετά την αναβάθμιση.

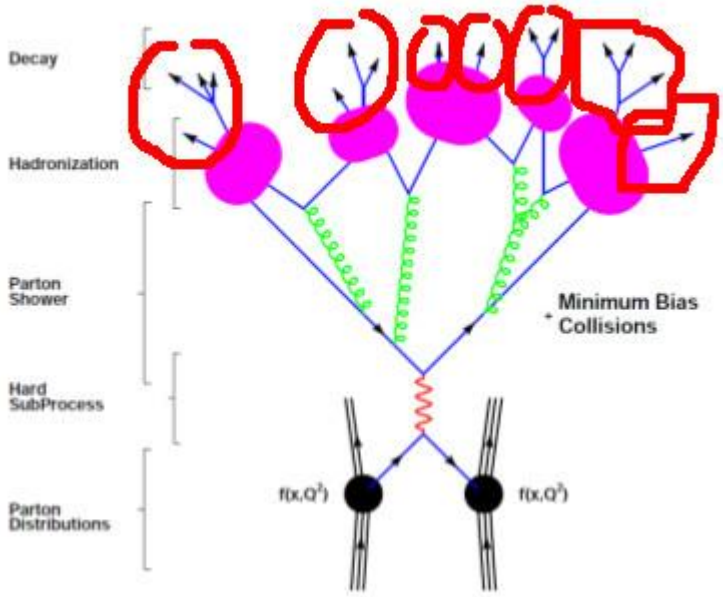
Stop Quark	1.1×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 50 ns		2.2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}, 25 ns	
Mass (GeV)	Current Level-1	Upgraded Level-1	Current Level-1	Upgraded Level-1
200 GeV	70.1%	99.9%	43.6%	99.9%
300 GeV	93.7%	99.9%	79.7%	99.9%
400 GeV	98.3%	99.9%	94.7%	99.9%

Πίνακας 2.9 Οι αποδοτικότητες των L1 ανάλογα με την μάζα του stop quark.

3. Μελέτη πιδάκων

3.1 Πίδακες

Ορίζουμε ως πίδακα τον στενό κώνο αδρονίων και άλλων σωματιδίων που δημιουργούνται κατά την αδρανοποίηση (hadronization) ενός quark ή gluon (partons ή παρτόνια) σε ένα πείραμα στοιχειωδών σωματιδίων ή βαρέων ιόντων. Τα σωματίδια που μεταφέρουν το φορτίο χρώματος (όπως τα quarks) δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθερα στην φύση εξαιτίας του περιορισμού της QCD που επιτρέπει μόνο «άχρωμες» καταστάσεις. Ένα σωματίδιο που αποτελείται quarks και gluons μεταφέρει το φορτίο του χρώματος, αλλά ο συνδυασμός των partons είναι πάντα άχρωμος (π.χ. πρωτόνιο). Όταν σε μία σύγκρουση σωματιδίων παραχθούν ελεύθερα παρτόνια, υπάρχει μια φυσική διαδικασία που τα μετατρέπει σε χρωματικός ουδέτερες καταστάσεις. Αρχικά όσο το ελεύθερο parton απομακρύνεται από το σημείο σύγκρουσης, η σταθερά σύζευξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης αυξάνεται πολύ με την αύξηση της απόστασης, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα για εκπομπή ακτινοβολίας της QCD (QCD radiation). Από την QCD radiation παράγονται gluons που με την σειρά τους παράγουν ζεύγη quarks και ούτω καθεξής. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε μικρές γωνίες γύρω από το αρχικό parton και ονομάζεται parton showering. Εν συνεχεία τα ελεύθερα partons συνδέονται μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθούν οι χρωματικά ουδέτερες καταστάσεις, που εντοπίζουμε στους ανιχνευτές. Η διαδικασία σύνδεσης ονομάζεται hadronization. Το σύνολο αυτών των σωματιδίων που δημιουργήθηκαν αποτελούν τον πίδακα (Εικόνα 3.1).



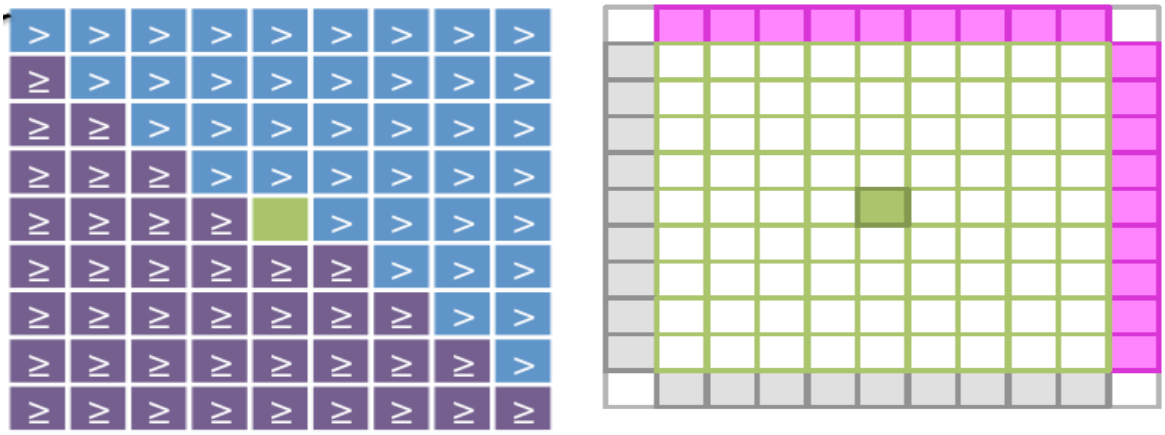
Εικόνα 3.1 Ο σχηματισμός πιδάκων.

3.2 Εύρεση αδρονικών πιδάκων

3.2.1 Αλγόριθμος εύρεσης πιδάκων του L1

Η εύρεση αδρονικών πιδάκων στον αναβαθμισμένο σκανδαλιστή έχει ιδιαίτερη σημασία για πολλές αναλύσεις της φυσικής όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρκετά μοντέλα επιτρέπουν την διάσπαση σε χαμηλής ενέργειας πίδακες. Οπότε το να εμφανίζει ο σκανδαλιστής πρώτης τάξης μεγάλη αποδοτικότητα ακόμη και στις χαμηλές ενέργειες είναι απαραίτητο. Πρέπει λοιπόν να είμαστε σε θέση να εντοπίζουμε τους πίδακες με ακρίβεια. Αυτή η διεργασία συμβαίνει στον L1 με την χρήση του αλγορίθμου εύρεσης αδρονικών πιδάκων (jet finder). Η λειτουργία του βασίζεται στην εύρεση του πύργου σκανδαλισμού με την μεγαλύτερη ενέργεια σε ένα εύρος ±4 πύργων σκανδαλισμού. Το ±4 ορίστηκε με

βάση προσομοιώσεις που έγιναν για να βρεθεί η επιφάνεια της βάσης του κώνου. Αφού βρεθεί ο κατάλληλος πύργος, ορίζεται ο υποψήφιος πίδακας. Ως συντεταγμένες του πίδακα παίρνουμε τις συντεταγμένες του πύργου με την μεγαλύτερη ενέργεια. Οι διαστάσεις του πίδακα ορίζονται σε μία ακτίνα τεσσάρων πύργων γύρω από το κεντρικό σημείο (Εικόνα 3.2 Αριστερά), με τον κάθε πύργο να έχει διαστάσεις $\Delta\eta\times\Delta\varphi=0.09\times0.09$. Οι ενέργειες των γειτονικών πύργων (±4 πύργοι) αθροίζονται για να βρούμε την ενέργεια του υποψήφιου πίδακα. Αυτή η διαδικασία γίνεται για κάθε πύργο σκανδαλισμού του ανιχνευτή.



Εικόνα 3.2 Αριστερά: Ο αλγόριθμος jet finder Δεξιά: Ο αλγόριθμος DONUT για αφαίρεση υποβάθρου.

3.2.2 Αφαίρεση υποβάθρου

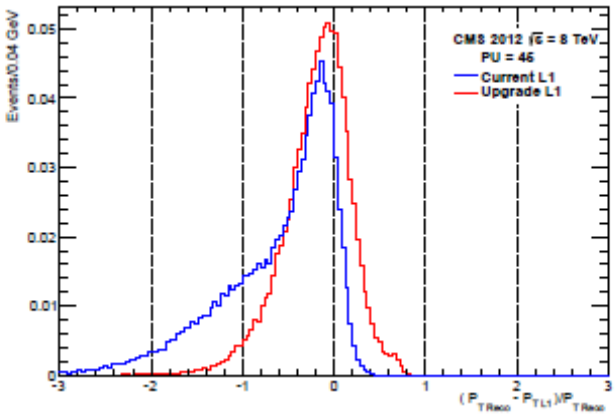
Οι σκανδαλιστές πολλών αδρονικών πιδάκων και αθροίσματος ενεργειών είναι επιρρεπείς σε μεγάλο ρυθμό σκανδαλισμών, σε περιβάλλον με πολλές αλληλεπιδράσεις υπόβαθρου. Αυτό μπορεί να καταπολεμηθεί αυξάνοντας την στάθμη σκανδαλισμού, που όμως ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια απόδοσης του σκανδαλιστή, εάν η στάθμη αυξηθεί πέρα από ένα όριο. Μία σημαντική καινοτομία του αναβαθμισμένου L1 είναι η δυνατότητα αφαίρεσης του υποβάθρου σε κάθε γεγονός ξεχωριστά. Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι με στόχο να αφαιρεθεί το μέρος της ενέργειας των πιδάκων που προέρχεται από διαδικασίες υποβάθρου. Σε κάθε αλγόριθμο, το πρώτο βήμα είναι η εκτίμηση της ενεργειακής πυκνότητας. Μετά αφαιρείται ένα ποσοστό ενέργειας από τους πίδακες, τους πύργους σκανδαλισμού ή από περιοχές του ανιχνευτή. Οι επιδώσεις αυτών των αλγορίθμων έχουν μελετηθεί για τους σκανδαλιστές πολλών πιδάκων και αθροισμάτων ενέργειας. Βρέθηκε μικρή διαφορά μεταξύ των επιδόσεων τους. Το επόμενο διάστημα αναμένεται να αποφασιστεί για το ποιος, τελικά, είναι ο καταλληλότερος. Οι επικρατέστεροι αλγόριθμοι είναι:

- Regional Truncated Mean: Σε αυτόν τον αλγόριθμο η εγκάρσια ενεργειακή πυκνότητα λόγο του υποβάθρου υπολογίζεται ως η μέση ενέργεια επιφανειών του ανιχνευτή (κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε 4×4 πύργους σκανδαλισμού) που έχει ενέργεια μικρότερη από 7GeV. Αυτός ο περιορισμός αποτρέπει την εισαγωγή πιδάκων μεγάλης ενέργειας στην διαδικασία εκτίμησης του υποβάθρου. Εν συνεχεία αφαιρείται το υπόβαθρο από όλες τις περιοχές του ανιχνευτή.
- Tower Level Truncated Mean: Σε αυτήν την μέθοδο η εκτίμηση της ενέργειας υποβάθρου γίνεται όπως στην regional truncated mean με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί τους πύργους σκανδαλισμού ξεχωριστά αντί για μία περιοχή 4×4 πύργων.
- Median Jet Method: Αυτή η μέθοδος βρίσκει πρώτα τους πίδακες και μετά αφαιρεί το υπόβαθρο. Συγκεκριμένα ως ενέργεια υποβάθρου χρησιμοποιείται η μέση ενέργεια των 12 ενεργητικότερων πιδάκων, με τον πιο ενεργητικό πίδακα να μην υπολογίζεται.
- DONUT: Η λειτουργία του βασίζεται στην εύρεση ενός τετραγώνου από πύργους σκανδαλισμού γύρω από τον πίδακα. Εν συνεχεία διαλέγονται οι δύο πλευρές του τετραγώνου μεσαίας ενέργειας (δηλαδή μη λαμβάνοντας υπόψη την πλευρά με την μεγαλύτερη και τη μικρότερη ενέργεια) και

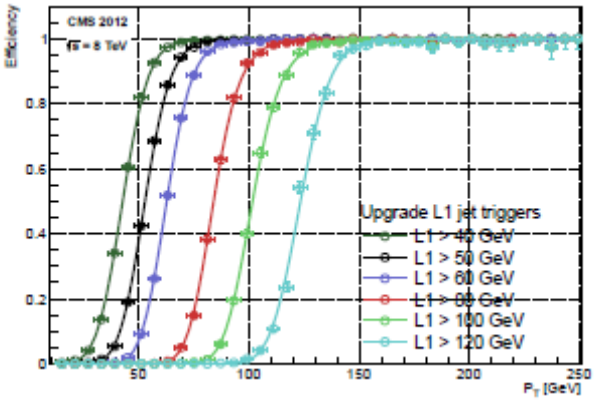
υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Ο μέσος όρος, αποτελεί την συνεισφορά του υποβάθρου στην ενέργεια του πίδακα, και έτσι αφαιρείται (Εικόνα 3.2 Δεξιά).

3.2.3 Η απόδοση του σκανδαλιστή πιδάκων

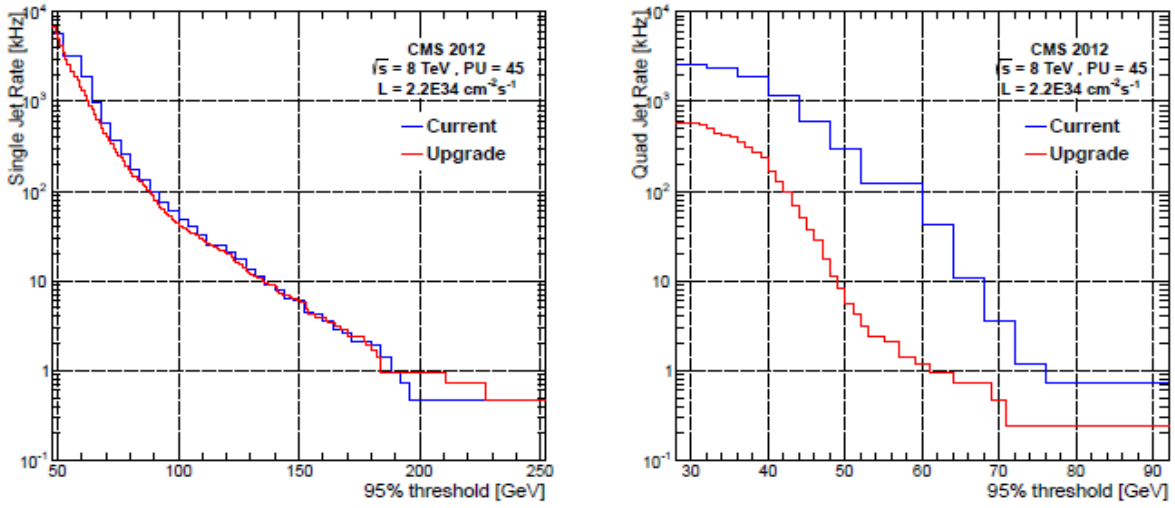
Ο βασικός αλγόριθμος πιδάκων για τους αναβαθμισμένους σκανδαλιστές αθροίζει την εγκάρσια ενέργεια (E_T) των πύργων του σκανδαλιστή σε έναν κώνο με ακτίνα 4 πύργων. Όλοι οι πιθανοί πίδακες ανιχνεύονται και ταξινομούνται ανάλογα με την E_T τους. Μετά αφαιρείται το υπόβαθρο χρησιμοποιώντας την median jet method. Η χρήση πληροφοριών από τον πύργο σκανδαλισμού μαζί με αφαίρεση του υποβάθρου, βελτιώνει την διακριτική ικανότητα της εγκάρσιας ενέργειας όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3. Η απόδοση του αναβαθμισμένου αλγορίθμου (Εικόνα 3.4) συγκρίνεται με την απόδοση τωρινού συστήματος. Οι ρυθμοί σκανδαλισμών του τωρινού και του L1 συγκρίνονται για έναν και τέσσερις πίδακες. Η επίδραση της αποκοπής υποβάθρου γίνεται ιδιαιτέρως αισθητή όταν έχουμε τέσσερις πίδακες (Εικόνα 3.5). Όσο πιο υψηλή τιμή έχει η στάθμη του σκανδαλιστή, τόσο λιγότερο αναγκαία γίνεται η χρήση αλγορίθμου αφαίρεσης υποβάθρου γιατί στους πίδακες μεγάλης ενέργειας η συνεισφορά του υποβάθρου είναι μικρή. Ακόμα μπορούμε να δούμε πως με την χρήση του αναβαθμισμένου σκανδαλιστή έχουμε ακριβέστερο εντοπισμό της θέσης σε σχέση με τον τωρινό σκανδαλιστή (Εικόνα 3.6). Αυτό μας επιτρέπει τον υπολογισμό της αναλλοίωτης μάζας των διπιδάκων.



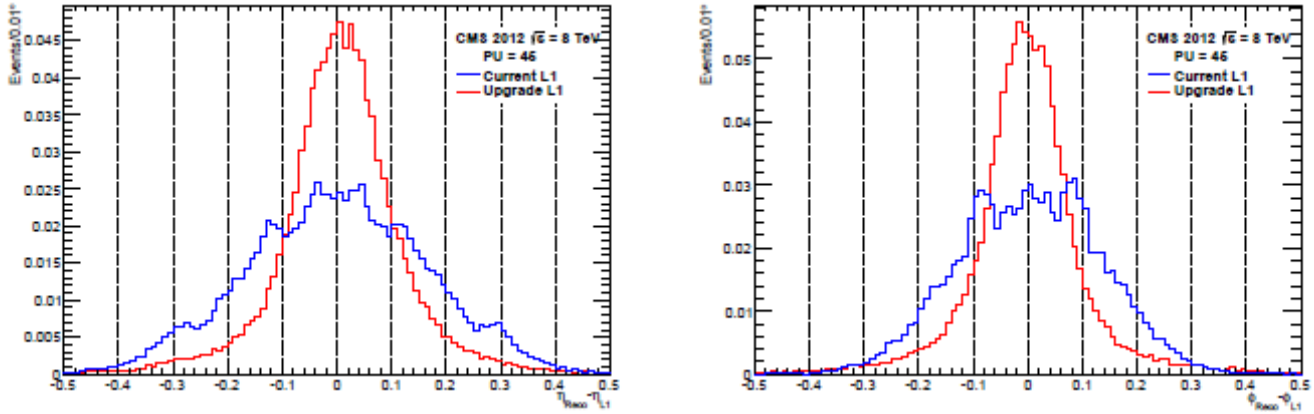
Εικόνα 3.3 Σύγκριση της ανάλυσης της E_T μεταξύ του αναβαθμισμένου και του τωρινού συστήματος σκανδαλιστή.



Εικόνα 3.4 Η απόδοση του αναβαθμισμένου σκανδαλιστή.



Εικόνα 3.5 Απόδοση σκανδαλιστή ενός πίδακα (αριστερά) και τεσσάρων (δεξιά) σε συνάρτηση με κατώφλι τους.

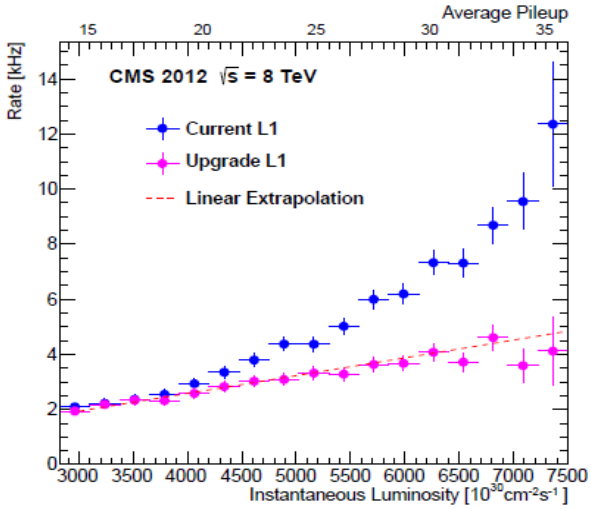


Εικόνα 3.6 Δεξιά: η ανάλυση της η διεύθυνσης για τον τωρινό σκανδαλιστή (μπλε γραμμή) και τον αναβαθμισμένο (κόκκινη γραμμή), Αριστερά: το ίδιο για την φ .

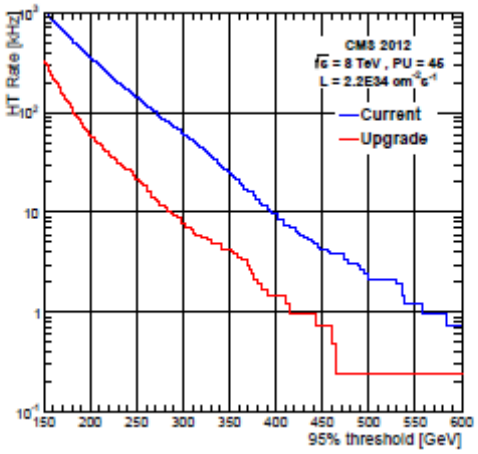
3.2.4 Η απόδοση του σκανδαλιστή αθροίσματος ενέργειας

Έχουν μελετηθεί επιπτώσεις που έχει η αφαίρεση του υποβάθρου καθώς και οι βελτιώσεις του αλγορίθμου εύρεσης πιδάκων, στον σκανδαλιστή του αλγεβρικού αθροίσματος της ενέργειας των πιδάκων (H_T). Για την μελέτη της επίπτωσης που επιφέρει η αφαίρεση του υποβάθρου στον H_T, χρησιμοποιείται ο τωρινός αλγόριθμος εύρεσης των πιδάκων και στην συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος αφαίρεσης υποβάθρου regional truncated mean. Έπειτα, η ενέργεια των πιδάκων διορθώνεται και όσοι πίδακες έχουν ενέργεια πάνω από 10 GeV αθροίζονται ώστε να υπολογιστεί το H_T. Κοιτώντας την εικόνα 3.10 βλέπουμε την διαφορά στον ρυθμό σκανδαλισμών όπου ο τωρινός L1 χωρίς την αφαίρεση υποβάθρου, αυξάνεται μη γραμμικά με την αύξηση της φωτεινότητας (και άρα των pile up γεγονότων) ενώ ο με την αφαίρεση υποβάθρου γραμμικά.

Εν συνεχεία παρουσιάζεται η επίδοση του H_T με χρήση του καινούργιου αλγόριθμου εύρεσης πιδάκων. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιήθηκε και ο αλγόριθμος αφαίρεσης υποβάθρου. Οι πίδακες πάνω από 20GeV περνούν το κατώφλι του σκανδαλιστή και αθροίζονται . Όπως βλέπουμε στην εικόνα 3.11 είναι αισθητή η βελτίωση του ρυθμού σκανδαλισμού του αναβαθμισμένου L1 σε σχέση με τον τωρινό L1.



Εικόνα 3.10 Ο ρυθμός σκανδαλισμού του H_T σε συνάρτηση με την φωτεινότητα για τον αναβαθμισμένο (ροζ) και για τον τωρινό σκανδαλιστή (μπλε).



Εικόνα 3.11 Ο ρυθμός σκανδαλισμού του H_T για τον τωρινό L1 (μπλε) και τον αναβαθμισμένο (κόκκινο).

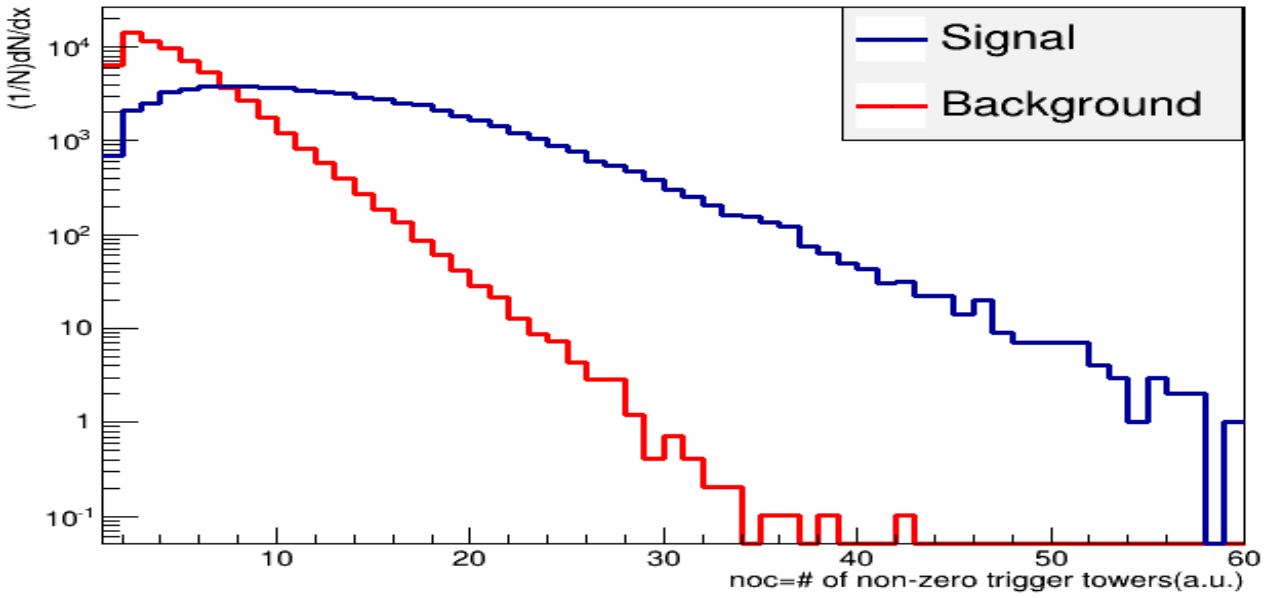
3.3 Διαχωρισμός πιδάκων

Το επόμενο βήμα είναι να εντοπίσουμε τους πίδακες που προέρχονται από γεγονότα υπόβαθρου και να τους αφαιρέσουμε. Με τον ορό σήμα εννοούμε κάθε ενδιαφέρων γεγονός που προέρχεται από hard scattering αλληλεπιδράσεις. Αντίθετα ο όρος υπόβαθρο αναφέρεται στα γεγονότα pile-up. Για να τα διαχωρίσουμε αυτό χρειάζεται να βασιστούμε σε μεταβλητές οι οποίες μας παρέχουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για τον διαχωρισμό. Μετά πρέπει καθορίσουμε τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούμε αυτές τις πληροφορίες για τον διαχωρισμό.

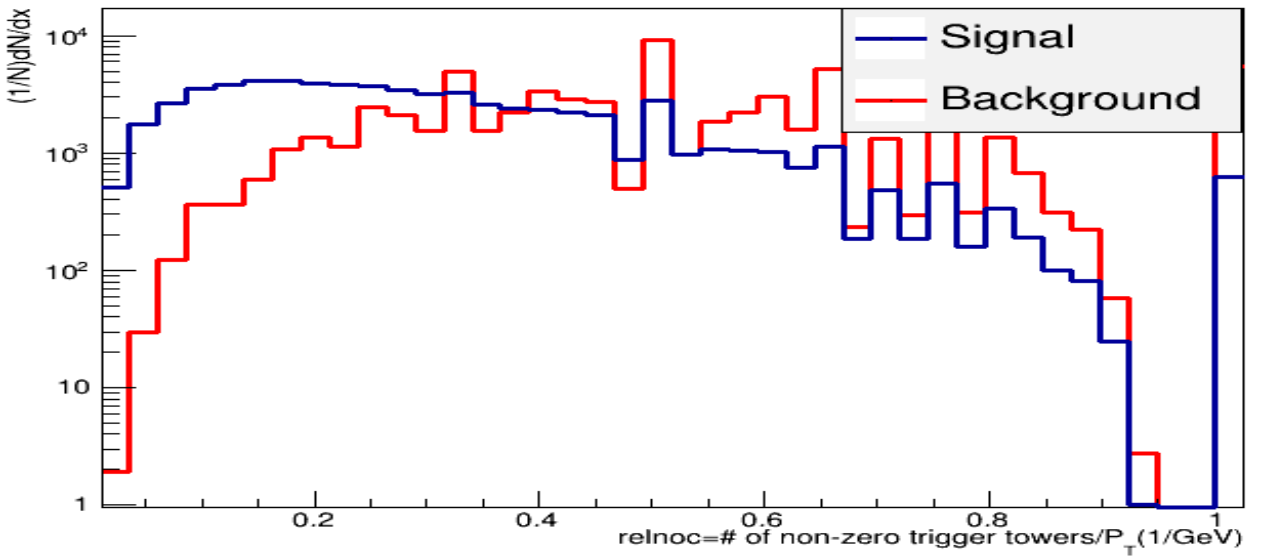
Οι μεταβλητές στις οποίες βασιζόμαστε προέρχονται από πληροφορίες μόνο των καλοριμέτρων. Είναι ζωτικής σημασίας να βρούμε μεταβλητές έτσι ώστε οι κατανομές των πιδάκων των γεγονότων σήματος και του υποβάθρου να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά. Η διαφορά των κατανομών μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της διεργασίας διαχωρισμού. Ένα παράδειγμα επιθυμητής διαφοράς είναι η μορφή των κατανομών να ακολουθεί διαφορετικό νόμο για το υπόβαθρο από ότι για το σήμα ή να έχουν τον ίδιο νόμο αλλά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των μεταβλητών που χρησιμοποιήσαμε. Τα ιστογράμματα των μεταβλητών είναι κανονικοποιημένα στον αριθμό γεγονότων και σε ημιλογαριθμική κλίμακα. Ο τίτλος των ιστογραμμάτων περιέχει την λέξη global που έχει να κάνει με τον τύπο της μεταβλητής στην C++ και δεν έχει κάποια φυσική σημασία.

3.3.1 Ο αριθμός των πύργων σκανδαλισμού

Αυτή η μεταβλητή δείχνει τον αριθμό των πύργων σκανδαλισμού που έχει εναποτεθεί ενέργεια. Δεν λαμβάνει υπόψη της την αριθμητική τιμή της ενέργειας εάν υπάρχει εναπόθεση. Η λειτουργιά της βασίζεται στον έλεγχο όλων των πύργων σκανδαλισμού ενός πίδακα. Σε περίπτωση που υπάρχει ενέργεια τότε προσθέτουμε μία μονάδα στην μεταβλητή. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει η μεταβλητή δεν αλλάζει τιμή. Όπως βλέπουμε υπάρχει μία διαφορά ανάμεσα στους πίδακες σήματος και υποβάθρου. Σκοπός μας είναι να πάρουμε πληροφορία για το πόσο «κομμάτι» του ανιχνευτή επηρέασε κάθε πίδακας. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως noc (number of cells) (Εικόνα 3.12). Μία παραλλαγή αυτής της μεταβλητής είναι εάν διαιρέσουμε τον αριθμό με την ενέργεια του πίδακα (Εικόνα 3.13).



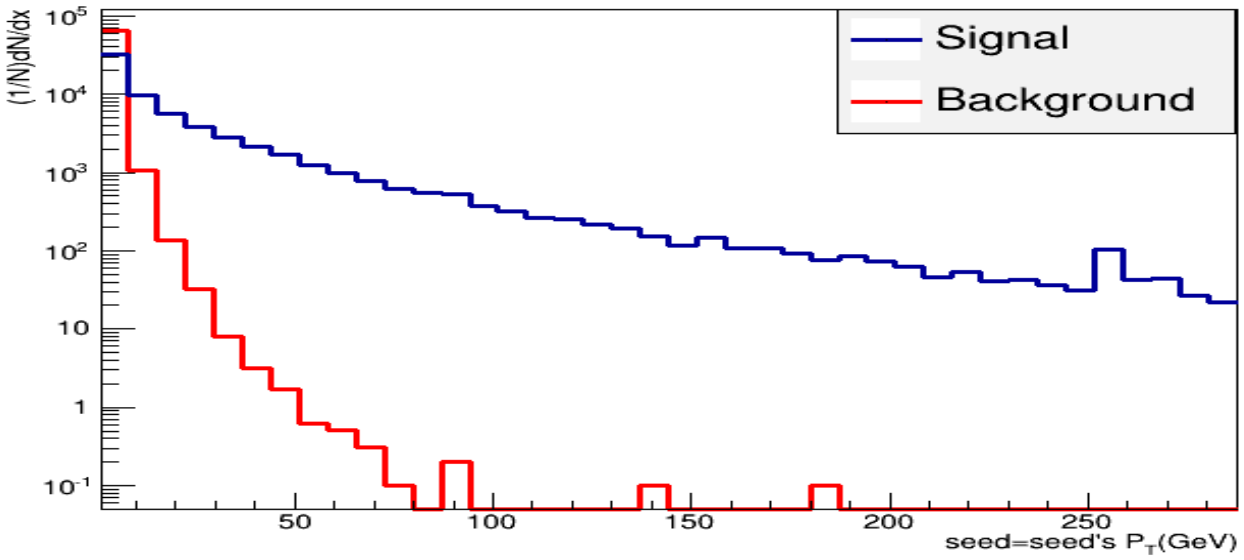
Εικόνα 3.12 Το ιστόγραμμα της μεταβλητή noc.



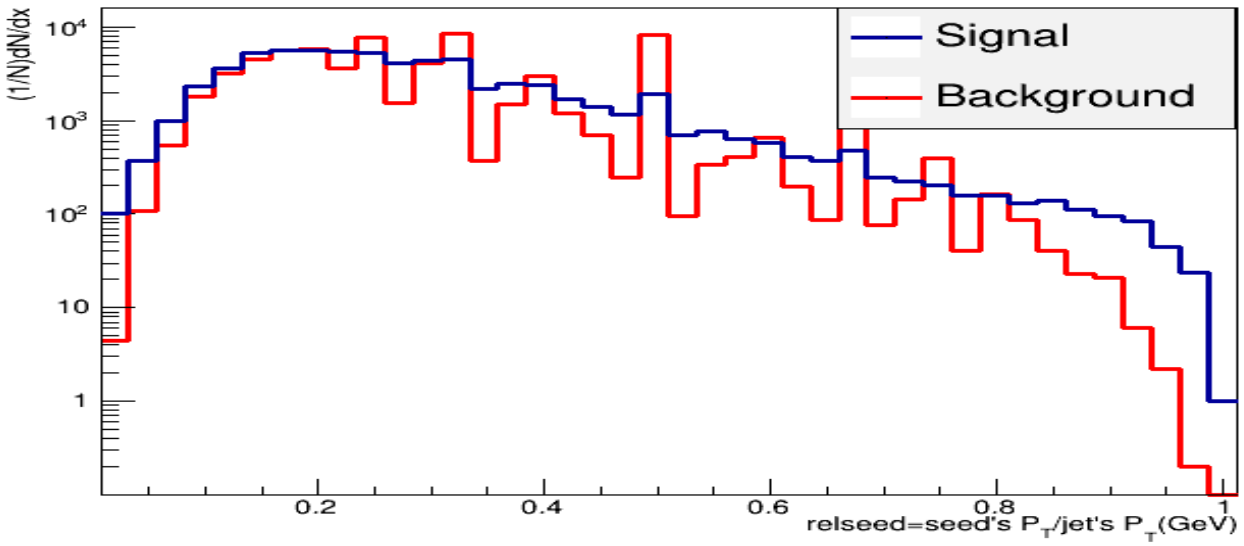
Εικόνα 3.13 Το ιστόγραμμα της παραλλαγής της noc.

3.3.2 Η ενέργεια του κεντρικού πύργου σκανδαλισμού

Αυτή η μεταβλητή παρέχει πληροφορίες για την ενέργεια που εναποτέθηκε στον κεντρικό πύργο σκανδαλισμού του πίδακα. Όπως είδαμε παραπάνω η εύρεση του πίδακα ξεκινά με την εύρεση του πιο ενεργητικού πύργου σκανδαλισμού. Μία τέτοια μεταβλητή μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πώς κατανέμεται η ενέργεια στον πίδακα. Εάν καθορίσουμε διάφορες τιμές ενέργειας πιδάκων και εξετάσουμε την κατανομή του υποβάθρου και του σήματος για την ίδια ενέργεια πιδάκων, βλέπουμε πως υπάρχει κάποια διαφορά. Στο πρόγραμμα αυτή η μεταβλητή αναφέρεται ως seed (Εικόνα 3.14). Μία παραλλαγή της προέρχεται από την διαίρεσή της με την ενέργεια του πίδακα (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.14 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής seed.

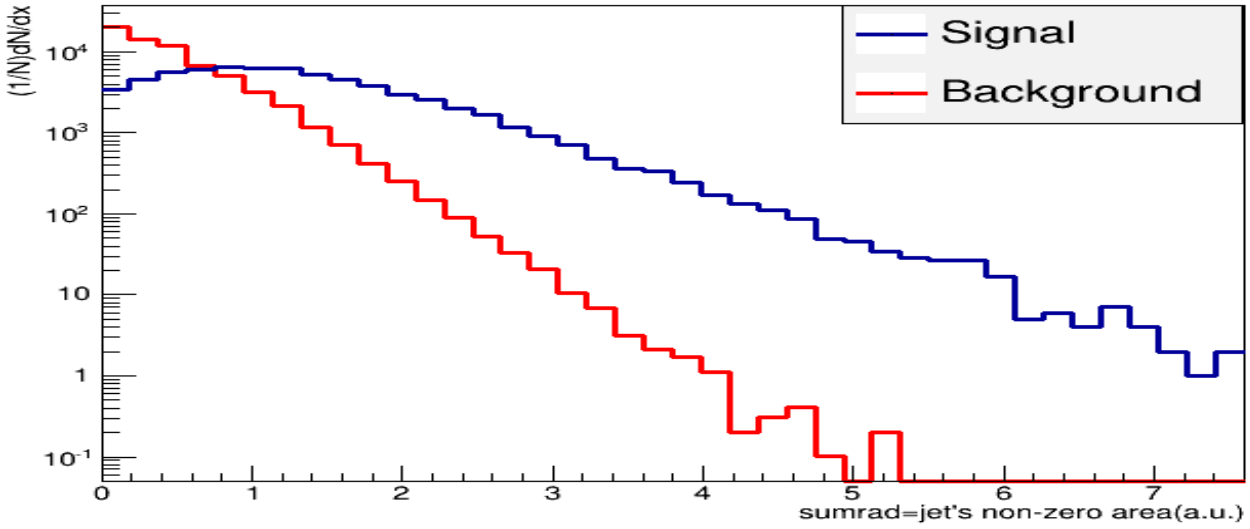


Εικόνα 3.15 Το ιστόγραμμα της παραλλαγής της seed.

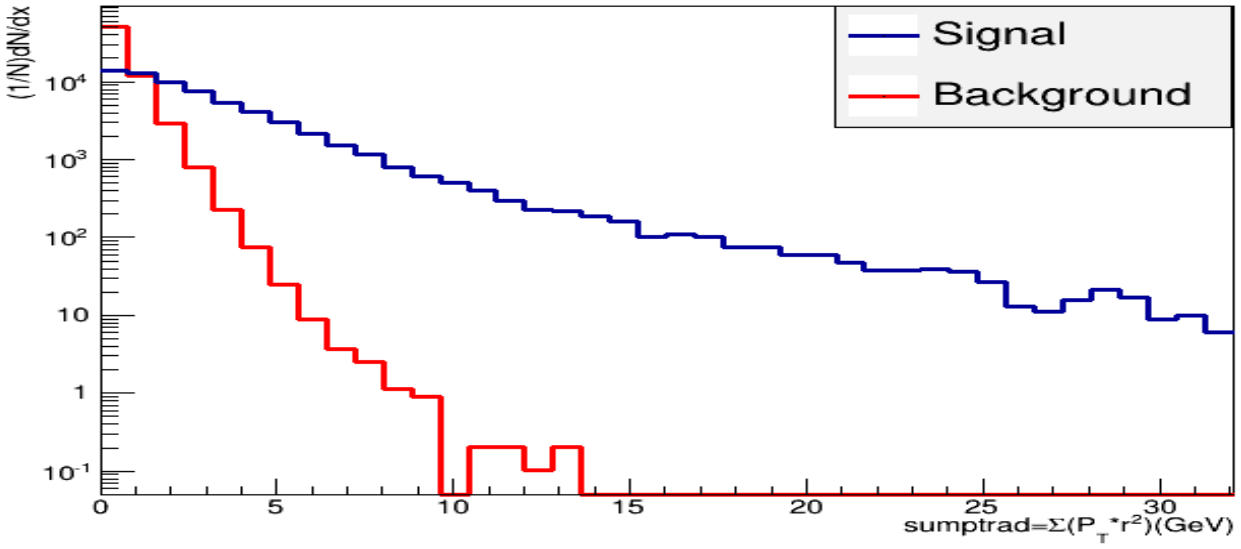
3.3.3 Εμβαδόν κατειλημμένης επιφανείας πίδακα

Αυτή η μεταβλητή δείχνει το εμβαδό στο οποίο κατανέμεται η ενέργεια. Ένας πίδακας κατά την διέλευσή του από τον ανιχνευτή του εναποθέτει ενέργεια. Το πρόγραμμα εντοπίζει τους πύργους σκανδαλισμού που έχει εναποθέσει την ενέργειά του και λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση που έχει ο συγκεκριμένος πύργος

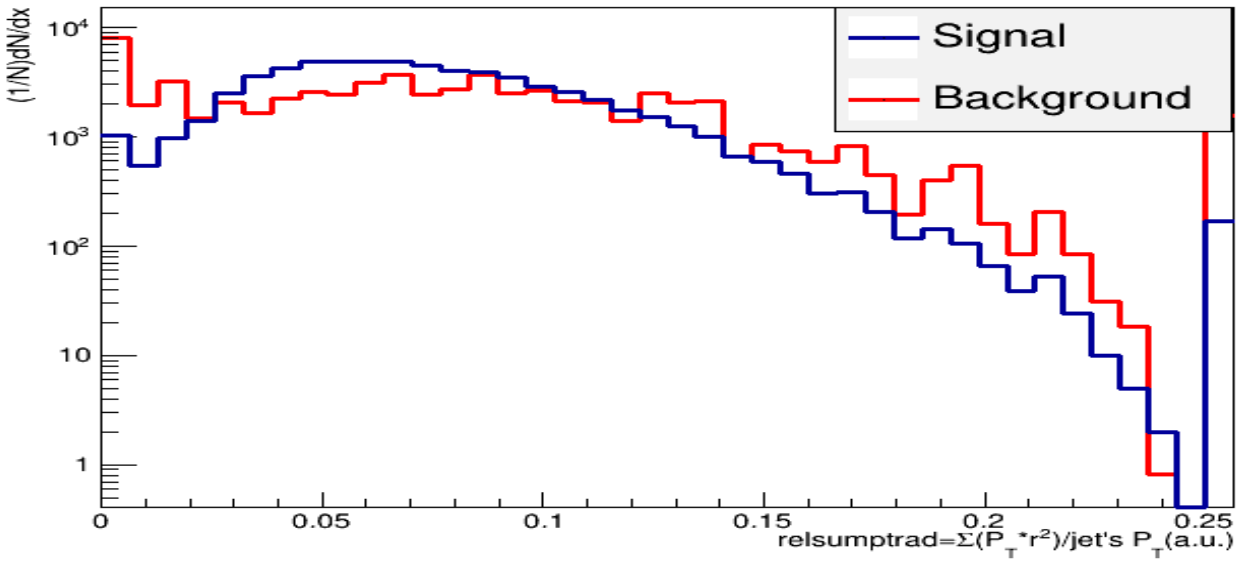
από το κέντρο του πίδακα υπολογίζει το στοιχειώδες εμβαδόν. Οι πύργοι που είναι κενοί δεν προσμετρούνται. Από το άθροισμα όλων των πύργων σκανδαλισμού παίρνουμε το εμβαδό του πίδακα. Όπως μπορούμε να δούμε υπάρχει διαφορά στην κατανομή πιδάκων σήματος από αυτή του υποβάθρου. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως sumrad (Εικόνα 3.16). Μία παραλλαγή της προκύπτει όταν λάβουμε υπόψη μας και το μέρος της ενέργειας που εναποτίθεται στον κάθε πύργο σκανδαλισμού (Εικόνα 3.17). Μία ακόμη προκύπτει από την διαίρεση της προηγούμενης παραλλαγής με την ενέργεια του πίδακα (Εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.16 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής sumrad.



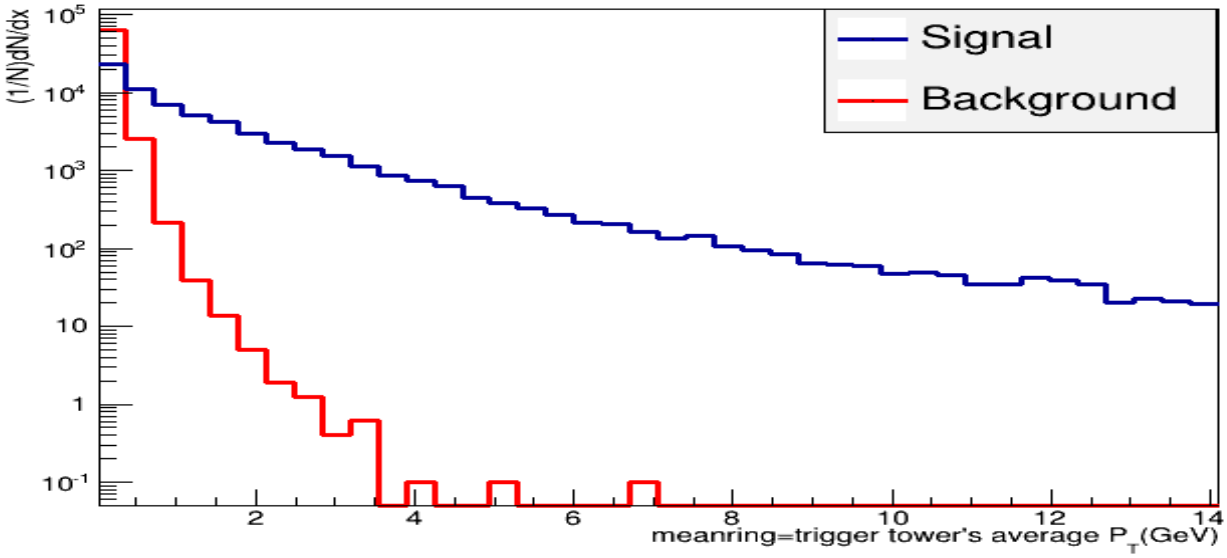
Εικόνα 3.17 Το ιστόγραμμα της πρώτης παραλλαγής της sumrad.



Εικόνα 3.18 Το ιστόγραμμα της δεύτερης παραλλαγής της sumptrad.

3.3.4 Μέση τιμή πύργου σκανδαλισμού

Αυτή η μεταβλητή δείχνει την μέση ενέργεια του πίδακα. Η μέση ενέργεια προκύπτει από την διαίρεση της ενέργειας ενός πίδακα με τον αριθμό των πύργων σκανδαλισμού. Αναφέρεται ως meanring στο πρόγραμμα(Εικόνα 3.19).

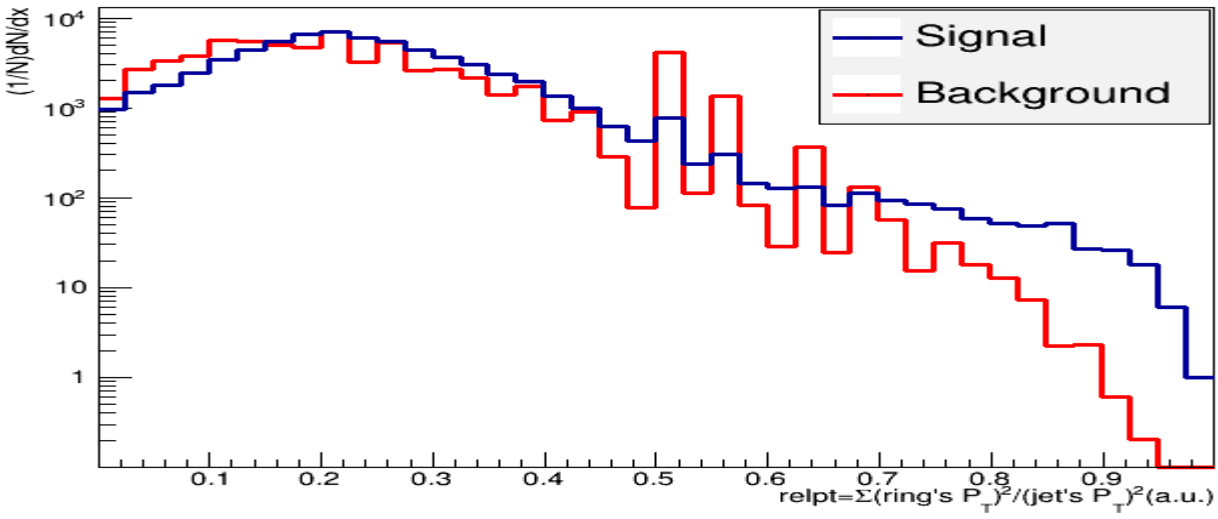


Εικόνα 3.19 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής meanring.

3.3.5 Άθροισμα τις ενέργειας των πύργων σκανδαλισμού στο τετράγωνο

Η μεταβλητή αυτή εκφράζει το άθροισμα των ενεργειών των πύργων σκανδαλισμού στο τετράγωνο δια την ολική ενέργεια του πίδακα υψωμένη στο τετράγωνο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει κάποια διαφορά στην μεταβλητή του κέντρου του πίδακα με την ολική ενέργεια του πίδακα, για πίδακες που ανήκουν στο υπόβαθρο και στο σήμα, σκεφτήκαμε ότι και οι άλλοι πύργοι σκανδαλισμού πρέπει να εμφανίζουν κάποια διαφορά. Για παράδειγμα εάν έχουμε δύο πίδακες ίδιας ενέργειας, όπου ο ένας ανήκει στο σήμα και ο άλλος στο υπόβαθρο, περιμένουμε η ενέργεια του κεντρικού πύργου σκανδαλισμού του πίδακα του σήματος να

έχει λίγο μεγαλύτερη τιμή από την αντίστοιχη του υποβάθρου όπως είδαμε και στην κατανομή της relseed. Σε relseed πήραμε την ενέργεια του seed και την διαιρέσαμε με την ενέργεια του πίδακα. Με αυτόν τον τρόπο αφαιρούμε την συνεισφορά που προέρχεται από το γεγονός ότι οι πίδακες σήματος έχουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη ενέργεια Αυτό σημαίνει ότι οι υπόλοιποι πύργοι πρέπει να έχουν επίσης κάποια διαφορά. Επειδή δεν ξέρουμε πως κατανέμεται αυτή η ενέργεια παίρνουμε το άθροισμα όλων των άλλων πύργων. Στο πρόγραμμα εμφανίζεται ως relpt (Εικόνα 3.20).



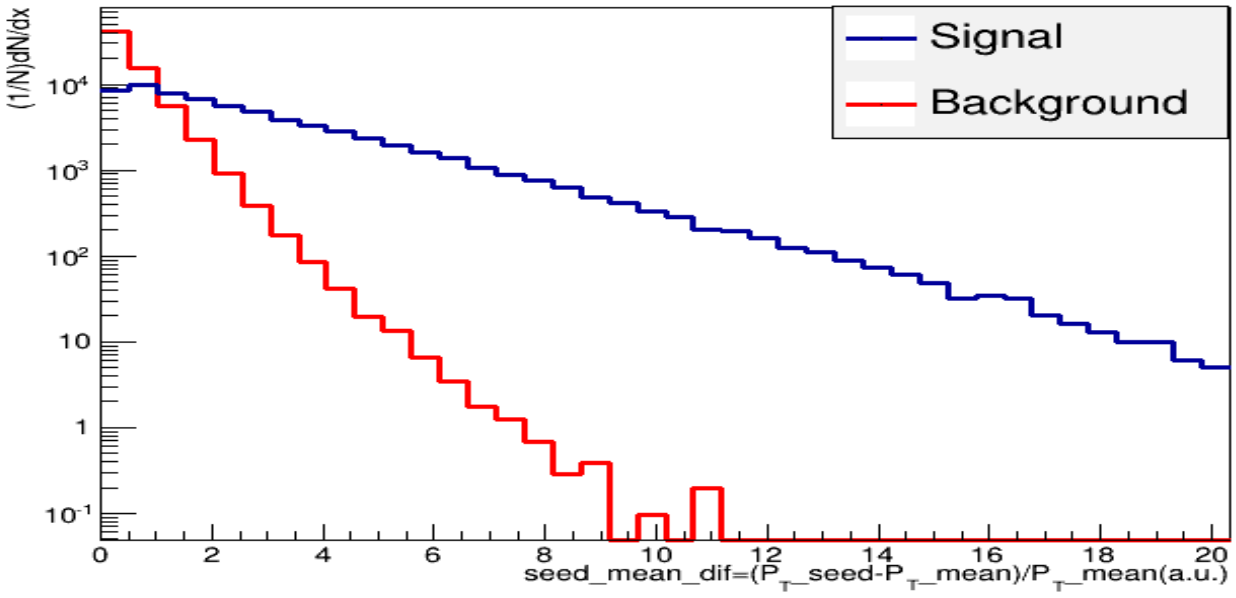
Εικόνα 3.20 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής relpt.

3.4 Μεταβλητές για επαλήθευση

Πρέπει να διασφαλίσουμε ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν στην συνέχεια με την χρήση της παραπάνω ομάδας μεταβλητών, είναι τα καλύτερα δυνατά. Δηλαδή να επιβεβαιώσουμε ότι οι μεταβλητές που ορίσαμε πιο πάνω, χρησιμοποιούν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες από το αδρονικό καλορίμετρο. Για να το πετύχουμε αυτό, ορίζουμε μια επιπλέον ομάδα μεταβλητών, που την παρουσιάζουμε σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, και στο τέλος θα την χρησιμοποιήσουμε για να δείξουμε ότι τα αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται.

3.4.1 Απόκλιση από την μέση τιμή

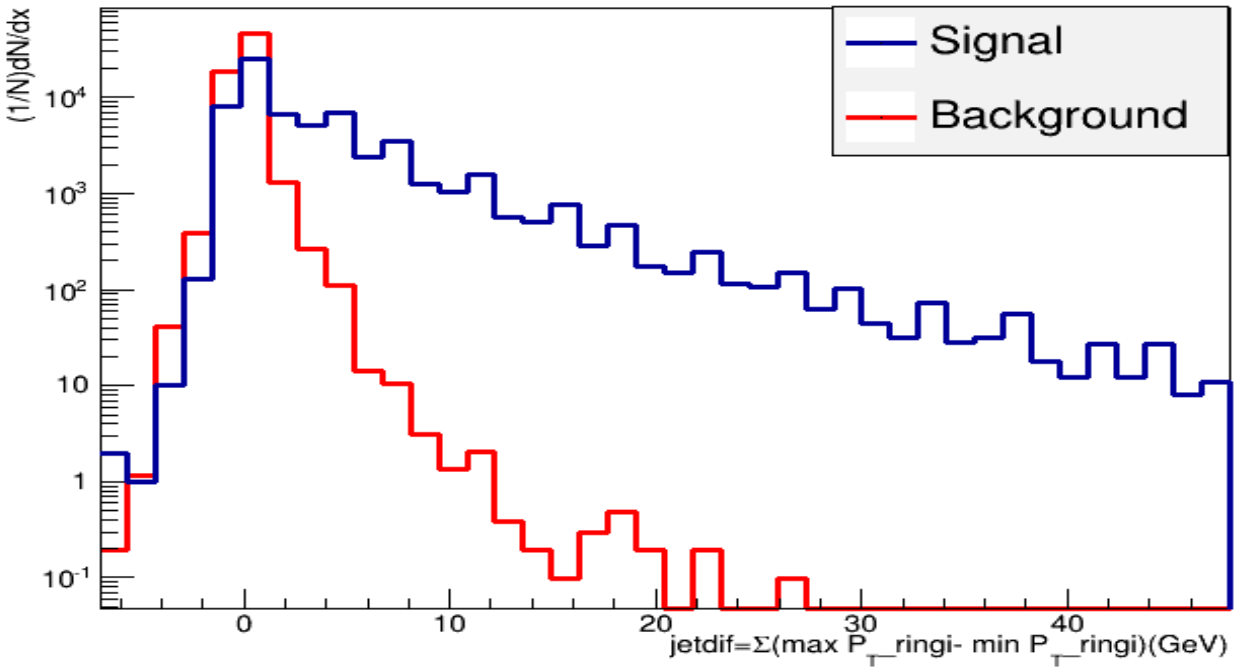
Η μεταβλητή μετρά πόσες φορές είναι μεγαλύτερη η ενεργεία του κεντρικού πύργου σκανδαλισμού του πίδακα από την μέση τιμή της ενεργείας των πύργων σκανδαλισμού στον πίδακα. Μπορούμε να δούμε πως υπάρχει μια αρκετά σημαντική διαφορά μεταξύ των κατανομών σήματος και υποβάθρου. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως seed_mean_dif (Εικόνα 3.21).



Εικόνα 3.21 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής seed_mean_dif.

3.4.2 Διαφορά των μεγίστων και των ελαχίστων σε κάθε δακτύλιο

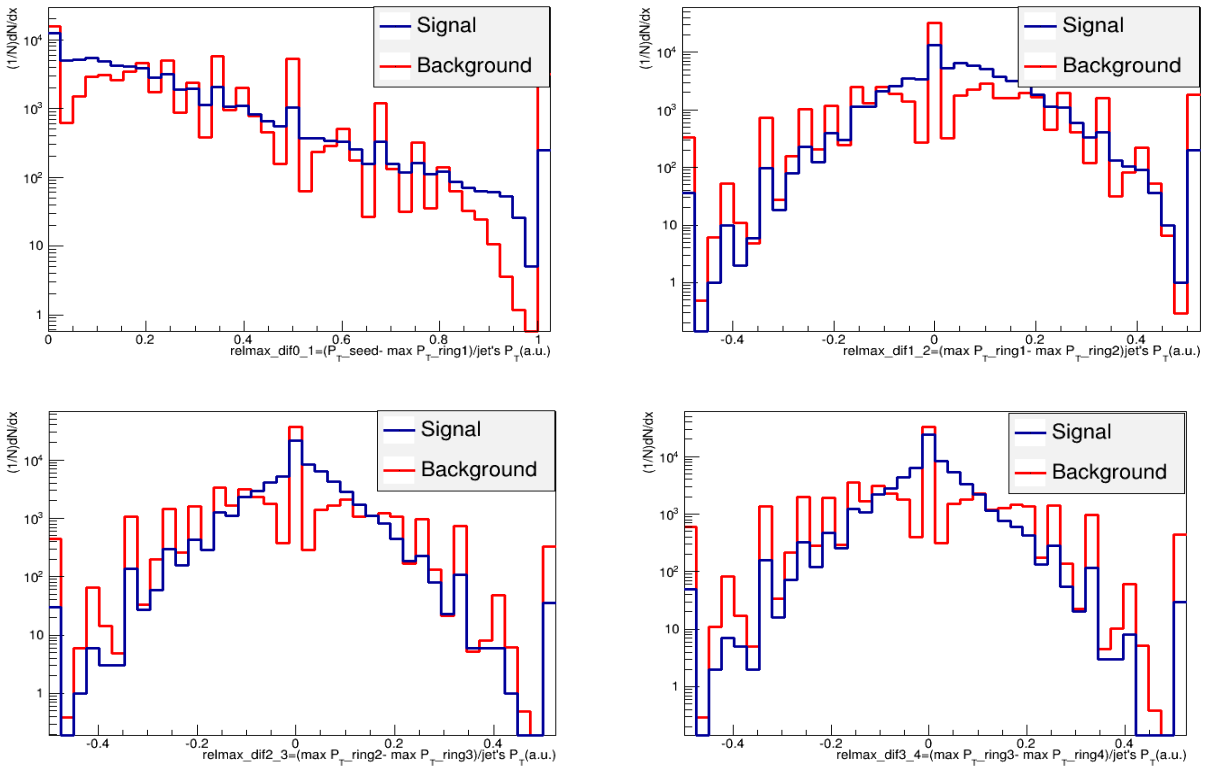
Ο κώδικας αυτής της μεταβλητής βρίσκει την μέγιστη και την ελάχιστη (μη μηδενική) τιμή ενέργειας των πύργων σκανδαλισμού κάθε δακτυλίου και τις αφαιρει. Ως δακτύλιο ορίζουμε το σύνολο των πύργων σκανδαλισμού που σχηματίζουν ένα τετράγωνο(Εικόνα 3.24). Εν συνεχεία προσθέτει τα αποτελέσματα για όλους τους δακτυλίους του πίδακα. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως jetdif (Εικόνα 3.22).



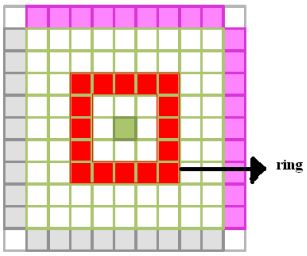
Εικόνα 3.22 Το ιστόγραμμα της μεταβλητής jetdif.

3.4.3 Διαφορά των μεγίστων γειτονικών δακτυλίων

Ο κώδικας αυτής της μεταβλητής βρίσκει την μέγιστη τιμή της ενέργειας σε κάθε δακτύλιο ενός πίδακα. Στην συνέχεια αφαιρει τις μέγιστες τιμές δύο διαδοχικών δακτυλίων και τα διαιρεί με την συνολική ενέργεια του πίδακα. Έχουμε τέσσερα διαφορετικά διαγράμματα, ένα για κάθε διαφορά μεταξύ δακτυλίων. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως relmax_dif και στην συνέχεια ακολουθεί ο αριθμός που δείχνει τους δακτυλίους (Εικόνα 3.23).



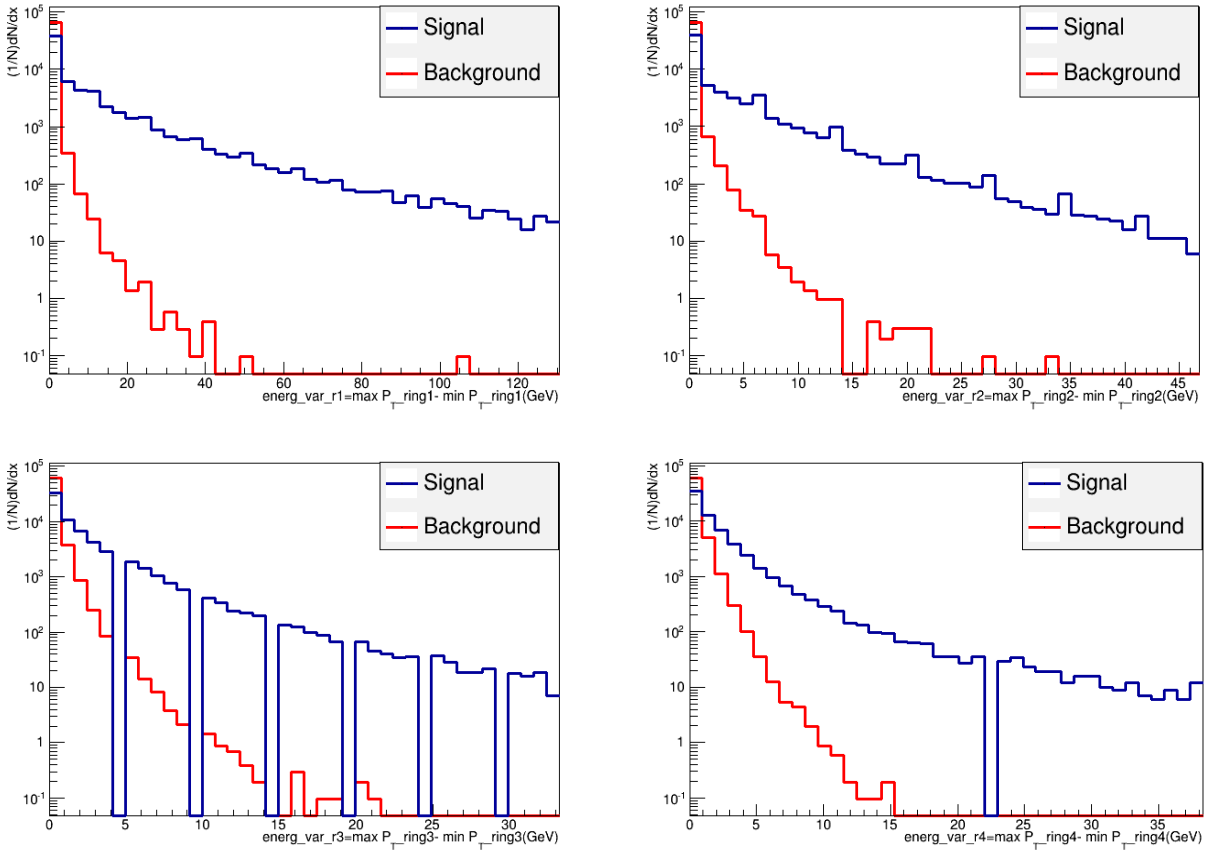
Εικόνα 3.23 Τα ιστογράμματα της μεταβλητής relmax_dif για κάθε ζευγάρι προσκείμενων δακτυλίων.



Εικόνα 3.24 Κάθε ολοκληρωμένο τετράγωνο του πίδακα αποτελεί ένα ring. Με κόκκινο χρώμα βλέπουμε το δεύτερο ring του πίδακα.

3.4.4 Ποσοστό απώλειας ενέργειας ανάμεσα στους δακτυλίους

Ο κώδικας αυτής της μεταβλητής υπολογίζει την ενέργεια κάθε δακτυλίου και την αφαιρει από την ενέργεια του προηγούμενου. Στην συνέχεια διαιρεί το αποτέλεσμα με την ενέργεια του πίδακα. Και σε αυτήν την περίπτωση έχουμε τέσσερα διαφορετικά διαγράμματα. Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως energ_var και ακολουθείται από τον αριθμό του δακτυλίου που υπολογίστηκε (Εικόνα 3.25).



Εικόνα 3.25 Τα ιστογράμματα της μεταβλητής energ_var για κάθε ζευγάρι προσκείμενων δακτυλίων.

4. TMVA

4.1 Εισαγωγή

Το πρόγραμμα Toolkit for MultiVariarte Analysis (TMVA) είναι ένα πλαίσιο εργασίας, που χρησιμοποιείται και μέσω του προγράμματος ROOT, και είναι γραμμένο σε C++[44]. Αυτό το λογισμικό δίνει την δυνατότητα να επεξεργαζόμαστε δεδομένα με πολλές, σύγχρονες τεχνικές. Επιπροσθέτως, επιτρέπει την εξέταση των αποτελεσμάτων, την σύγκριση διαφορετικών μεθόδων και μεταβλητών και τον υπολογισμό των επιδόσεών τους στο πρόβλημα που έχουμε. Κάθε μέθοδός, πριν κληθεί να αντιμετωπίσει κάποιο πρόβλημα, πρέπει να εκπαιδευτεί και να εξεταστεί.

Στο TMVA η εκπαίδευση και η εξέταση των μεθόδων γίνεται σε δύο διαφορετικά βήματα. Στο πρώτο βήμα, το πρόγραμμα με την χρήση του αντικειμένου Factory εκπαιδεύει κάθε μέθοδο που θέλουμε, χρησιμοποιώντας ένα τμήμα των δεδομένων που του παρέχουμε. Στην συνέχεια χρησιμοποιεί ένα δεύτερο τμήμα δεδομένων, το οποίο δεν έχει χρησιμοποιηθεί για εκπαίδευση, και τις εκπαιδευμένες (πια) μεθόδους, ώστε να εκτελέσει κάποια διεργασία. Στο τέλος αυτής της φάσης υπάρχει και η αξιολόγηση της κάθε μεθόδου.

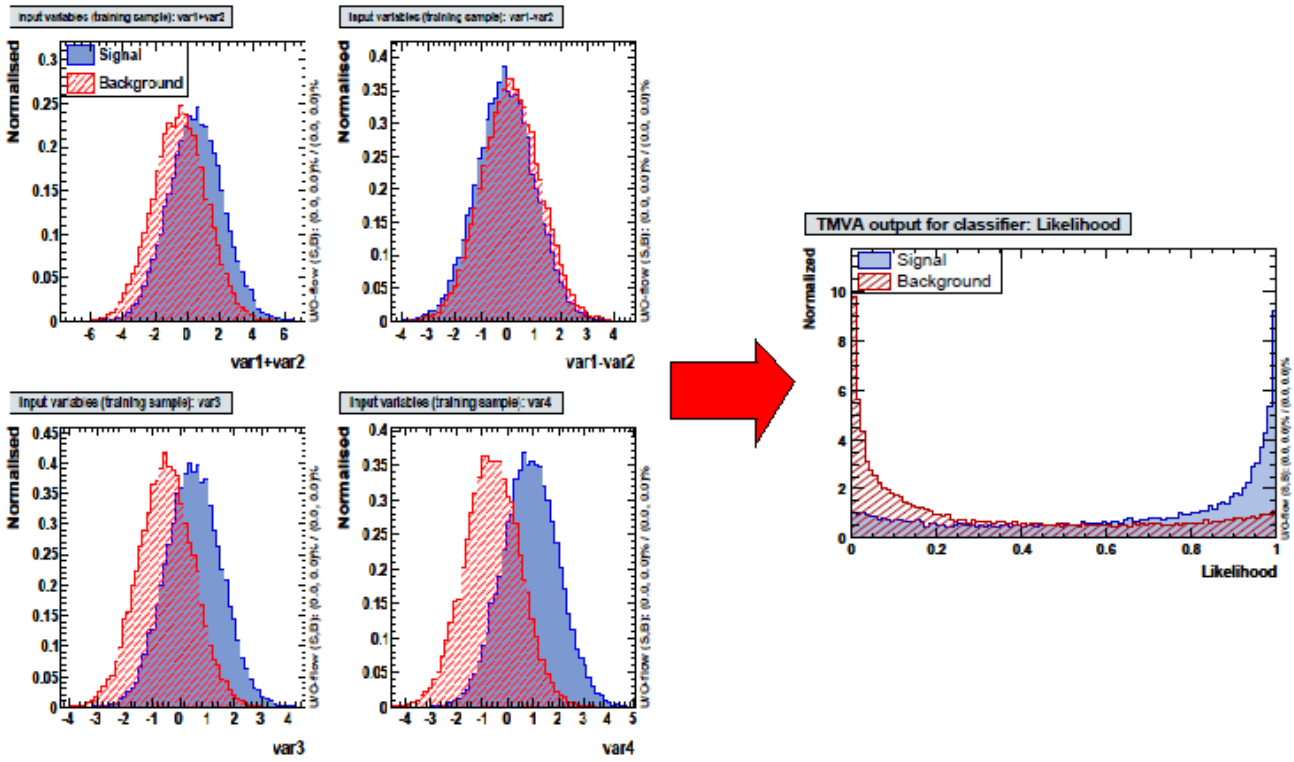
Οι διεργασίες που μπορεί να εκτελέσει το TMVA είναι μόνο δύο: classification και regression. Στην classification το πρόγραμμα έχει ως σκοπό να διαχωρίσει ποια γεγονότα ανήκουν στο σήμα και ποια στο υπόβαθρο, από ένα σύνολο δεδομένων. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό ενός ταξινομητή (ή αλλιώς συνάρτηση ταξινόμησης-classifier), δηλαδή μίας συνάρτησης που εξάγεται από τον υπολογισμό όλων των μεταβλητών και ένα σύνολο απαιτήσεων που δημιουργήθηκαν στην εκπαίδευση, ώστε να διαχωρίζει επιτυχώς σήμα και υπόβαθρο. Σε αυτήν βασίζεται η διαδικασία classification (Εικόνα 4.1). Σε μία παραλλαγή αυτής της διεργασίας μπορούμε να φτιάξουμε και δικές μας κατηγορίες ταξινόμησης και ο αριθμός τους να ξεπερνά το δύο. Σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι όλες οι μέθοδοι διαχωρισμού ή οι επιλογές τους διαθέσιμες. Στην regression η εκπαιδευμένη μέθοδος καλείται δεχόμενη ένα σύνολο δεδομένων να εκτιμήσει τις τιμές που ακολουθούν. Αυτή η διεργασία μπορεί να εκτελεστεί με λιγότερες μεθόδους από ότι ο διαχωρισμός. Στο τέλος, και οι δύο διεργασίες εκτυπώνουν αρχεία βαρών που περιέχουν όλες τις αναγκαίες πληροφορίες για τις εκπαιδευμένες μεθόδους.

Αφού καθορίσουμε ποιά (ή ποιές) μέθοδος είναι η καλύτερη, ακλουθεί η χρήση της σε πραγματικά γεγονότα. Σε αυτήν την περίπτωση καλείται το αντικείμενο Reader. Αυτό το αντικείμενο διαβάζει τα αποτελέσματα εκπαίδευσης όλων των μεθόδων (ή ενός υποσυνόλου τους) και δέχεται πραγματικά δεδομένα που τα διαχωρίζει ή εκτιμά κάποιες τιμές, ανάλογα με την διεργασία που θέλουμε να εκτελέσουμε. Στο τέλος μας παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε μία εύκολα διαχειρίσιμη μορφή.

4.1.1 Factory

Για την εκπαίδευση των μεθόδων χρειάζεται να εισάγουμε ένα σύνολο μεταβλητών που περιγράφουν συγκεκριμένα γεγονότα στο Factory (Εικόνα 4.2 α). Οι τύποι αυτών των μεταβλητών πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστές και καθορισμένες. Τα γεγονότα αυτά μπορούμε να τα επεξεργαστούμε μόνο, εάν έχουν δύο συγκεκριμένες μορφές αρχείου την .tree και .txt. Μπορούμε να θέσουμε συγκεκριμένες αποκοπές γεγονότων (cuts) σε μία ή περισσότερες μεταβλητές στο σήμα ή στο υπόβαθρο ή και στα δύο κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο εάν μας ενδιαφέρει ο διαχωρισμός υποβάθρου και σήματος από μία ορισμένη τιμή και πάνω. Παράδειγμα μίας τέτοιας περίπτωσης, είναι να μας αφορούν οι πίδακες με ορμή από 7GeV και πάνω. Δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθούν γεγονότα με ορμή έως 7 GeV. Υπάρχει η πιθανότητα να αλλάξουν τις κατανομές και να επηρεάσουν τις μεθόδους. Επίσης, μπορούμε να ορίσουμε το βάρος συμμετοχής της κάθε μεταβλητής εάν αυτό είναι απαραίτητο. Είναι δυνατόν να πετύχουμε καλύτερη εκπαίδευση, δίνοντας βάρος σε μία μεταβλητή εάν βλέπουμε ότι είναι πιο χρήσιμη από τις άλλες. Γενικά κάτι τέτοιο δεν συνίσταται, διότι η διαδικασία του διαχωρισμού είναι αυτοματοποιημένη και δεν έχουμε πρόσβαση σε όλα τα στάδια της. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν κάποια μεταβλητή που την

βλέπουμε ως αδύναμη μετά από μερικές διεργασίες να γίνει πιο ισχυρή από άλλες. Μία άλλη πολύ χρήσιμη επιλογή είναι η κανονικοποίηση. Μπορούμε να κανονικοποιήσουμε τις μεταβλητές σε διάφορες τιμές. Οι επιλογές είναι: α)καμία κανονικοποίηση, β)κανονικοποίηση ώστε το άθροισμα των βαρών του σήματος και του υπόβαθρου να είναι ίσα με τον αριθμό των γεγονότων που χρησιμοποιήσαμε για την εκπαίδευση τους, και γ) κανονικοποίηση ώστε τα γεγονότα του σήματος και του υποβάθρου να έχουν τον ίδιο αριθμό. Αρκετοί classifiers μεθόδων παρουσιάζουν ευαισθησία στον αριθμό των γεγονότων που τους εκπαιδεύουν. Ωστόσο η αποδοτικότητα σήματος και υποβάθρου παραμένει ανεπηρέαστη από την σχετική αφθονία σήματος/υποβάθρου. Το σήμα και το υπόβαθρο χωρίζονται σε δύο τμήματα, ένα για την εκπαίδευση και ένα για την αξιολόγηση. Μπορούμε να διαλέξουμε εμείς τον αριθμό των γεγονότων για το ένα τμήμα και για το άλλο. Ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιούμε, ο βέλτιστος αριθμός γεγονότων εκπαίδευσης είναι διαφορετικός. Κάποιες μέθοδοι απαιτούν περισσότερα γεγονότα για την σωστή εκπαίδευση τους, ενώ άλλες απαιτούν λιγότερα. Τα γεγονότα χωρίζονται σε αυτά τα δύο τμήματα είτε με τυχαίο τρόπο, είτε με την λογική «ένα γεγονός για εκπαίδευση ένα για αξιολόγηση, εναλλάξ». Το επόμενο κομμάτι είναι η εκπαίδευση των μεθόδων. Από την εκπαίδευση τους προκύπτουν αρχεία (weight files) τα οποία είναι τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης για την κάθε μέθοδο και χρησιμοποιούνται από τον Reader για τον διαχωρισμό σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης, εκτυπώνονται πολλά ιστογράμματα για την κάθε μέθοδο, που έχουν ως σκοπό να συμπεριληφθούν στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της κάθε μεθόδου.



Εικόνα 4.1 Η αναπαράσταση της λειτουργίας της μεθόδου TMVA.

Μετά το πέρας της εκπαίδευσης σειρά έχει η αξιολόγηση. Το Factory διαβάζει τα weight files που δημιουργήθηκαν στην φάση της εκπαίδευσης και χρησιμοποιεί το δεύτερο κομμάτι των γεγονότων για να αξιολογήσει την κάθε μέθοδο. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης εκτυπώνονται σε ένα αρχείο, και αποτελούν το βασικό μας εργαλείο για το πως συμπεριφέρεται η κάθε μέθοδος σε συνθήκες πραγματικής ανάλυσης. Αυτά τα αποτελέσματα και ένα σύνολο διαγραμμάτων, αντανακλούν την επίδοση της κάθε μεθόδου και μας βοηθούν να αποφανθούμε ποιά είναι η καλύτερή. Ανάμεσα στα διαγράμματα ανήκουν, η αποδοτικότητα του σήματος ως συνάρτηση της αποκοπής γεγονότων υποβάθρου και η σημαντικότητα

(significance) που ορίζεται ως η διαφορά των ταξινομητών σήματος και υποβάθρου προς την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους.

4.1.2 Reader

Μετά την εκπαίδευση και την αξιολόγηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον Reader (Εικόνα 4.2 β) για να αναλύσουμε δεδομένα. Τα δεδομένα πρέπει επίσης να έχουν μία από τις δύο μορφές αρχείου, .tree και .txt, όπως απαιτήθηκε και κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, πρέπει να έχουν τις ίδιες επιλογές όπως κατά την εκπαίδευσή τους και οι μεταβλητές την ίδια σειρά ορισμού. Το αποτέλεσμα είναι ένας αριθμός που σχετίζεται με την πιθανότητα ένα γεγονός να είναι σήμα ή υπόβαθρο. Η πιθανότητα να είναι ένα γεγονός i σήμα, είναι:

$$P(i) = \frac{f_s y_s(i)}{f_s y_s(i) + (1 - f_s) y_b(i)} \tag{4.1}$$

Όπου $f_s = \frac{N_s}{N_s + N_b}$ και N_s ο αριθμός των γεγονότων που είναι σήμα. Η συνάρτηση $y_s(i)$ είναι η συνάρτηση ταξινόμησης μίας μεθόδου.

4.2 Υπερεκπαίδευση

Η υπερεκπαίδευση (overtraining) εμφανίζεται κατά την εκπαίδευση μεθόδων TMVA. Είναι ένα πρόβλημα που δημιουργείται όταν απαιτούμε πολλές παράμετροι της μεθόδου να καθοριστούν με χρήση λίγων δεδομένων. Η ευαισθησία στην υπερεκπαίδευση εξαρτάται από την μέθοδο που χρησιμοποιούμε. Για παράδειγμα, η μέθοδος Fisher[44] σπάνια υπερεκπαιδεύεται, ενώ τα boosted decision trees, εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα αντίμετρα, πάντα πάσχουν τουλάχιστον από μερική υπερεκπαίδευση. Η υπερεκπαίδευση οδηγεί σε φαινομενική αύξηση της απόδοσης μίας μεθόδου ανάλογα σε ποιό τμήμα των γεγονότων υπολογίζεται η απόδοση της (Εικόνα 4.3). Εάν μετρήσουμε την απόδοση μίας μεθόδου στο κομμάτι των γεγονότων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση τότε έχουμε αύξηση της απόδοσης, ενώ αν την μετρήσουμε στο κομμάτι της αξιολόγησης, παρατηρούμε απότομη μείωση. Ένας εύκολος και πρακτικός τρόπος για να τα εξετάσουμε την ύπαρξή της, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εκπαίδευσης και της αξιολόγησης. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 4.3 για να ελέγξουμε Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να προστατέψουμε μία μέθοδο από την υπερεκπαίδευση. Οι τρόποι αλλάζουν ανάλογα με την μέθοδο που εκπαιδεύουμε.

4.3 Προεπεξεργασία

Είναι δυνατόν να προεπεξεργαστούμε τις μεταβλητές πριν τις χρησιμοποιήσουμε για την εκπαίδευση των μεθόδων. Κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο γιατί μπορεί να μειώσει τους συσχετισμούς μεταξύ μεταβλητών ή να τις μετατρέψει σε μία άλλη κατανομή. Κάθε προεπεξεργασία δημιουργεί και τις αντίστοιχες πληροφορίες στο weight file ώστε να χρησιμοποιούνται και κατά την ανάλυση πραγματικών γεγονότων από τον Reader. Οι επιλογές της προεπεξεργασίας είναι οι εξής:

- Κανονικοποίηση μεταβλητών
- Αποσυσχέτιση μεταβλητών
- Αποσυσχέτιση με χρήση της μεθόδου PCA[44]
- Μετατροπή της κατανομής σε ομοιόμορφη μορφή
- Μετατροπή της κατανομής σε Gaussian μορφή

Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να εφαρμοστούν για όλες ή ορισμένες μεταβλητές. Κάθε τέτοια ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιείται περισσότερες από μία φορές σε διάφορες μεθόδους. Οι υπολογισμοί της προεπεξεργασίας γίνονται μία φορά, αποθηκεύονται και μετά όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν τους ίδιους υπολογισμούς, αν και όταν αυτό απατηθεί.

4.3.1 Κανονικοποίηση μεταβλητών

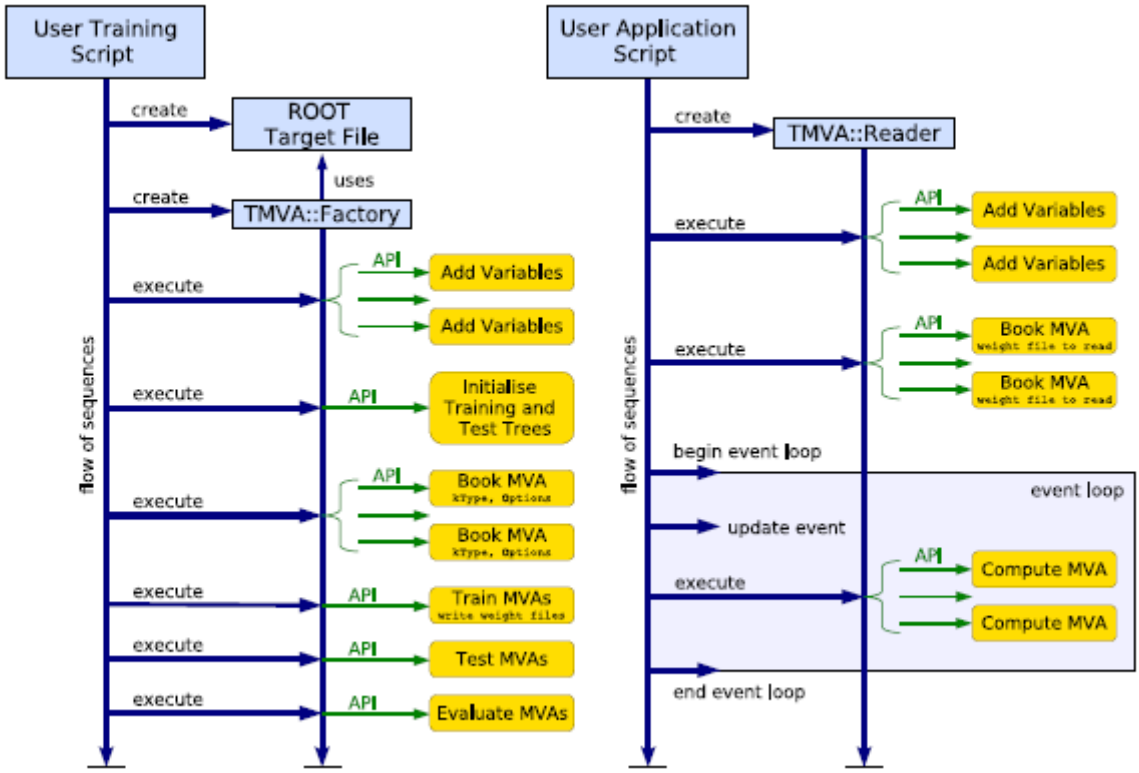
Η κανονικοποίηση μεταβλητών βρίσκει την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή στο τμήμα των δεδομένων εκπαίδευσης, και μέσω ενός γραμμικού μετασχηματισμού τις θέτει σε ένα διάστημα τιμών [-1,1]. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός είναι χρήσιμος επειδή επιτρέπει την άμεση σύγκριση των βαρών που δίνονται στις μεταβλητές από τις μεθόδους. Όσο μεγαλύτερο το βάρος τόσο μεγαλύτερη η διαχωριστική δύναμη της μεταβλητής.

4.3.2 Αποσυσχέτιση μεταβλητών

Ένα σημαντικό μειονέκτημα αρκετών μεθόδων όπως η likelihood, είναι η μη συμπερίληψη των συσχετισμών μεταξύ των μεταβλητών που χρησιμοποιούν (Εικόνα 4.4). Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχουν συσχετισμοί μεταξύ των μεταβλητών και αυτό οδηγεί σε μία σημαντική μείωση της απόδοσης των συγκεκριμένων μεθόδων. Όταν οι συσχετισμοί είναι γραμμικοί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας συνδιακύμανσης. Ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι ένας πίνακας του οποίου τα στοιχεία εκφράζουν τον συσχετισμό μεταξύ δύο μεταβλητών. Εάν ο πίνακας της συνδιακύμανσης είναι C το πρόγραμμα τον μετατρέπει σε διαγώνιο (C') βρίσκει τον αντίστροφο και τον πολλαπλασιάζει με τις αρχικές μεταβλητές:

$$X' \rightarrow (C')^{-1} X$$

Μία τέτοια διεργασία απαιτεί το πολύ γραμμικούς συσχετισμούς και Gaussian μορφή κατανομών. Εάν κάποιο από τα δύο δεν ισχύει, τότε λίγη βοήθεια μπορεί να προσφέρει μία τέτοια τεχνική. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών συσχετισμών ενδέχεται να οδηγήσει και σε απώλεια της απόδοσης.



Εικόνα 4.2 α)Το διάγραμμα ροής κατά την λειτουργία της εκπαίδευσης β) το διάγραμμα ροής κατά την ανάλυση.

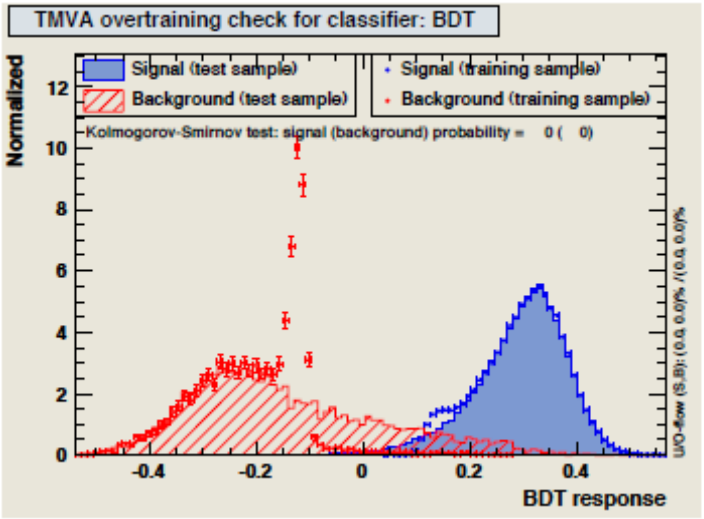
4.3.3 Αποσυσχέτιση με χρήση της μεθόδου PCA

Η ανάλυση κύριων συστατικών (Principal Component Analysis-PCA) δεν διαφέρει από την προηγούμενη μέθοδο ως προς την τεχνική, με την έννοια ότι και τώρα εκτελείται ένας γραμμικός μετασχηματισμός

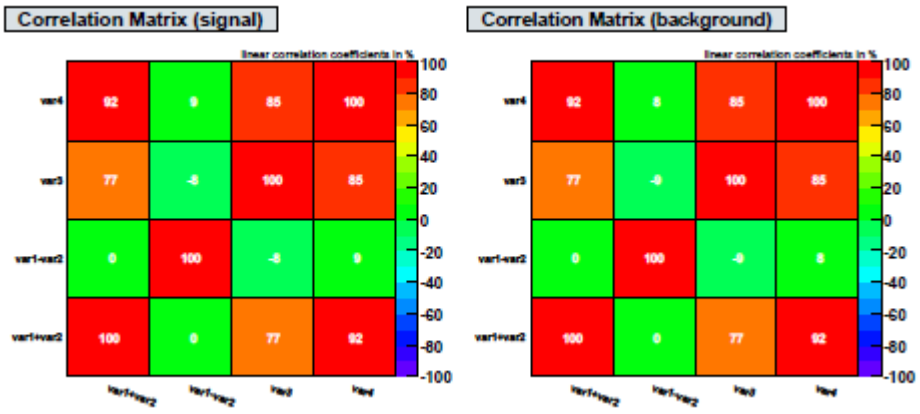
μεταβλητών. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τώρα λαμβάνονται υπόψη οι παράγωγοι των μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εμφανές ποιες μεταβλητές έχουν την μεγαλύτερη μεταβολή. Συγκεκριμένα σε ένα σύστημα μετασχηματισμένο με PCA μέθοδο, η πρώτη μεταβλητή έχει την μεγαλύτερη μεταβολή, η δεύτερη την δεύτερη μεγαλύτερη και ούτω καθεξής. Επίσης, μπορεί να μειωθεί η διάσταση του προβλήματος, αγνοώντας τις μεταβλητές που έχουν την μικρότερη μεταβολή.

4.3.4 Μετατροπή σε ομοιόμορφη και κανονική κατανομή

Οι τεχνικές αποσυσχετισμού που περιγράφτηκαν παραπάνω απαιτούν το πολύ γραμμικό συσχετισμό και κανονικής μορφής κατανομές, που σπάνια συμβαίνει στην φυσική υψηλών ενεργειών. Έχουμε όμως την δυνατότητα να μετατρέψουμε μία κατανομή σε κανονική. Αυτό συμβαίνει σε δύο βήματα: πρώτον, μετατρέποντας την κατανομή σε ομοιόμορφη χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής όπως υπολογίστηκε στα γεγονότα εκπαίδευσης και εν συνεχεία χρησιμοποιώντας την αντίστροφη συνάρτηση σφάλματος την μετατρέπει σε κανονική με μέση τιμή που ισούται με 0 και πλάτος ίσο με την μονάδα. Ένα μειονέκτημα είναι ότι με την μετατροπή σε κανονική κατανομή, δεν μετατρέπεται μόνο η μεταβλητή στην επιθυμητή μορφή αλλά επηρεάζονται και οι συσχετισμοί μεταξύ των μεταβλητών. Εάν χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική αποσυσχετισμού σε μία μεταβλητή που μετατράπηκε σε κανονική κατανομή, η μορφή της κατανομής της μεταβλητής αλλάζει και πάλι. Έχει διατυπωθεί, ότι η επανάληψη των διαδικασιών μετατροπής της κατανομής και αποσχηματισμού περισσότερες από μία φορές ενδέχεται να βελτιώσει την απόδοση ορισμένων μεθόδων.



Εικόνα 4.3 Παράδειγμα υπερεκπαίδευσης. Παρατηρούμε ότι η κατανομή των γεγονότων εκπαίδευσης και ελέγχου έχει διαφορά. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν nodes που δεν χρησιμοποιήθηκαν και χρειάζονται κλάδεμα.



Εικόνα 4.4 Παράδειγμα πινάκα συσχετισμών.

4.4 Boosting

Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση μίας μεθόδου είναι να επαναχρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο MVA στο τμήμα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση τους, αλλάζοντας κάθε φορά τα βάρη των γεγονότων. Στο τέλος λαμβάνοντας υπόψη την απόφαση της πλειοψηφίας των αλγορίθμων MVA που παρήχθησαν, καθορίζεται αν ένα γεγονός είναι σήμα ή υπόβαθρο. Τέτοιες τεχνικές μπορεί να επιφέρουν σημαντική αύξηση της αποδόσεως των μεθόδων MVA. Παρόλο που τα decision trees είναι πιο γνωστά για την χρήση αυτής της τεχνικής, κάθε MVA μέθοδος μπορεί δυνητικά να ευνοηθεί από αυτήν.

4.4.1 AdaBoost

Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος για διεργασίες boosting είναι ο αλγόριθμος προσαρμοσμένου boost (adaptive boosting). Η κύρια ιδέα του αλγορίθμου είναι η αύξηση των βαρών των γεγονότων που ταξινομήθηκαν λάθος την πρώτη φορά στην επόμενη επανάληψη. Όλα τα βάρη έχουν τις συνηθισμένες τους τιμές για την πρώτη εκπαίδευση της μεθόδου, ενώ στις επόμενες αλλάζουν τα βάρη των γεγονότων που ταξινομήθηκαν λάθος κατά την πρώτη εκπαίδευση. Το ίδιο συμβαίνει για κάθε επανάληψη. Το προσαρμοσμένο βάρος δίνεται:

$$a = \frac{1 - err}{err} \tag{4.2}$$

Όπου err ο ρυθμός «λάθους» της προηγούμενης επανάληψης και είναι ίδιος για όλα τα γεγονότα που ταξινομήθηκαν λάθος. Η μέθοδος AdaBoost στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σε decision trees αποδίδει καλύτερα για μικρά δέντρα (1 με 2 κλαδιά) τα οποία από μόνα τους έχουν μικρή ικανότητα διαχωρισμού. Το θετικό με αυτά τα δέντρα είναι ότι δεν πάσχουν από το πρόβλημα της υπερεκπαίδευσης. Η επίδοση τους μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω αν διαλέξουμε μία «αργή» εκπαίδευση.

4.4.2 Gradient boost

Η διαδικασία της προσέγγισης μίας συνάρτησης $F(x)$ μπορεί να γίνει μέσα από ένα άθροισμα συναρτήσεων βάσης $f(x; a_m)$ επί ένα βάρος β_m:

$$F(x) = \sum_{m=0}^{m=M} \beta_m f(x; a_m) \tag{4.3}$$

Ως συνάρτηση βάσης διαλέγεται το κάθε decision tree. Μιλάμε για decision trees γιατί ενώ θεωρητικά κάθε MVA μέθοδος μπορεί να παίξει τον ρόλο της βάσης, μέχρι τώρα μόνο τα decision trees την εφαρμόζουν. Η κύρια ιδέα πίσω από αυτήν την διαδικασία είναι, να ρυθμιστούν οι παράμετροι της $F(x)$ ώστε να μειωθεί όσο τον δυνατόν περισσότερο η διαφορά της από την πραγματική τιμή του classifier y. Για την μέτρηση της απόκλισης χρησιμοποιείτε μία συνάρτηση απόκλισης $L(F, y)$ που ορίζεται ως εξής:

$$L(F, y) = \left(F(x) - y\right)^2 \tag{4.4}$$

Η μέθοδος AdaBoost χρησιμοποιεί μία εκθετική συνάρτηση απόκλισης η οποία οδηγεί στην αλλαγή των βαρών όπως είδαμε στην πιο πάνω παράγραφο. Αυτή η συνάρτηση δεν είναι ιδανική για περιπτώσεις όπου υπάρχουν ακραίες τιμές. Η ύπαρξη ακραίων τιμών οδηγεί σε μείωση της απόδοσής της. Η Gradient μέθοδος επιχειρεί να διορθώσει αυτό το μειονέκτημα εισάγοντας μία λογαριθμική συνάρτηση. Ο τρόπος λειτουργίας συνοψίζεται στον υπολογισμό της παραγώγου της συνάρτησης $L(F, y)$ και μετά στην ανάπτυξη ενός δέντρου, που προσαρμόζεται έτσι ώστε τα φύλλα του να είναι οι μέσες τιμές της παραγώγου της $L(F, y)$

στα αντίστοιχα διαστήματα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε στο ελάχιστό της $L(F, y)$. Μοναδική απαίτηση είναι να μπορεί να υπολογιστεί η παράγωγος.

4.4.3 Bagging

Η μέθοδος bagging[44] είναι μία τεχνική όπου ένας ταξινομητής εκπαιδεύεται συνέχεια χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι των δεδομένων εκπαίδευσης που αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Η bagging τεχνική δεν έχει ως σκοπό να βελτιώσει μία «αδύναμη» μέθοδο όπως οι δύο προηγούμενες, αλλά να κάνει μία μέθοδο ανεπηρέαστη σε στατιστικές διακυμάνσεις.

4.5 Μέθοδοι MVA

Όλες οι μέθοδοι TMVA έχουν μερικές κοινές επιλογές όπως όλες τις διεργασίες προεπεξεργασίας ή άλλες που έχουν ως σκοπό την αξιολόγηση μίας μεθόδου. Υπάρχουν όμως και αρκετές επιλογές που απευθύνονται αποκλειστικά σε κάποια μέθοδο. Σε αυτό το στάδιο έντεκα διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης είναι διαθέσιμες, που η κάθε μία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα. Εμείς διαλέξαμε να εκπαιδεύσουμε δύο μεθόδους την Likelihood και την Boosted Decision Trees (BDT). Ο λόγος που διαλέξαμε αυτές τις δύο είναι γιατί είναι εύκολες στην εκπαίδευση τους, γρήγορες με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η Likelihood έχει την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση όταν οι μεταβλητές δεν συσχετίζονται μεταξύ τους. Η απόδοση της μειώνεται εξαιρετικά όταν υπάρχουν συσχετισμοί. Τα BDT είναι μια «out-of-the-box» μέθοδος που σημαίνει ότι χρειάζεται λίγη εκπαίδευση για να πάρουμε αξιοπρεπή αποτελέσματα. Αν και δεν έχει την μεγαλύτερη απόδοση θεωρητικά, σε πραγματικά προβλήματα αρκετές φορές αποδίδει περισσότερο από άλλες μεθόδους. Επίσης είναι μια γρήγορη μέθοδος και εύκολη στην κατανόηση της, το οποίο την κάνει ιδανική για τον L1 στον οποίο θέλουμε ταχύτητα και πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του. Πληροφορίες για τις μεθόδους φαίνονται στο appendix A.1.

5. Η εκπαίδευση των μεθόδων

5.1 Επιλογή μεθόδων

Πριν προχωρήσουμε στην εκπαίδευση πρέπει να καθορίσουμε τις μεθόδους που σκοπεύουμε να χρησιμοποιήσουμε. Η επιλογή δεν είναι απλή γιατί κάθε μέθοδος έχει προτερήματα και μειονεκτήματα. Η απόδοση των μεθόδων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις μεταβλητές που χρησιμοποιούμε. Διαφορετικές μεταβλητές αλλάζουν την απόδοση των μεθόδων. Οπότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον μέγιστο δυνατό αριθμό μεταβλητών για την εκπαίδευση όλων των μεθόδων και αφού διαλέξουμε τις άλλες επιλογές, στο τελευταίο στάδιο της εκπαίδευσης να εξειδικεύσουμε για την κάθε μέθοδο την χρήση ενός υποσυνόλου των μεταβλητών ή του συνόλου. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε την μέγιστη δυνατή απόδοση κάθε μεθόδου. Δεν είναι όμως η απόδοση το μόνο χαρακτηριστικό που κάποιος πρέπει να λάβει υπόψη του. Θεωρητικά, η μέθοδος ANN είναι η πιο ισχυρή μέθοδος που υπάρχει, οπότε η σωστή εκπαίδευσή της δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Στην πραγματικότητα βεβαία η εκπαίδευση της ANN έχει πολλές δυσκολίες και δεν ενδείκνυται πάντα. Η ANN έχει μεγάλο αριθμό παραμέτρων που πρέπει να ρυθμιστούν, η κάθε μία εκ των οποίων μπορεί να πάρει αρκετές τιμές, γεγονός που περιπλέκει την εκπαίδευσή της και την κάνει επιρρεπή σε λάθος εκπαίδευση. Επίσης ένα πολύ μεγάλο αρνητικό αυτής της μεθόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται για την εκπαίδευσή της. Ενώ άλλες μέθοδοι χρειάζονται μερικά λεπτά, αυτή χρειάζεται μερικές ώρες. Ο χρόνος βέβαια μπορεί να αυξηθεί και από τον ορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων. Κάτι τέτοιο δυσκολεύει την εκπαίδευσή της αφού δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για να βρεθεί ο βέλτιστος. Οπότε πρέπει να προαποφασίσουμε ποιές επιλογές εκτιμούμε ότι έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα και να τις χρησιμοποιήσουμε. Ο χρήστης πρέπει δηλαδή να βασιστεί σε μία εκτίμηση, που μπορεί να αποβεί και λάθος. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας είναι ο χρόνος που θέλει το πρόγραμμα να αποφασίσει εάν ένα γεγονός είναι σήμα ή υπόβαθρο. Για παράδειγμα δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο Fisher γιατί ο χρόνος που χρειάζεται είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Μία απαίτηση του σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου είναι ότι όλες οι αποφάσεις πρέπει να γίνονται στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Οπότε η ταχύτητα απόφασης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και οι μέθοδοι που αργούν να αποφασίσουν δεν προσφέρονται. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που πρέπει να σκεφτούμε είναι κατά πόσο η μέθοδος λαμβάνει υπόψη της τον συσχετισμό μεταξύ των μεταβλητών. Ακόμα και εάν μπορούμε να βρούμε ένα σύνολο μεταβλητών που δεν έχουν συσχετισμούς, έχουμε πάντα στο μυαλό μας ότι προέρχονται από Monte Carlo. Είναι πιθανό όμως η φυσική στις νέες ενέργειες να μην περιγράφεται πλήρως από το μοντέλο μας και να χρειαστεί να βασιστούμε σε μεταβλητές που να έχουν συσχετισμούς. Μία τέτοια μέθοδος είναι η Likelihood. Στην μη ύπαρξη συσχετισμών έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση. Η απόδοση της μειώνεται αισθητά αν υπάρχουν συσχετισμοί.

5.2 Likelihood

Ο λόγος της πιθανότητας ενός γεγονότος i, ορίζεται :

$$y_L(i) = \frac{L_s(i)}{L_s(i) + L_b(i)} \tag{5.1}$$

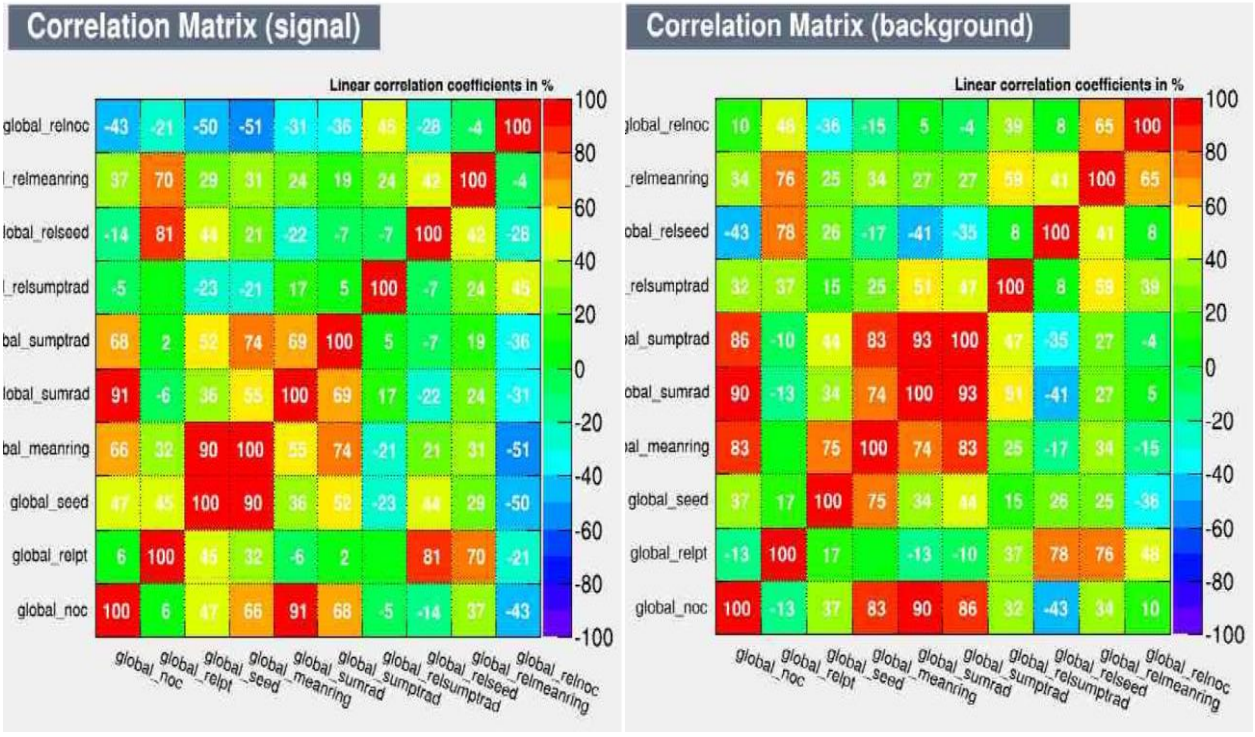
Όπου η πιθανότητα ένας υποψήφιος i να είναι σήμα ή υπόβαθρο δίνεται από την σχέση:

$$L_{s/b}(i) = \prod_{k=1}^{n_{\text{var}}} p_{s/b,k}\left(x_k(i)\right) \tag{5.2}$$

Εδώ το $p_{s/b,k}$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής x_k. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας είναι κανονικοποιημένες στην μονάδα.

5.2.1 Αποσυσχετισμός

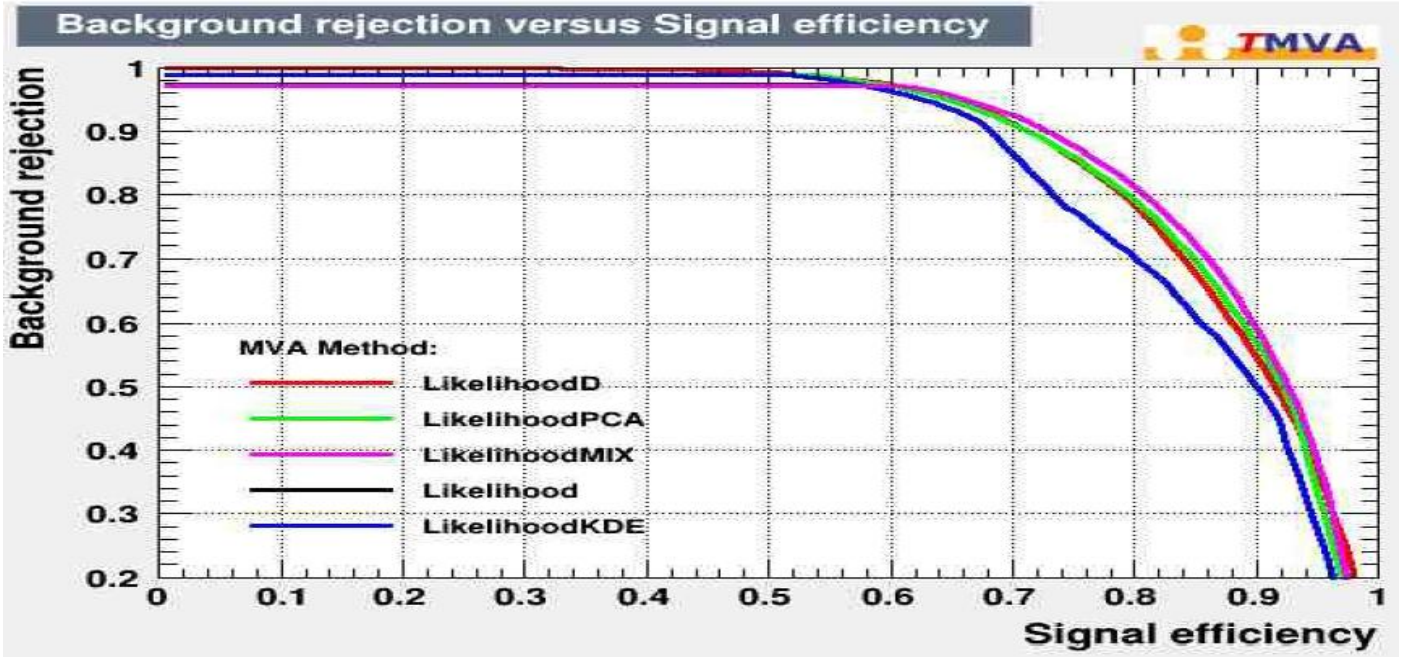
Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε κάποιες μεταβλητές στην διάθεση μας. Πρέπει να ελέγξουμε κατά πόσο υπάρχουν συσχετισμοί μεταξύ τους. Ένας τέτοιος έλεγχος είναι σημαντικός για κάθε μέθοδο, αλλά στην Likelihood έχει ιδιαίτερη βαρύτητα γιατί η μέθοδος δεν μπορεί να τους λάβει υπόψη της. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.1 υπάρχουν συσχετισμοί μεταξύ των μεταβλητών. Εξαιτίας των συσχετισμών περιμένουμε μία μείωση της αποδόσεως της μεθόδου. Όπως περιγράφτηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν τρόποι για να άρει κανείς τους συσχετισμούς, αρκεί να είναι γραμμικοί. Υπάρχουν δύο επιλογές ο αποσυσχετισμός, και ο αποσυσχετισμός με χρήση της μεθόδου PCA. Στην εικόνα 5.2 μπορούμε να δούμε την απόδοση τους. Για να δούμε την απόδοση μίας μεθόδου κοιτάμε την καμπύλη αποκοπής υπόβαθρου και αποδοτικότητας σήματος (Reciver Operating Characteristic-ROC). Όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν της καμπύλης τόσο περισσότερο υπόβαθρο μπορούμε να κόψουμε αφήνοντας περισσότερο σήμα ανέπαφο. Σε αυτήν την εικόνα βλέπουμε πως και οι δύο τεχνικές αποσυσχετισμού βελτιώνουν την απόδοση της Likelihood, με την PCA να είναι αισθητά καλύτερη. Σειρά έχει η μελέτη του μετασχηματισμού. Μπορούμε να μετασχηματίσουμε τις μεταβλητές μας σε συγκεκριμένες κατανομές (ομοιόμορφη και Gauss). Το πλεονέκτημα σε με τέτοια διεργασία είναι ότι οι τεχνικές αποσυσχετισμού έχουν φτιαχτεί για τέτοιες κατανομές. Εάν ο συσχετισμός δεν είναι γραμμικός ή μορφή της κατανομής δεν είναι κανονική τότε οι τεχνικές αποσυσχετισμού μας δίνουν μικρή βοήθεια. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρού συσχετισμού μία τεχνική αποσυσχετισμού ενδέχεται ακόμα και να χειροτερέψει τα αποτελέσματα. Με την μετατροπή σε κανονική κατανομή υπάρχει η πιθανότητα να βελτιώσουμε λίγο την απόδοση της. Ένα πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, είναι ότι παράλληλα με την μετατροπή των μεταβλητών σε κανονική κατανομή, επηρεάζονται και οι συσχετισμοί μεταξύ τους. Όπως μπορούμε να δούμε από την εικόνα 5.3 η χρήση της τεχνικής μετασχηματισμού των κατανομών δεν προσφέρει κάποια αύξηση της απόδοσης. Αύξηση δεν παρατηρείται ούτε εάν συνδυάσουμε μία τεχνική αποσυσχετισμού με μία τεχνική μετασχηματισμού (Εικόνα 5.3). Έχει προταθεί ότι η επαναλαμβανόμενη χρήση αποσυσχετισμού και μετασχηματισμού μπορεί να αυξήσει την απόδοση. Στην εικόνα 5.4 βλέπουμε ότι οδηγούμαστε σε απώλεια της απόδοσης. Το επόμενο βήμα είναι να δούμε εάν μπορούμε με κάποια μέθοδο boosting να αυξήσουμε την απόδοση. Από την εικόνα 5.5 βλέπουμε ότι ούτε αυτό βελτιώνει την απόδοση. Αντίθετα έχουμε μείωση.



Εικόνα 5.1 Ο συσχετισμός μεταξύ των μεταβλητών για το σήμα και το υπόβαθρο.

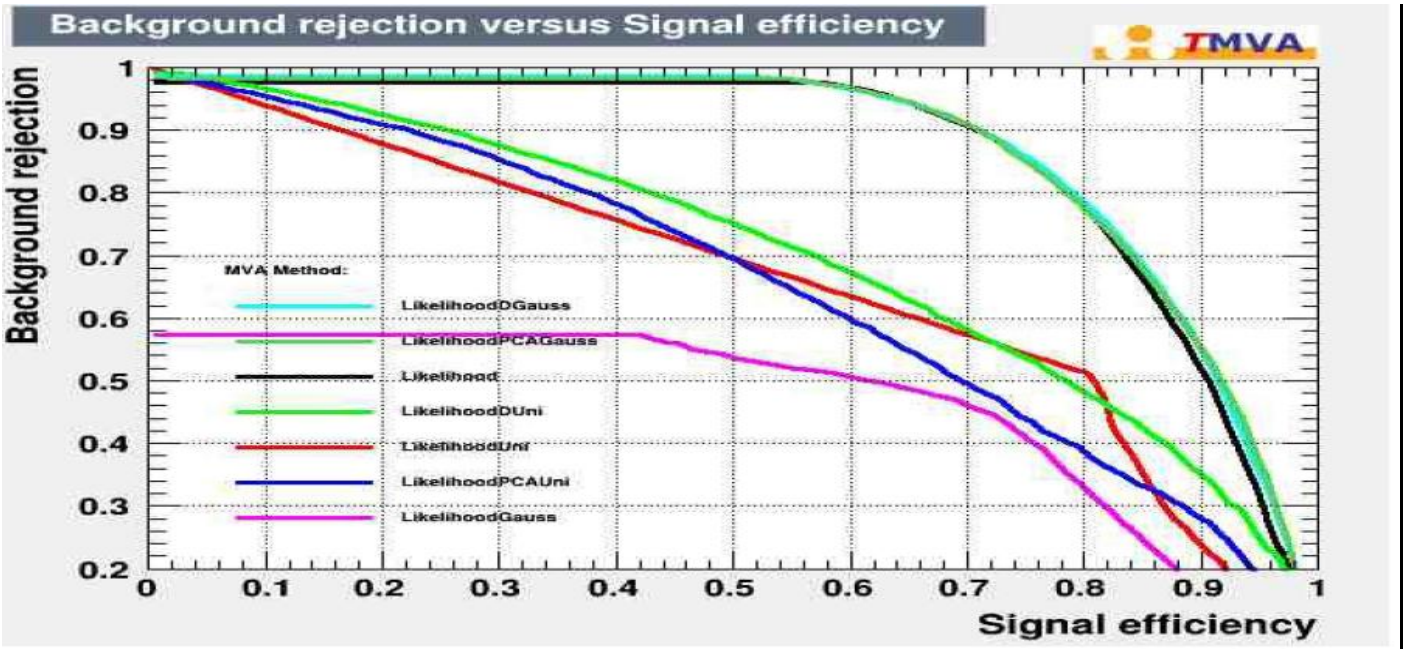
5.2.2 Κατασκευή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας

Οι συναρτήσεις πυκνοτήτων πιθανότητας κατασκευάζονται από το τμήμα γεγονότων εκπαίδευσης. Αυτό γίνεται για κάθε μεταβλητή ξεχωριστά. Το λογισμικό TMVA επιτρέπει την κατασκευή τους προσαρμόζοντας μία εξίσωση στα γεγονότα. Υπάρχουν δύο τεχνικές με τις οποίες γίνεται η προσαρμογή: των Splines και KDE. Εμείς διαλέξαμε και χρησιμοποιήσαμε την πρώτη. Εάν κοιτάξουμε την εικόνα 4.1 βλέπουμε πως η τεχνική KDE (Kernel Density Estimator) έχει πολύ χαμηλότερη απόδοση από την Splines οπότε δεν υπάρχει λόγος να την διαλέξουμε. Η μέθοδος των Splines λειτουργεί φτιάχνοντας ιστογράμματα για όλες τις μεταβλητές του σήματος και του υποβάθρου. Μετά χωρίζει τα ιστογράμματα σε μέρη (bins). Ο χρήστης μπορεί να διαλέξει πόσα γεγονότα περιλαμβάνονται σε κάθε bin.



Εικόνα 5.2 Η διαφορά της αποδόσεως των τεχνικών αποσυσχετισμού.

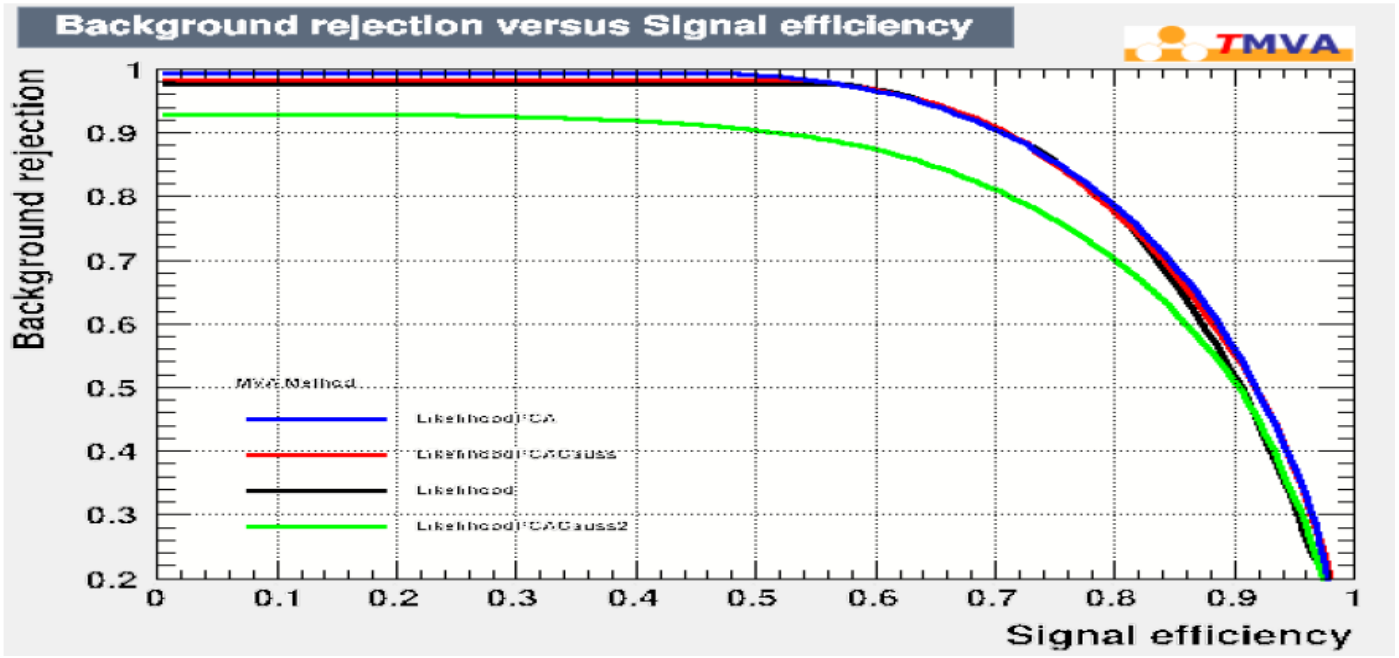
Ανάλογα με την μορφή των κατανομών διαλέγουμε τον βέλτιστο αριθμό γεγονότων. Ένας πολύ μικρός αριθμός οδηγεί την μέθοδο να είναι επιρρεπής σε στατιστικές διακυμάνσεις. Αντίθετα ένας μεγάλος μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια διαχωριστικής ικανότητας. Εμείς διαλέξαμε έναν αριθμό 25 γεγονότων ανά bin διότι, όπως βλέπουμε από την εικόνα 5.6 έχει την υψηλότερη απόδοση. Εν συνεχεία, τα ιστογράμματα αποθηκεύονται και αντιγράφονται. Στα διπλότυπά τους προσαρμόζονται τα splines. Ως spline ορίζεται ένα σύνολο πολυωνομικών συναρτήσεων ίδιας τάξης που αθροιστικά περιγράφουν ένα μικρό κομμάτι της κατανομής . Μπορούμε να διαλέξουμε την τάξη των splines. Εμείς μελετήσαμε για μηδενική, πρώτη και δεύτερη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 5.7. Όπως βλέπουμε δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη διαφορά. Με χρήση των splines η μέθοδος κατασκευάζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.



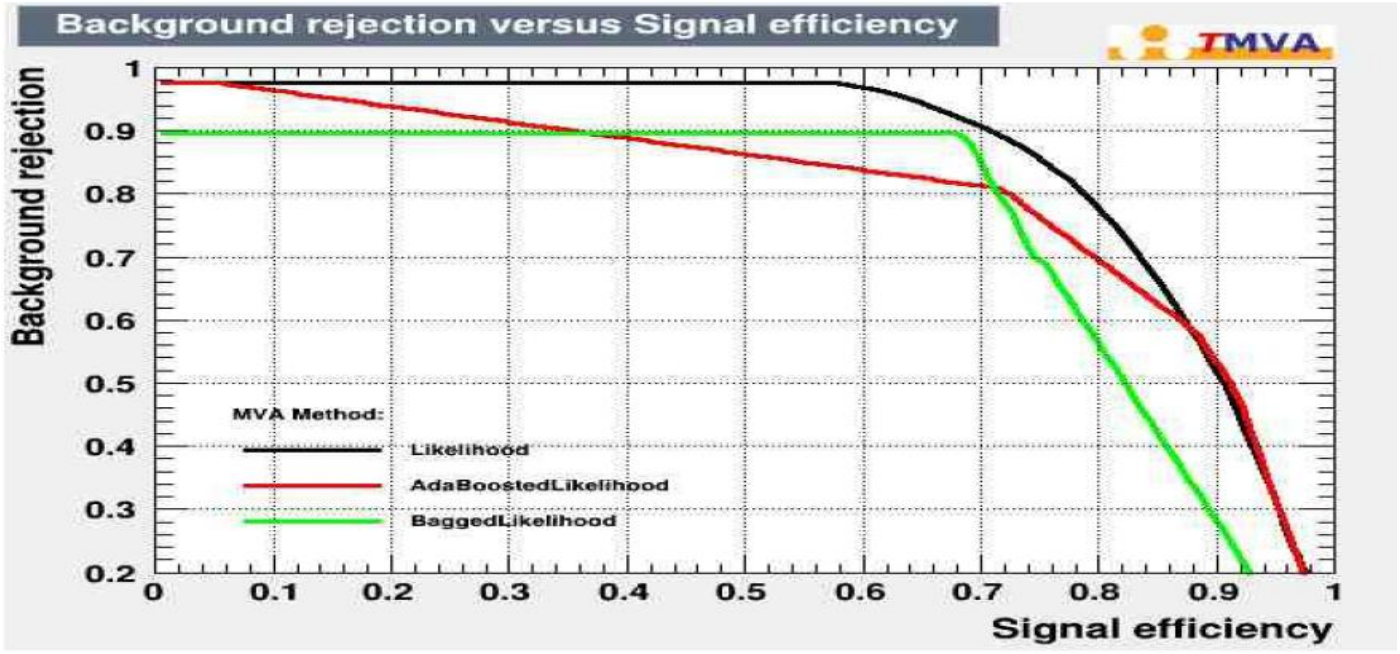
Εικόνα 5.2 Η απόδοση των τεχνικών μετασχηματισμού και η απόδοση των συνδυασμών τεχνικών αποσυσχετισμού και μετασχηματισμού.

5.2.3 Κατασκευή του classifier

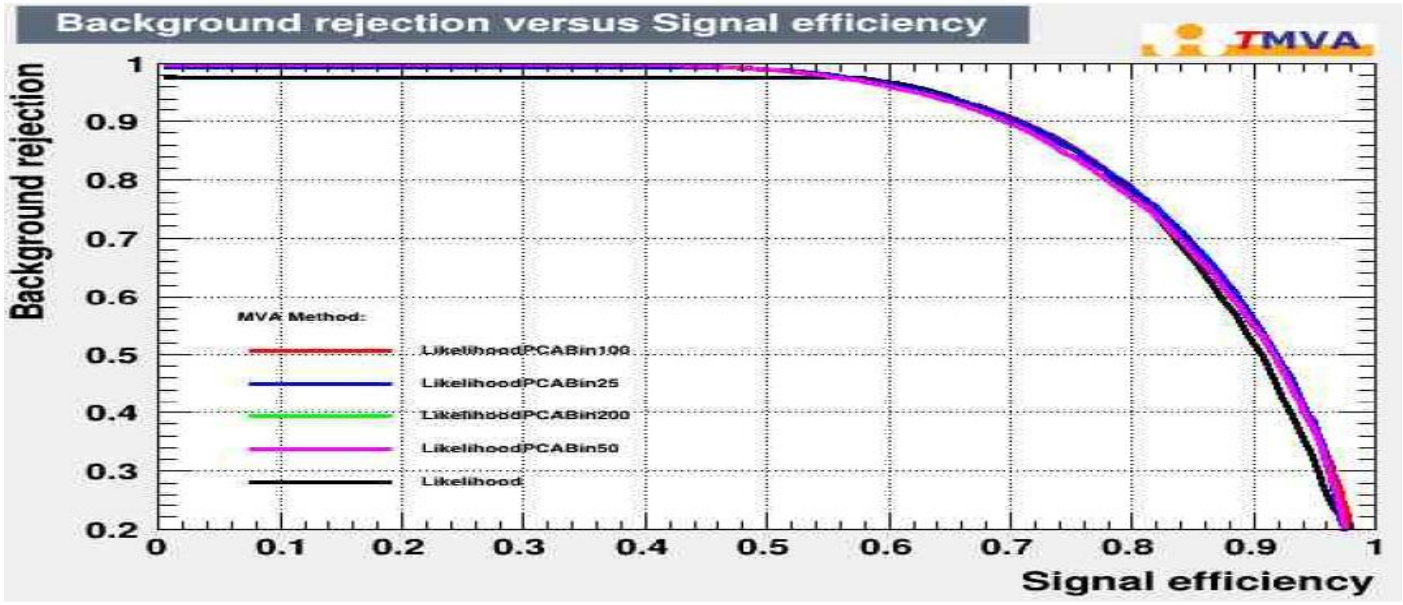
Από τα PDFs των μεταβλητών υπολογίζουμε τον λόγο πιθανότητας 5.1, που είναι ο classifier της μεθόδου. Το κλάσμα παίρνει τιμές από μηδέν έως ένα. Όσο πιο κοντά είναι στο μηδέν είναι τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να είναι υπόβαθρο ενώ όσο πλησιάζει το ένα τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα να είναι σήμα. Το πακέτο λογισμικού TMVA μας παρέχει και μία μέθοδο κατάταξης μεταβλητών. Η κατάταξη των μεταβλητών γίνεται από την χρησιμότερη προς την λιγότερο χρήσιμη. Οπότε αρχίζοντας από το τέλος μπορούμε να αφαιρούμε μεταβλητές για να δούμε αν ένα υποσύνολο των μεταβλητών αποδίδει καλύτερα. Στην εικόνα 5.8α βλέπουμε πως δεν υπάρχει τέτοιο υποσύνολο. Η τελευταία επιλογή εκπαίδευσης αφορά τον αριθμό των γεγονότων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση. Βλέπουμε από την εικόνα 5.8β ότι η βέλτιστη επιλογή είναι για 1000 γεγονότα.



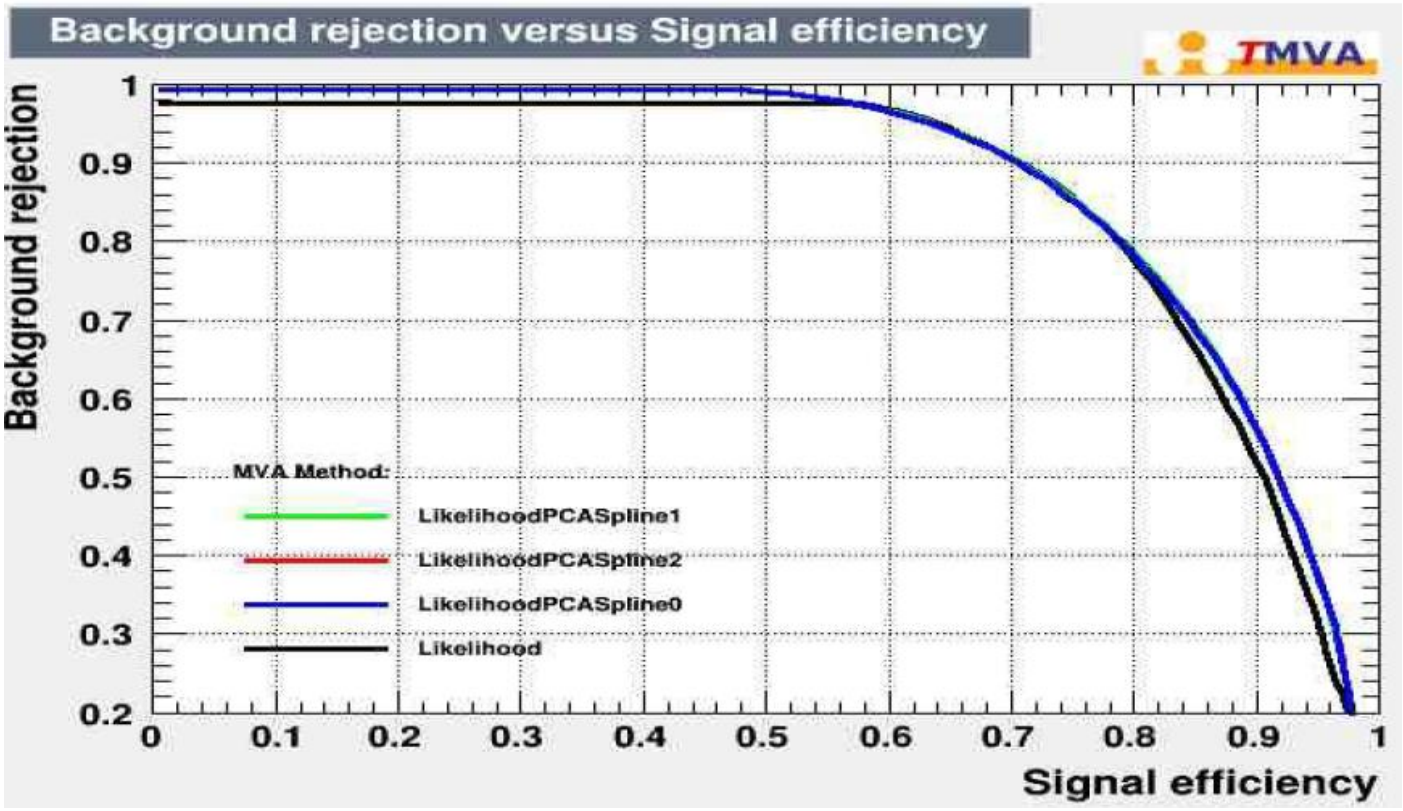
Εικόνα 5.4 Η απόδοση επαναλαμβανόμενων τεχνικών αποσυσχετισμού και μετασχηματισμού.



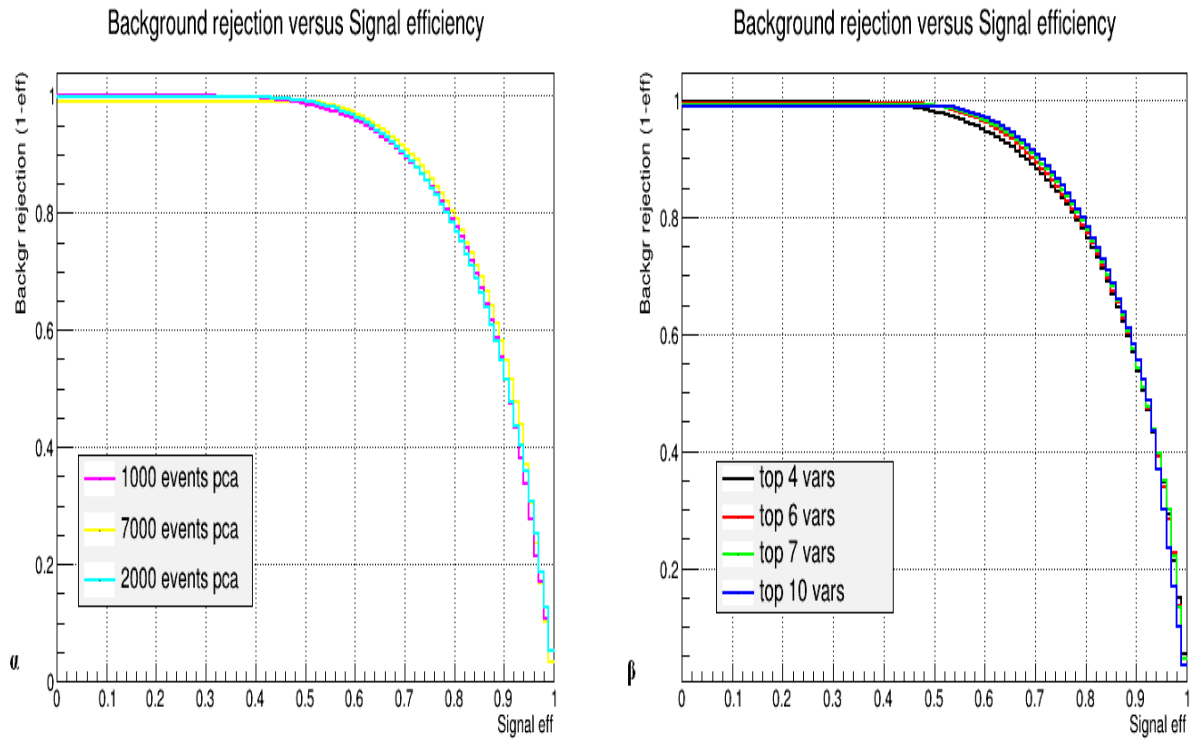
Εικόνα 5.5 Η απόδοση τεχνικών boosting.



Εικόνα 5.6 Η απόδοση για διαφορές τιμές γεγονότων ανά bin.



Εικόνα 5.7 Η απόδοση των μεθόδων για διαφορές τάξεις πολυωνύμων.

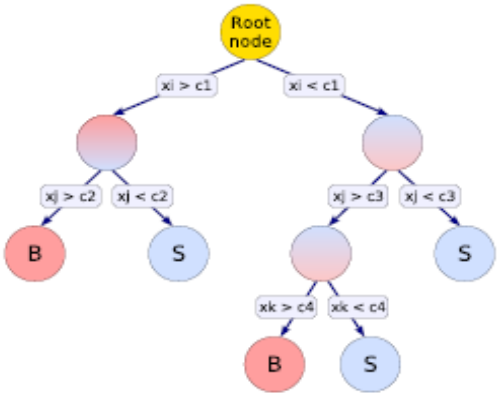


Εικόνα 5.8 α) Η απόδοση της μεθόδου για διάφορες τιμές γεγονότων εκπαίδευσης β) Η απόδοση της μεθόδου για διάφορα υποσύνολα μεταβλητών.

5.3 Boosted Decision Trees

Ένα Decision Tree (Εικόνα 5.9) λειτούργει επαναλαμβάνοντας μία διεργασία διαχωρισμού στα δεδομένα, χωρίζοντάς τα κάθε φόρα σε δύο μέρη. Η διαδικασία διαχωρισμού συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποιες απαιτήσεις. Στο τέλος της διαδικασίας έχουμε χωρίσει τον αρχικό μας χώρο σε περιοχές. Η κάθε

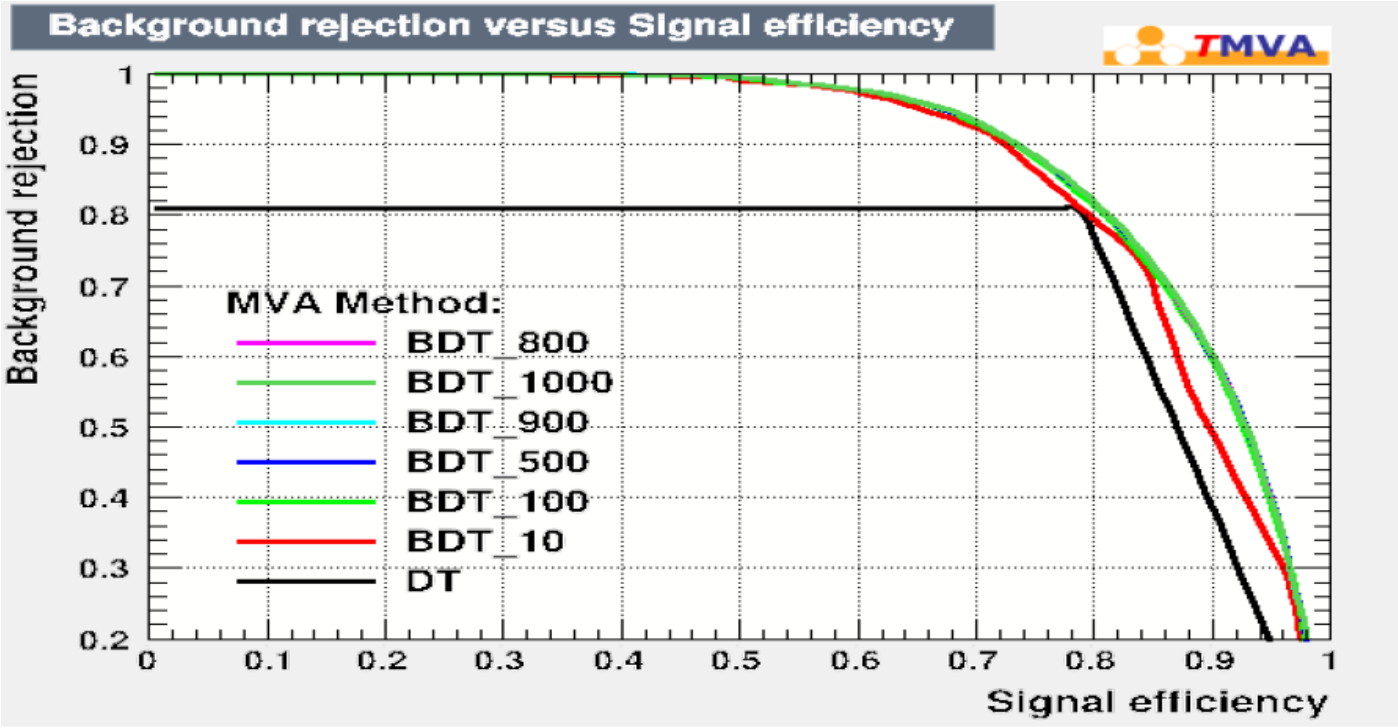
περιοχή χαρακτηρίζεται ως σήμα ή υπόβαθρο ανάλογα με την πλειοψηφία των γεγονότων. Η διαδικασία του boost επεκτείνει αυτό το σκεπτικό από ένα δέντρο σε ολόκληρο δάσος. Όλα τα δέντρα εκπαιδεύονται από το ίδιο τμήμα δεδομένων αλλάζοντας κάθε φορά τα βάρη. Η συνάρτηση ταξινόμησης συνδέεται με την πιθανότητα ένα γεγονός να είναι σήμα, αλλά δεν εκφράζει πιθανότητα. Για την απόφαση εάν ένα γεγονός είναι σήμα, λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα που δίνει κάθε δέντρο ξεχωριστά. Η κατασκευή ενός δάσους αντί ενός δέντρου έχει σημαντική αύξηση στην απόδοση της μεθόδου. Όμως δεν μπορεί η αύξηση του αριθμού των δέντρων να αυξήσει την απόδοση της μεθόδου απεριόριστα. Από έναν αριθμό δέντρων και έπειτα δεν έχει καμία επίπτωση στην αύξηση της απόδοσης της μεθόδου. Υπάρχει δηλαδή ένα σημείο «κορεσμού». Ένα χαρακτηριστικό που πρέπει να τονίσουμε είναι ότι η συνεισφορά του κάθε δέντρου στην απόδοση της μεθόδου μειώνεται με την αύξηση του αριθμού τους. Δηλαδή τα πρώτα δέντρα που προστίθενται έχουν αισθητή διαφορά στην απόδοση, τα επόμενα έχουν όλο και μικρότερη μέχρι που δεν παρατηρείται καμία διαφορά. Επίσης η αύξηση των δέντρων αυξάνει και τον υπολογιστικό χρόνο, που καλό είναι να είναι όσον τον δυνατό μικρότερος. Στην εικόνα 5.10 μπορούμε να δούμε την απόδοση της μεθόδου για τα διάφορα δέντρα.



Εικόνα 5.9 Η σχηματική αναπαράσταση του decision tree.

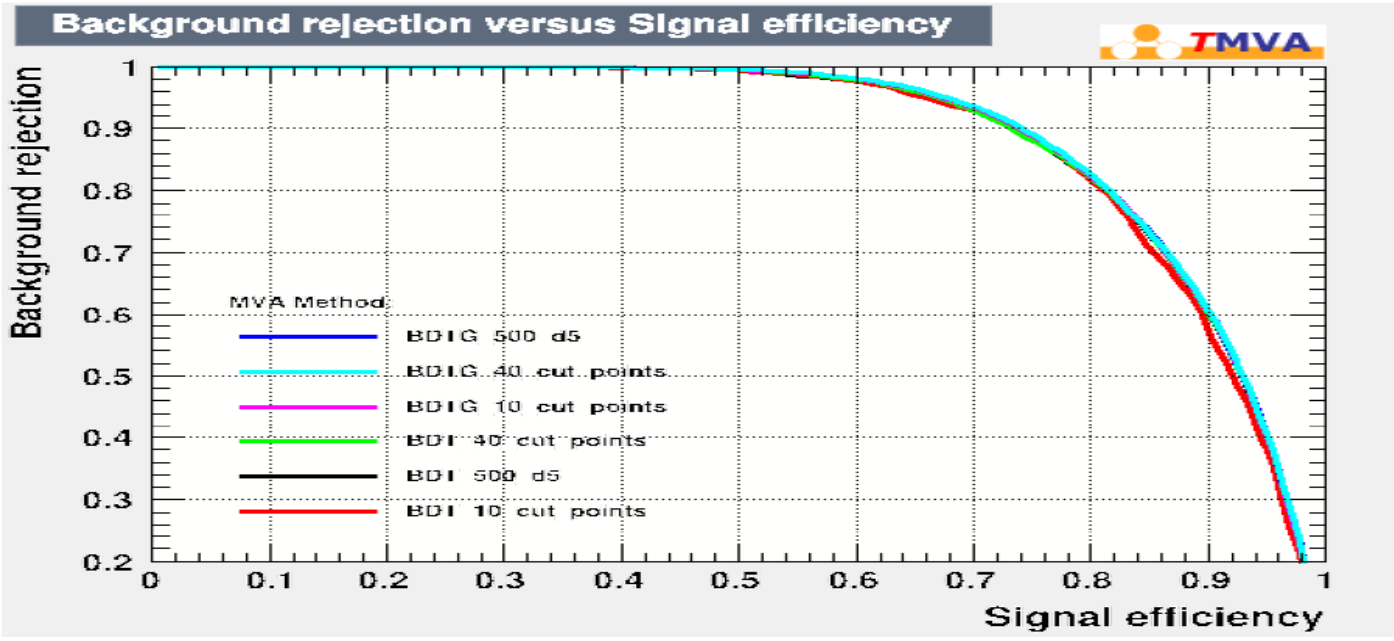
5.3.1 Κατασκευή δέντρου

Πριν προχωρήσουμε στην κατασκευή όλου του δάσους πρέπει να καθορίσουμε τις επιλογές του προγράμματος που απευθύνονται στο κάθε δέντρο ξεχωριστά. Όπως είπαμε το δέντρο μέσα από την επιβολή κάποιων τιμών αποκοπών γεγονότων σε κάποια μεταβλητή, διαχωρίζει τα δεδομένα σε δύο μέρη. Ο διαχωρισμός συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια απαίτηση (πχ μέγιστος αριθμός κλαδιών ή ελάχιστος αριθμός γεγονότων ανά κλαδί). Τα decision trees λειτουργούν θέτοντας μία τιμή αποκοπής γεγονότων σε κάποια από τις μεταβλητές έτσι ώστε ο διαχωρισμός σήματος-υποβάθρου να είναι ο μέγιστος δυνατός. Ο εντοπισμός της μεταβλητής που διαχωρίζει καλύτερα τα γεγονότα αλλά και η τιμή στην οποία συμβαίνει ο μέγιστος διαχωρισμός γίνεται ελέγχοντας τον διαχωρισμό κάθε μεταβλητής ξεχωριστά σε διαφορές του εύρους της. Το πλήθος των σημείων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της τιμής αποκοπής γεγονότων ορίζεται από τον χρήστη. Όσο περισσότερα είναι τα σημεία που χρησιμοποιούμε, με τόση μεγαλύτερη ακρίβεια βρίσκουμε την βέλτιστη τιμή. Όπως όμως και στην περίπτωση του αριθμού των δέντρων, υπάρχει ένας αριθμός σημείων που αν τον ξεπεράσουμε η απόδοση που κερδίζουμε είναι πολύ μικρή. Υπάρχει και εδώ δηλαδή ένα σημείο «κορεσμού». Επιπλέον όσο περισσότερα σημεία χρησιμοποιούμε αυξάνουμε κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο. Στην εικόνα 5.11 βλέπουμε την απόδοση για διάφορους αριθμούς σημείων. Τα decision trees είναι μία μη γραμμική μέθοδος. Μία μέθοδος χαρακτηρίζεται ως μη γραμμική εάν λαμβάνει υπόψη της τους συσχετισμούς μεταξύ των μεταβλητών που ξεπερνούν την γραμμική τάξη. Οπότε περιμένουμε η χρήση των τεχνικών αποσυσχετισμού να μην έχει διαφορά στην απόδοση ή εάν έχει να είναι μικρή. Παρόλα αυτά επειδή σε ορισμένα προβλήματα ενδέχεται η δράση κάποιων τεχνικών αποσυσχέτισης ή μετασχηματισμού να βελτιώνουν έστω και λίγο την απόδοση, προχωρήσαμε στην χρήση τους.



Εικόνα 5.10 Η απόδοση της μεθόδου για διαφορετικούς αριθμούς δέντρων.

Όπως μπορούμε να δούμε στην εικόνα 5.12 δεν υπάρχει κάποια διαφορά στην απόδοση εάν χρησιμοποιήσουμε τεχνικές αποσυσχετισμού ή μετασχηματισμού, όπως υποθέσαμε εξ αρχής. Στο τέλος του δέντρου έχουμε σύνολα υπερόγκων τα οποία χαρακτηρίζονται ως σήμα ή υπόβαθρο. Η βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου rectangular cuts, που είναι πρακτικά η χρήση τιμών αποκοπών γεγονότων σε κάθε μεταβλητή, με την BDT είναι η δημιουργία πολλών υπερόγκων που περικλείουν το σήμα και το υπόβαθρο και όχι μίας όπως στην περίπτωση της μεθόδου rectangular cuts.

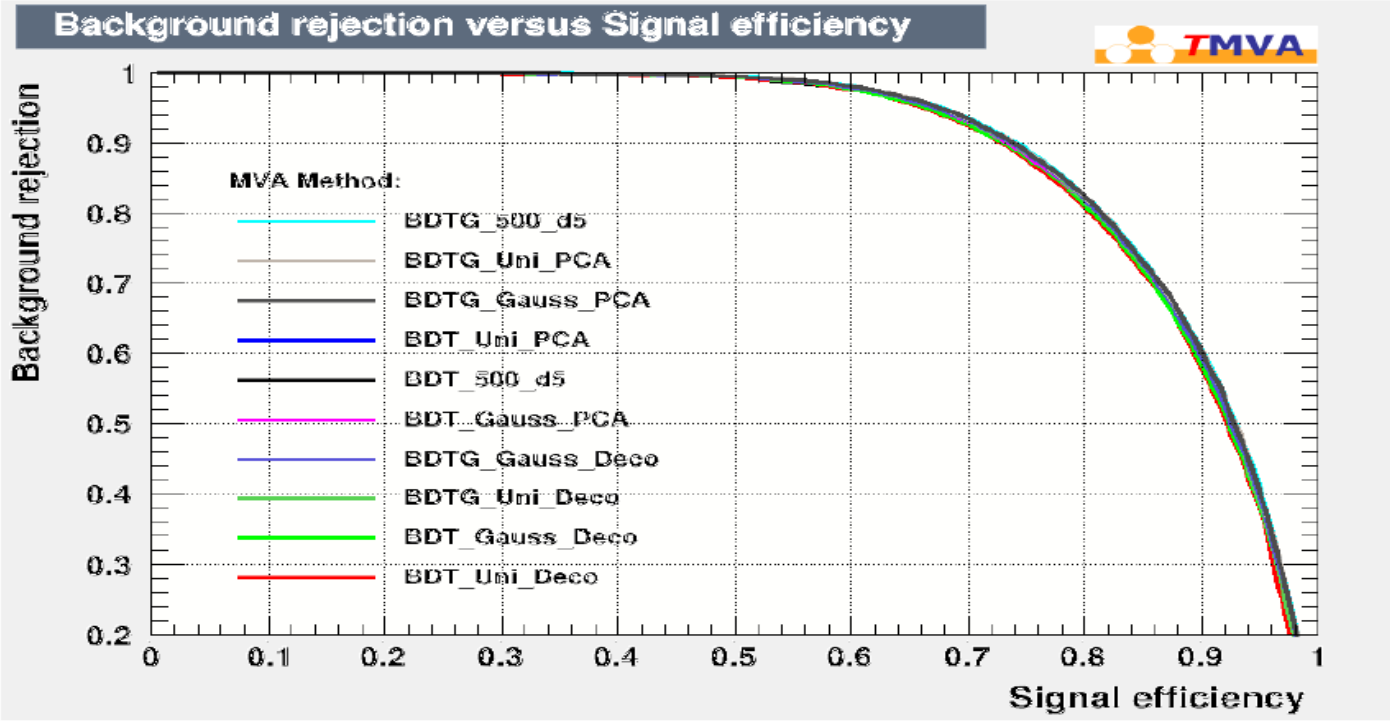


Εικόνα 5.11 Η απόδοση της μεθόδου με χρήση διαφόρων σημείων καθορισμού της τιμής αποκοπής.

5.3.2 Κατασκευή δάσους

Μία επιλογή που μπορεί να αυξήσει την απόδοση της μεθόδου είναι η επιλογή του boost. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν δύο τρόποι για να κάνει κάποιος boost:Gradient boost, και

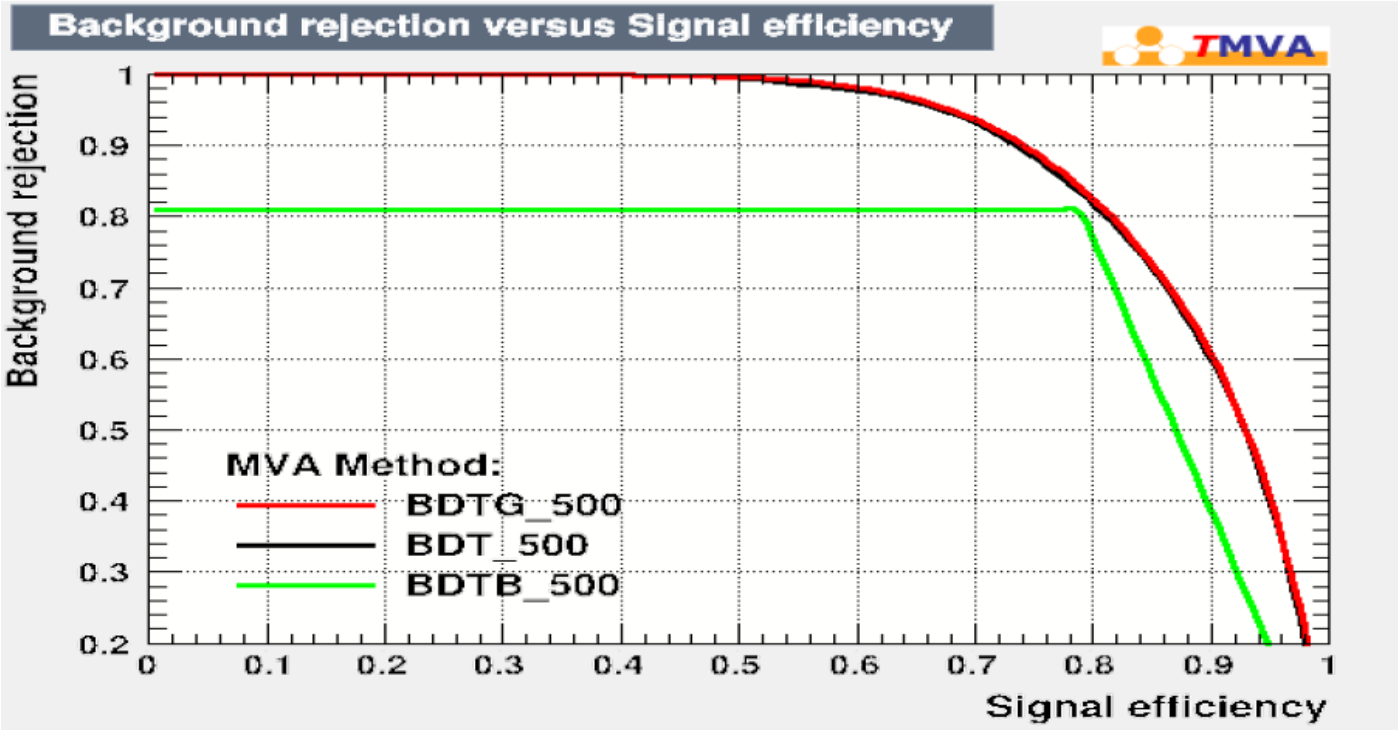
AdaBoost. Η διαφορά των δύο έγκειται στην συνάρτηση απωλειών που χρησιμοποιούν. Και οι δύο μέθοδοι έχουν πρωτίστως ως σκοπό να αυξήσουν την απόδοση των μεταβλητών που έχουν σχετικά μικρή ικανότητα διαχωρισμού μεταξύ σήματος και υποβάθρου. Η δεύτερη διεργασία που έχουν είναι η απευαισθητοποίηση της μεθόδου σε στατιστικές διακυμάνσεις.



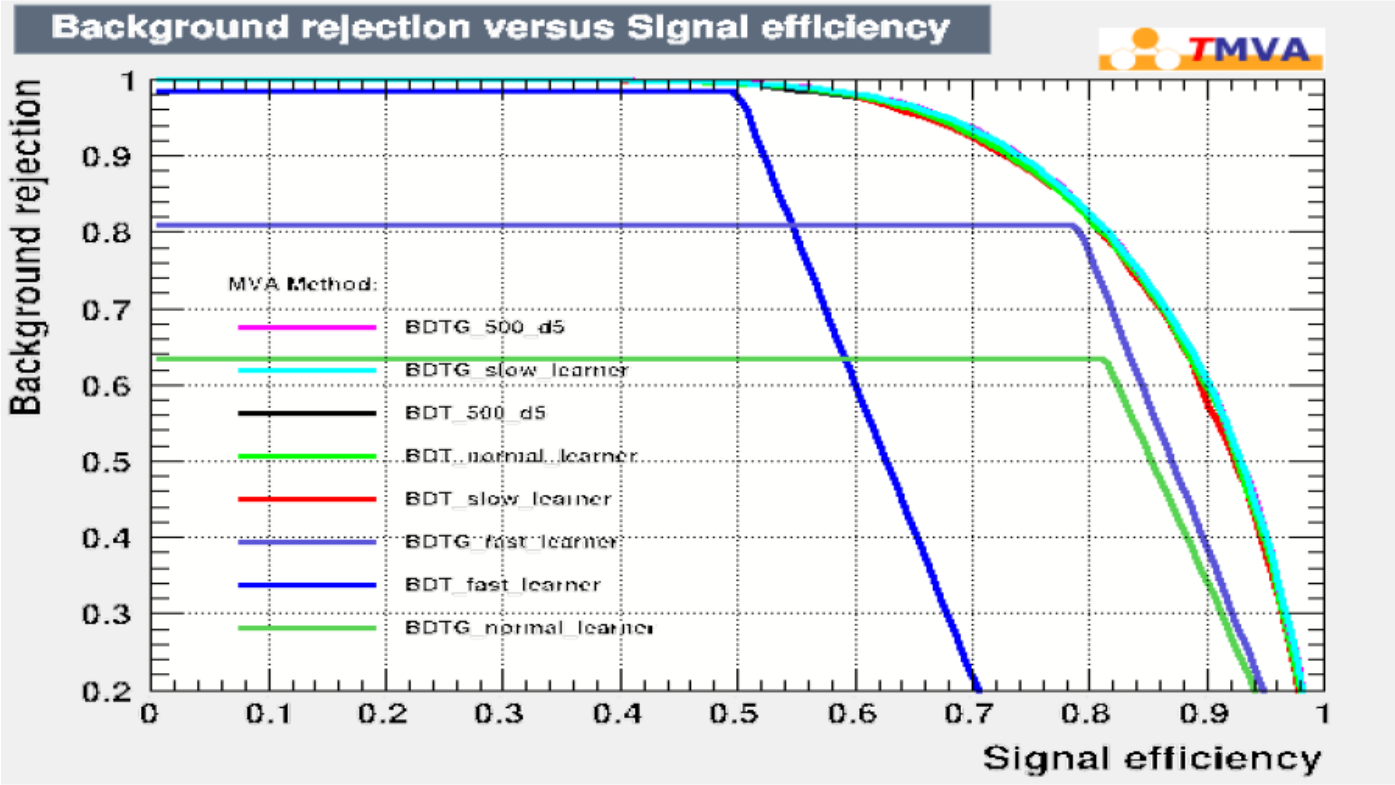
Εικόνα 5.12 Η απόδοση της μεθόδου με χρήση τεχνικών μετασχηματισμού και αποσυσχετισμού.

Η Gradient είναι πιο σταθερή και αναμένουμε να δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Στην εικόνα 5.13 βλέπουμε ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Η μέθοδος bagging δεν θεωρείται τεχνική boosting αλλά εντάσσεται για λόγους πληρότητας. Αυτό που κάνει μία τέτοια μέθοδος είναι να αναισθητοποιεί την απόκριση της μεθόδου σε στατιστικές διακυμάνσεις. Η καλύτερη επιλογή για boost είναι το Gradient boosting. Το επόμενο κομμάτι που πρέπει να καθορίσουμε είναι το πόσο γρήγορα ή αργά μαθαίνει ένα BDT από τα λάθη του. Υπάρχει επιλογή που μπορούμε να καθορίσουμε το ρυθμό μάθησης. Η επιλογή αλλάζει ανάλογα με τον τρόπο του boost. Οπότε πρέπει να το δούμε ξεχωριστά για τους δύο. Από την εικόνα 5.14 βλέπουμε ότι τα δάση που μαθαίνουν πιο αργά από τα λάθη τους έχουν καλύτερη απόδοση. Πρέπει λοιπόν να καθορίσουμε τα όρια του ρυθμού μάθησης του δάσους, ώστε να έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα. Στην εικόνα 5.15 βλέπουμε δέντρα που μαθαίνουν με αργούς ρυθμούς. Όπως παρατηρούμε τα δέντρα με πολύ μικρό ρυθμό μάθησης δεν ευνοούνται. Οπότε μπορούμε να καθορίσουμε τα όρια στα οποία πρέπει να βρίσκεται ο ρυθμός μάθησης να είναι μεταξύ 0.1 και 0.25. Μία επιλογή που έχουν τα BDT και παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η επιλογή Random. Αυτή η επιλογή μας επιτρέπει την χρήση ενός τυχαίου υποσύνολου μεταβλητών. Αντί λοιπόν το σύστημα να σαρώνει όλες τις μεταβλητές για να βρει την μεταβλητή που πρέπει να τεθεί η τιμή αποκοπής γεγονότων καθώς και να ορίσει την ίδια την τιμή, χρησιμοποιεί ένα υποσύνολο το οποίο επιλέγεται τυχαία κάθε φορά. Ο αριθμός των μεταβλητών που αποτελούν το υποσύνολο ορίζεται κάθε φορά από τον χρήστη. Μία ακόμα ενδιαφέρουσα επιλογή είναι η επιλογή bagging. Είναι ακριβώς ίδια με την μέθοδο bagging που απορρίψαμε. Με αυτήν την επιλογή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τις δύο μεθόδους για ακόμα πιο μεγάλη απόδοση. Η επιλογή bagging μας επιτρέπει την χρήση ενός τυχαίου υποσυνόλου γεγονότων για την κατασκευή του δέντρου. Κάποια από τα γεγονότα, ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν δύο φορές εάν κριθεί απαραίτητο. Η επιλογή γίνεται και πάλι τυχαία. Στην εικόνα 5.16 μπορούμε να δούμε την απόδοση αυτών των επιλογών. Δεν φαίνεται κάποια αξιοπρόσεχτη μεταβολή. Πριν προχωρήσουμε πρέπει να αναφέρουμε για ποιον λόγο δεν χρησιμοποιήσαμε καμία τεχνική κλαδέματος. Τα BDT είναι μία μέθοδος που είναι αρκετά επιρρεπής στην υπερεκπαίδευση. Μία τέτοια κατάσταση προκύπτει

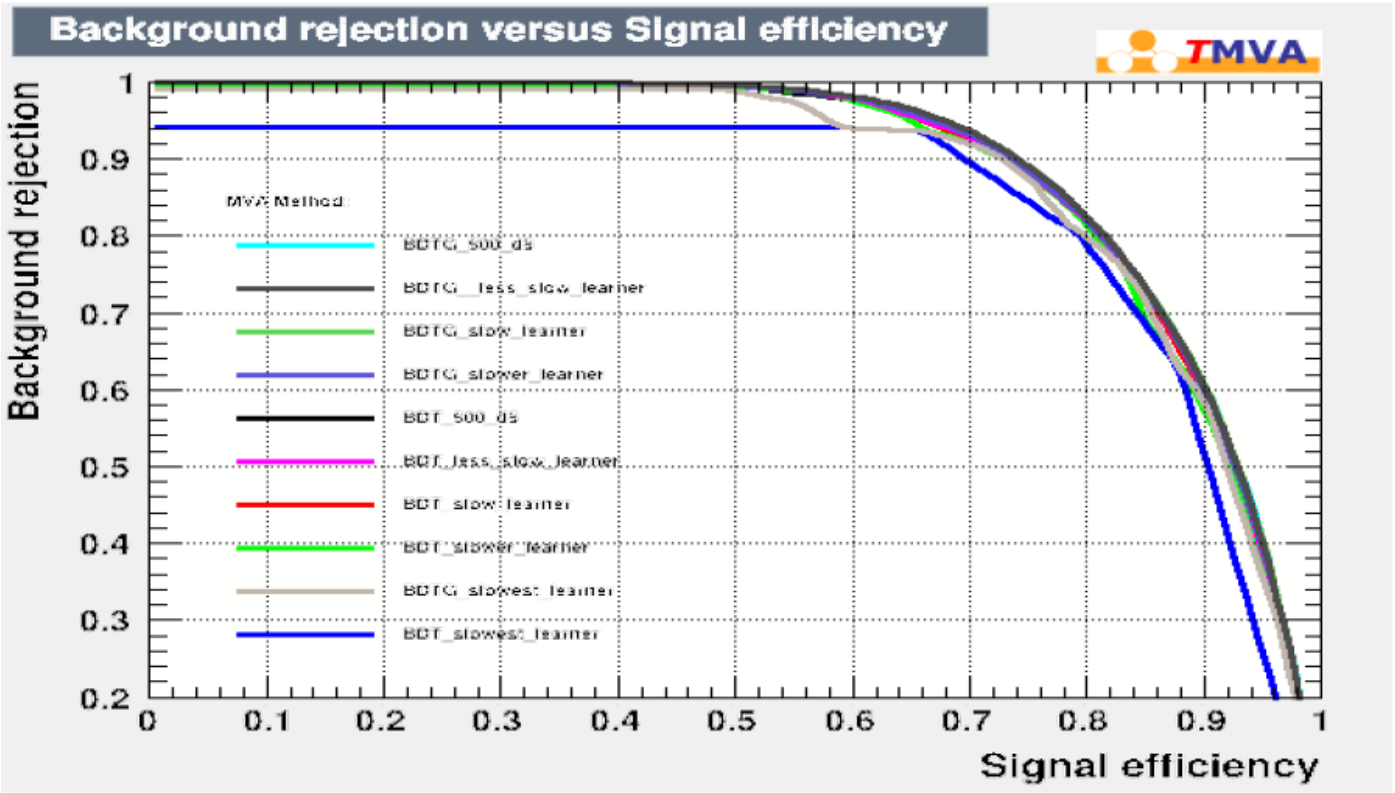
όταν όλα τα γεγονότα κάποιου υπερόγκου είναι του ίδιου είδους (μόνο σήμα ή μόνο υπόβαθρο). Σημαίνει πρακτικά ότι έχουμε διαλέξει τα όρια της υπερεπιφάνειας πολύ αυστηρά και η επιλογή μας έχει ειδικευτεί αποκλειστικά στο σήμα στο οποίο εκπαιδεύτηκε. Οπότε για να μπορούμε να συνεχίσουμε την ανάλυσή μας πρέπει να αφαιρέσουμε αυτούς τους κλάδους. Η αφαίρεση των κλάδων είναι μία διαδικασία που ονομάζεται κλάδεμα. Όταν χρησιμοποιούμε decision trees προτείνεται να αφήνουμε το δέντρο να εξελιχθεί όσο θέλει και μετά να κλαδεύουμε τους άχρηστους όρους. Ωστόσο επειδή εμείς χρησιμοποιούμε μία διαδικασία boosting δεν είναι ανάγκη κάτι τέτοιο. Μπορούμε να αφήνουμε τα δέντρα να εξελίσσονται σε έναν πολύ μικρό βαθμό. Αυτό βασίζεται στο γεγονός της υπάρξεως πολλών δέντρων που συνεισφέρουν στην απόφαση μας για το εάν ένα γεγονός είναι σήμα ή όχι. Κάτι τέτοιο έχει μεγαλύτερη απόδοση και θεωρείται αποτελεσματικότερος τρόπος αντιμετώπισης της υπερεκπαίδευσης αφού δεν την αφήνει καν να αναπτυχθεί. Αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιήσαμε και εμείς σε όλα τα διαγράμματα, οπότε δεν τίθεται λόγος για κλάδεμα. Στην εικόνα 5.17 έχουμε εκπαιδεύσει την μέθοδό μας χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό ποσοστό των γεγονότων εκπαίδευσης. Τα καλύτερα αποτελέσματα μας τα παρέχει η εκπαίδευση με τα 7000 γεγονότα. Τέλος, πρέπει να καθορίσουμε, εάν χρησιμοποιώντας ένα υποσύνολο των μεταβλητών η μέθοδος αποδίδει καλύτερα από ότι με την χρήση του συνόλου. Στην εικόνα 5.18 βλέπουμε πως η μέθοδος όταν εκπαιδευτεί με την χρήση των οκτώ χρησιμότερων μεταβλητών, αποδίδει καλύτερα από ότι με όλες μαζί . Η απόρριψη των μεταβλητών έγινε με την χρήση της κατάταξης των μεταβλητών όπως δίνονται από το TMVA. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα κατάταξης αρχίσαμε αφαιρώντας τις μεταβλητές που είναι λιγότερο χρήσιμες πρώτα. Στο τέλος φτιάξαμε το διάγραμμα που περιγράφει την απόδοση των BDT για κάθε μία από τις υπό-ομάδες των μεταβλητών. Στον πίνακα 5.1 βλέπουμε της επιλογές που χρησιμοποιήσαμε συγκεντρωμένες και στον πίνακα 5.2 τις μεταβλητές με την χρησιμότητα τους.



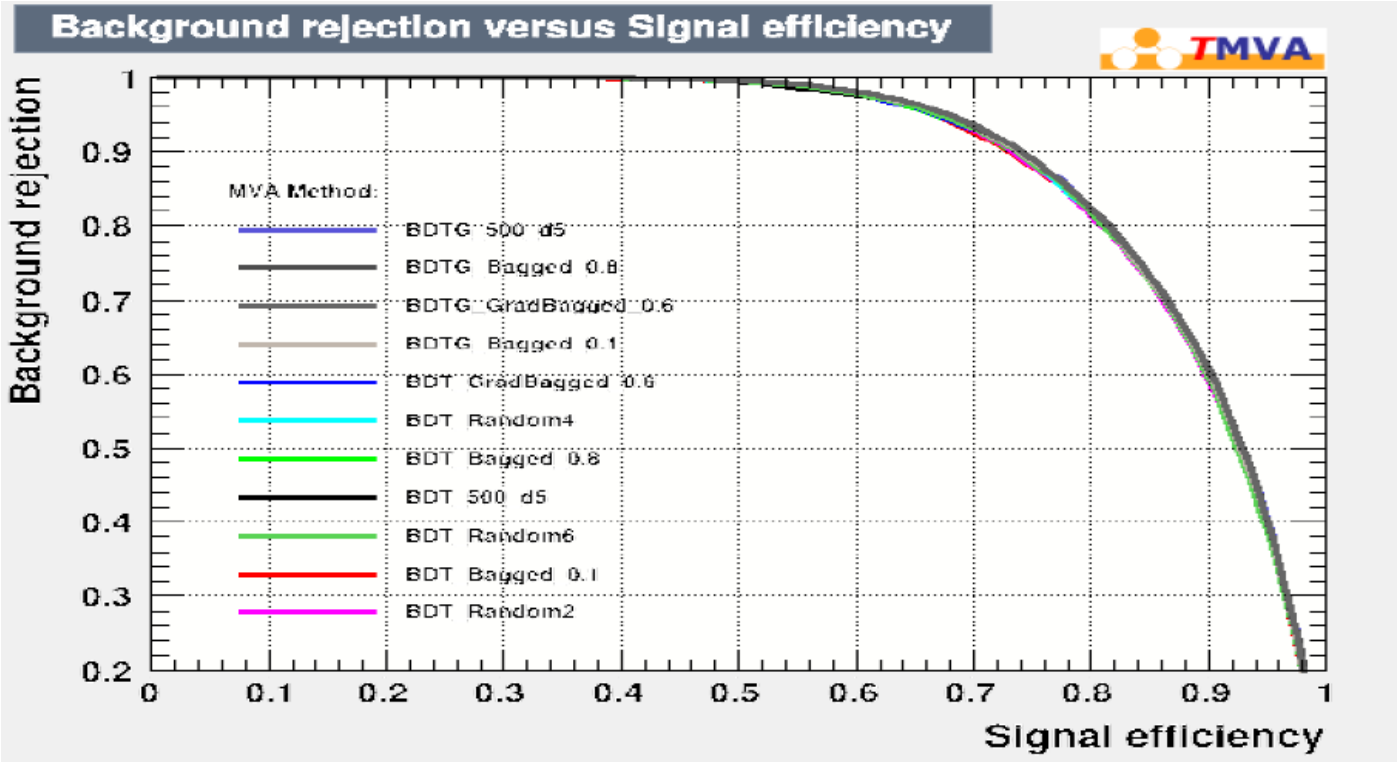
Εικόνα 5.13 Η απόδοση της μεθόδου για διαφορετικές τεχνικές boosting.



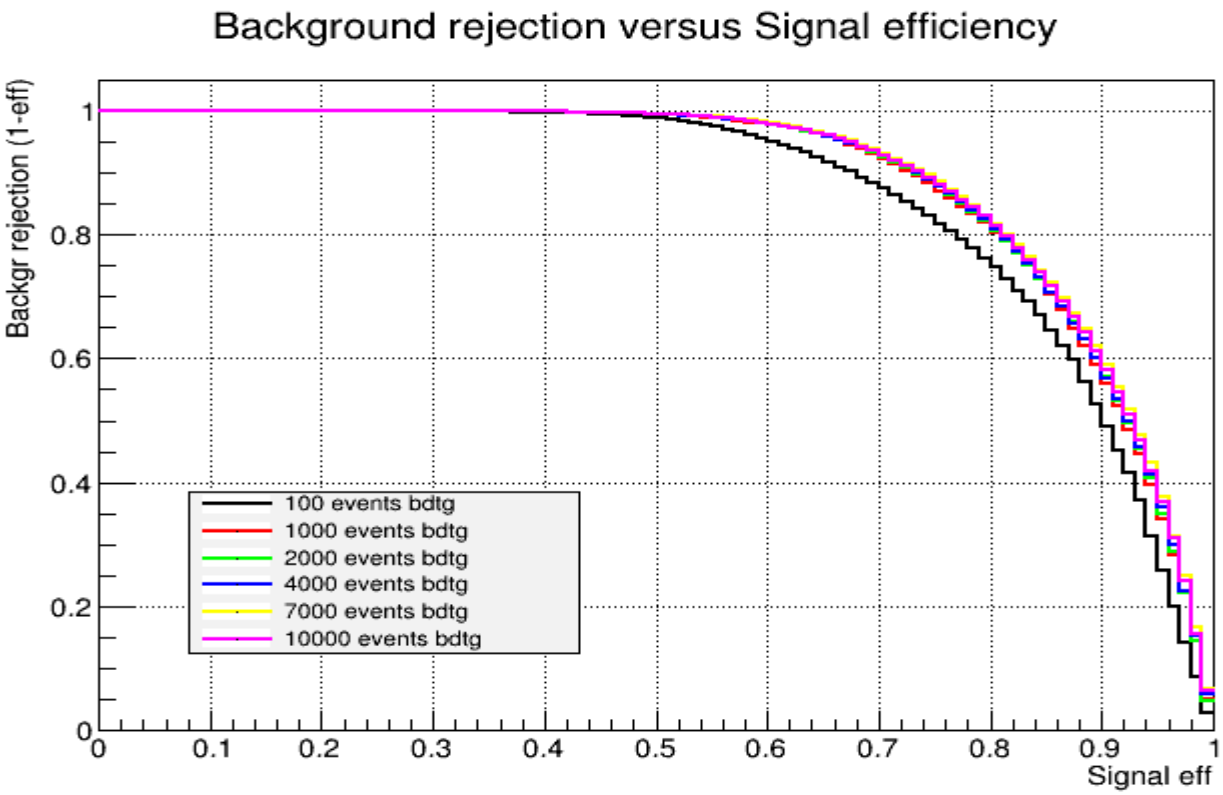
Εικόνα 5.14 Η απόδοση της μεθόδου για διαφορετικό ρυθμό μάθησης.



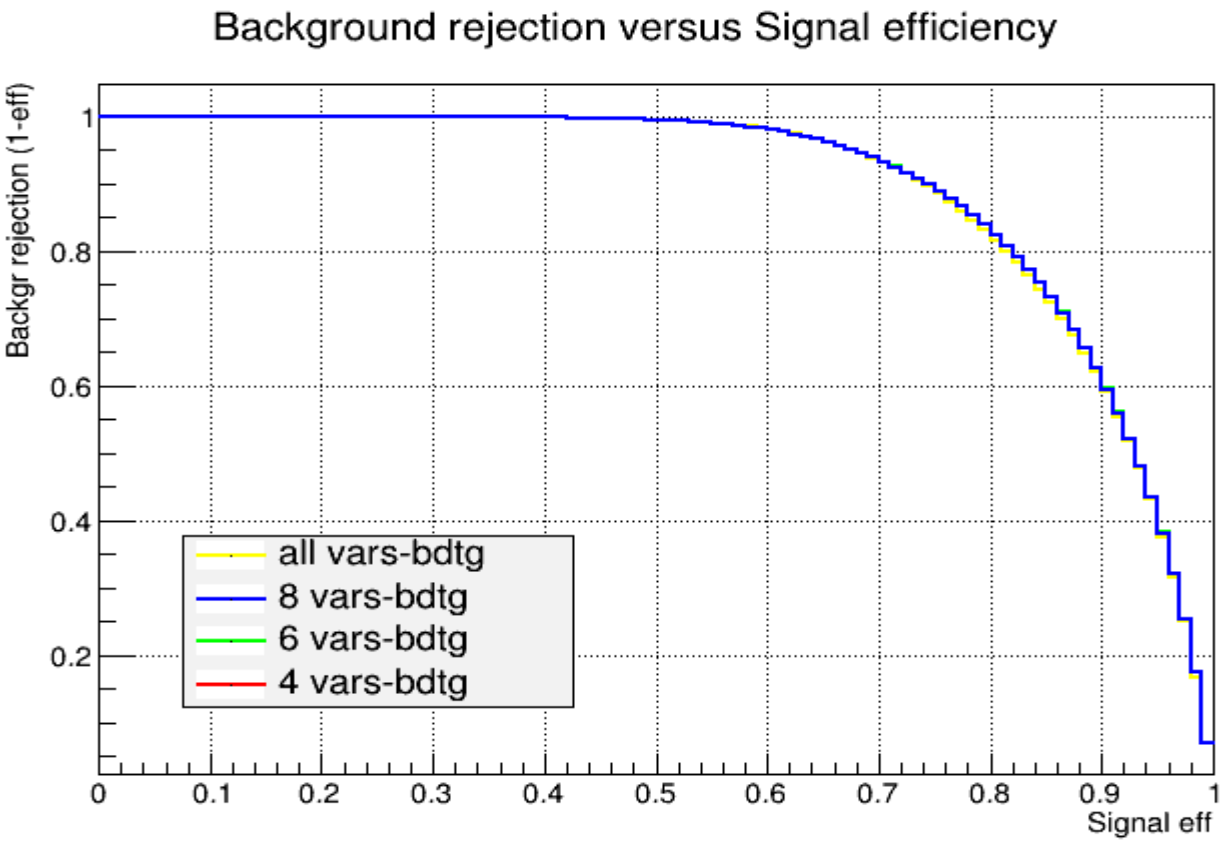
Εικόνα 5.15 Η απόδοση της μεθόδου για μικρούς ρυθμούς μάθησης.



Εικόνα 5.16 Η απόδοση της μεθόδου για τις επιλογές Random και bagging.



Εικόνα 5.17 Η χρήση διαφορετικών ποσοστών γεγονότων για εκπαίδευση και η επίδραση τους στην απόδοση.



Εικόνα 5.18 Η επίδραση στην απόδοση της μεθόδου από την χρήση ενός υποσυνόλου μεταβλητών.

5.4 Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε την εκπαίδευση δύο μεθόδων της Likelihood και της BDT. Και οι δύο κατάφεραν να διαχωρίσουν το σήμα από το υπόβαθρο. Οι επιλογές των παραμέτρων που επέφεραν τα βέλτιστα αποτελέσματα ήταν διαφορετικές για κάθε μέθοδο.

Συγκεκριμένα στην μέθοδο Likelihood σημαντική διαφορά στην απόδοση επέφερε η χρήση της τεχνικής αποτετραγωνισμού PCA, εξαιτίας του μειονεκτήματος της μεθόδου να λάβει υπόψη της τους συσχετισμούς. Καμία τεχνική μετασχηματισμού δεν είχε αποτέλεσμα. Επίσης καμία τεχνική boost δεν βελτίωσε την απόδοση. Είδαμε πως λίγο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε εάν συμπεριλάβουμε 25 γεγονότα ανά bin, καθώς και ότι η χρήση των splines δίνει υψηλότερη απόδοση από την επιλογή KDE, χωρίς όμως προτίμηση σε κάποια τάξη. Συνίσταται η χρήση όλων των μεταβλητών κατά την εκπαίδευση και παρατηρήθηκε μικρή διαφορά στην απόδοση με την μείωση των γεγονότων εκπαίδευσης (1000 γεγονότα είχαν μέγιστη απόδοση).

Στην μέθοδο των decision trees είδαμε ότι οι τεχνικές μετασχηματισμού και αποσυσχέτισης δεν είχαν καμία επίδραση. Αντίθετα οι τεχνικές boost αύξησαν κατά πολύ την απόδοση. Σημαντικότερη ήταν η αύξηση με την χρήση του Gradient boost. Επίσης παρατηρήσαμε ότι η αλόγιστη αύξηση του αριθμού των δέντρων δεν αυξάνει απεριόριστα την απόδοση. Ο μέγιστος αριθμός δέντρων που αύξησε λίγο την απόδοση ήταν 500. Τα δέντρα παρήχθησαν και αναπτύχθηκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να αποφεύχθηκε η υπερεκπαίδευσή τους και δεν χρειάζονται κλάδεμα. Παρατηρήσαμε ότι μία αλλαγή στον αριθμό των σημείων που η μέθοδος χρησιμοποιεί για να ορίσει την βέλτιστη τιμή αποκοπής γεγονότων, επηρεάζει την απόδοση. Και πάλι όμως η αύξησή τους πέραν κάποιας τιμής δεν οδηγεί σε περεταίρω αύξηση της απόδοσης. Η τιμή που χρησιμοποιήσαμε ήταν 20 σημεία. Επίσης οι επιλογές Random και bagging δεν επέφεραν κάποια αξιοπρόσεκτη μεταβολή στην απόδοση. Παρατηρήθηκε ότι τα δέντρα με μικρό ρυθμό μάθησης αποδίδουν καλύτερα. Παρόλα αυτά πολύ μικρός ρυθμός οδηγεί σε απώλεια της απόδοσης. Τα όρια ορίστηκαν από 0.1

έως 0.25. Για την εκπαίδευση αυτής της μεθόδου συνίσταται η χρήση του μισού αριθμού των γεγονότων για εκπαίδευση και η χρήση ενός υποσυνόλου των μεταβλητών. Το υποσύνολο των μεταβλητών απαρτίζουν οι: noc και η παραλλαγή της, η seed και η παραλλαγή της, η relpt, η meanring, η sumrad και η παραλλαγή της.

Επιλογές	Βέλτιστη τιμή	περιγραφή
Αριθμός δέντρων	500	Καθορίζει τον αριθμό των δέντρων στο δάσος
Τύπος Boosting	Gradient	Καθορίζει τον τρόπο που κάνουμε Boosting
Αποσυσχέτιση	Δεν είχε κάποια διαφορά- δεν χρησιμοποιήθηκε	Αποσυσχετίζει τις μεταβλητές
Μετατροπή της κατανομής	Δεν είχε κάποια διαφορά- δεν χρησιμοποιήθηκε	Μετατρέπει την κατανομή των μεταβλητών σε ομοιόμορφη ή κανονική
Αριθμός cuts	20	Ορίζει των αριθμό των cuts που χρησιμοποιούνται για να βρεθεί ο βέλτιστος
Κλάδεμα	Δεν χρειάστηκε-δέντρα με μικρό βάθος	Ορίζει τον τρόπο που αφαιρούνται τα ανούσια κλαδιά
Ρυθμός μάθησης	0.1-0.25	Ορίζει την ταχύτητα με την οποία μαθαίνει ένα δέντρο
Bagging	Δεν είχε κάποια διαφορά- δεν χρησιμοποιήθηκε	Χρησιμοποιεί ένα τυχαίο δείγμα των γεγονότων εκπαίδευσης
Random	Δεν είχε κάποια διαφορά- δεν χρησιμοποιήθηκε	Χρησιμοποιεί ένα τυχαίο υποσύνολο των μεταβλητών

Πίνακας 5.1 Οι επιλογές εκπαίδευσης των BDTs.

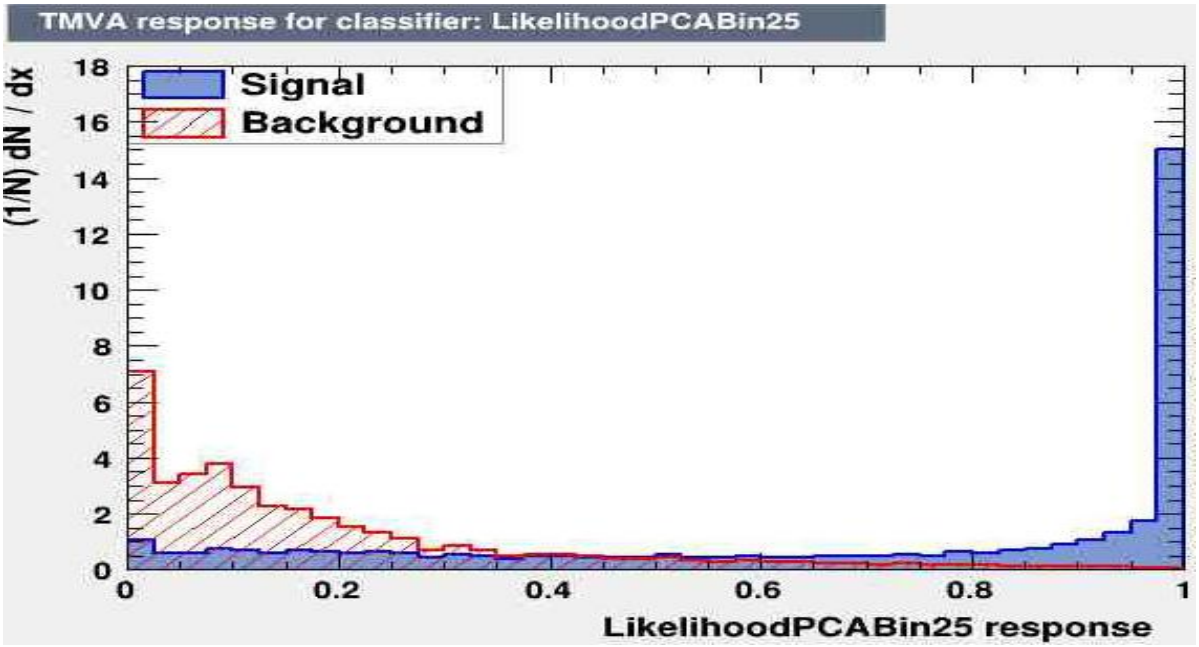
Μεταβλητή	Χρησιμότητα	8 καλύτερες
noc	$2.04\ 10^{-1}$	✓
relnoc	$1.51\ 10^{-1}$	✓
relseed	$1.15\ 10^{-1}$	✓
meanring	$1.06\ 10^{-1}$	✓
relsumptrad	$9.73\ 10^{-2}$	✓
sumrad	$9.22\ 10^{-2}$	✓
seed	$9.02\ 10^{-2}$	✓
relpt	$9.00\ 10^{-2}$	✓
sumptrad	$5.47\ 10^{-2}$	

Πίνακας 5.2 Η χρησιμότητα των μεταβλητών όπως δίνεται από το TMVA.

6. Αποτελέσματα

6.1 Likelihood

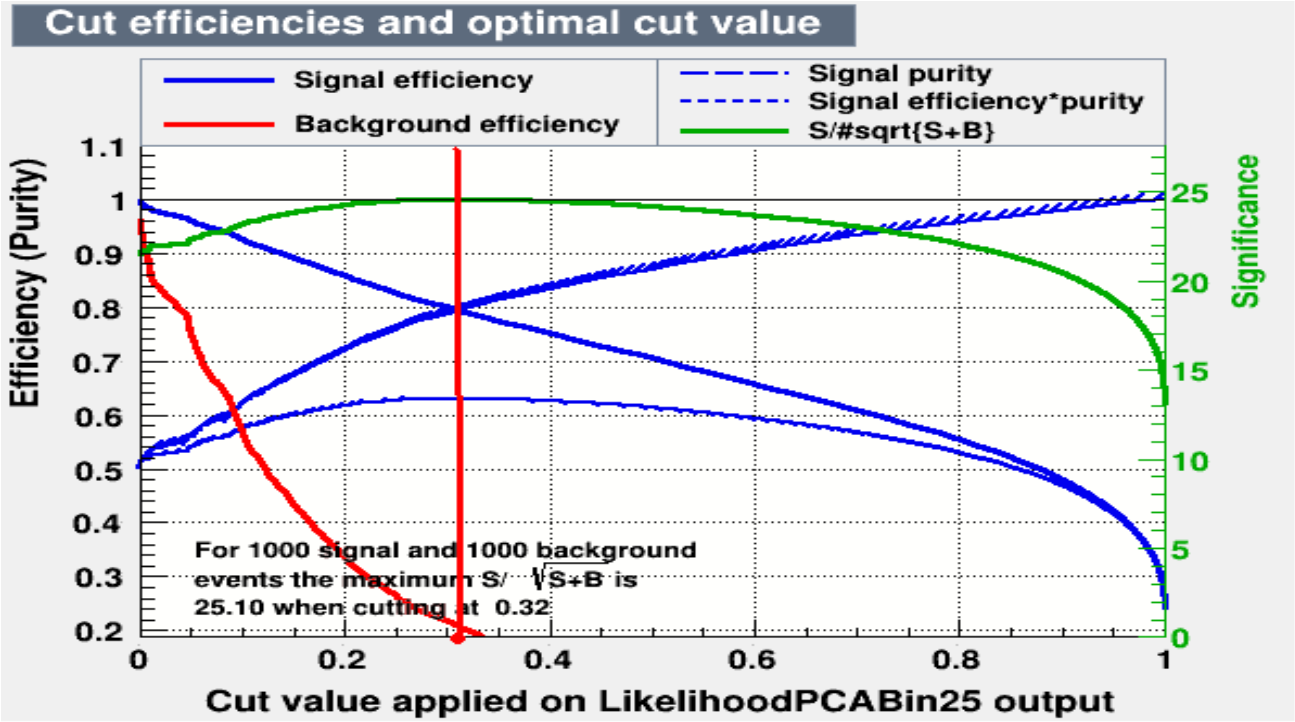
Έχοντας βρει την ιδανική τιμή για κάθε μία παράμετρο και για κάθε προσφερόμενη επιλογή της εκπαίδευσης της μεθόδου Likelihood, προχωρούμε στη εκπαίδευσή της και στην εύρεση του σημείου βέλτιστης αποκοπής γεγονότων σε αυτήν την μέθοδο. Στην εικόνα 6.1 παραθέτουμε την συνάρτηση ταξινόμησης για το σήμα και το υπόβαθρο.



Εικόνα 6.1 Το ιστόγραμμα της συνάρτησης ταξινόμησης για την μέθοδο Likelihood.

Η συνάρτηση ταξινόμησης σε αυτήν την μέθοδο, εκφράζει την πιθανότητα ένα γεγονός να είναι σήμα ή υπόβαθρο. Παίρνει τιμές από το ένα μέχρι το μηδέν. Όσο πιο κοντά στην μονάδα είναι η τιμή της τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να είναι σήμα. Αντίθετα όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι τόσο μικραίνει. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα 6.1 ένα ποσοστό του σήματος βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πίδακες που ανήκουν στο σήμα τους οποίους η μέθοδος δεν μπορεί να διαχωρίσει. Οπότε οποιαδήποτε τιμή της συνάρτησης ταξινόμησης και να θέσουμε ως αποκοπή γεγονότων, ξέρουμε πως ένα κομμάτι του σήματος πρόκειται να χαθεί.

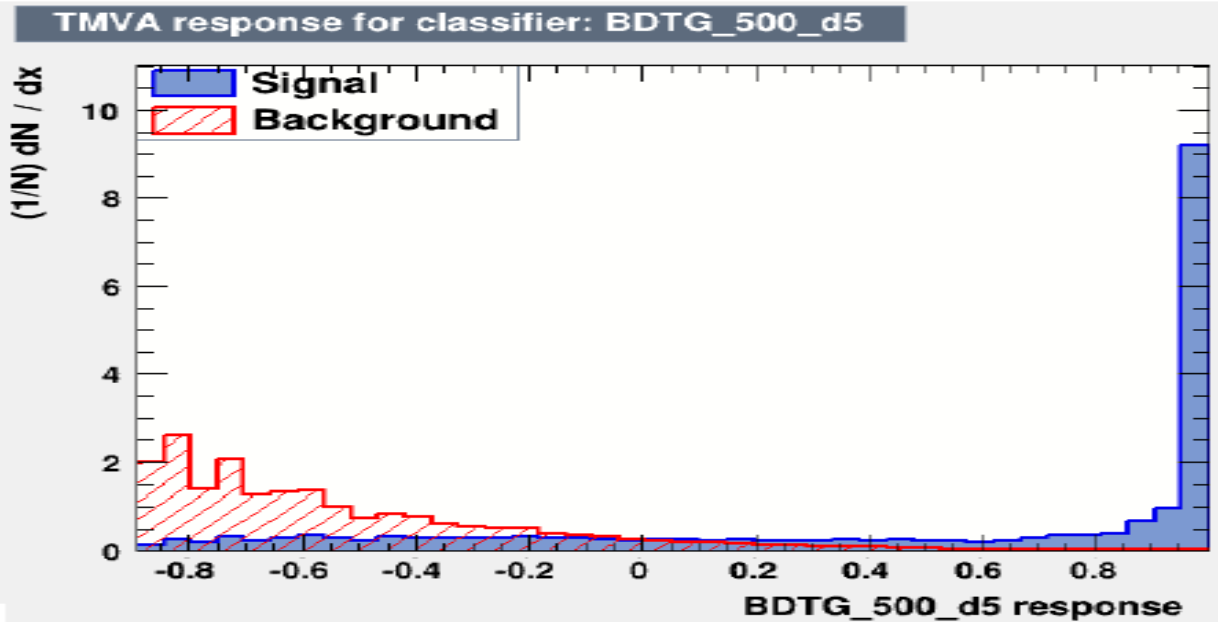
Στην εικόνα 6.2 βλέπουμε ένα σύνολο καμπυλών καθώς και την βέλτιστη τιμή που πρέπει να θέσουμε την αποκοπή γεγονότων. Η μπλε καμπύλη είναι η αποδοτικότητα του σήματος. Αυτή μας δείχνει το ποσοστό του σήματος που παίρνουμε αν θέσουμε την αποκοπή γεγονότων σε κάποια τιμή. Για παράδειγμα εάν θέσουμε την τιμή αποκοπής γεγονότων ίση με 0.7 τότε το 60% των γεγονότων του σήματος περνούν την στάθμη. Η κόκκινη καμπύλη είναι η αποδοτικότητα του υπόβαθρου, και εκφράζει το ποσοστό των γεγονότων υπόβαθρου που αναμένουμε σε κάθε τιμή, για κάθε τιμή της συνάρτησης ταξινόμησης. Η διακεκομμένη μπλε γραμμή εκφράζει την αγνότητα των γεγονότων σε σήμα. Δηλαδή το ποσοστό του σήματος σε ένα δείγμα που περιέχει σήμα και υπόβαθρο, για κάθε τιμή της συνάρτησης ταξινόμησης. Με πράσινη γραμμή έχουμε συμβολίσει την σημαντικότητα που ορίζεται ως η διαφορά των ταξινομητών σήματος και υποβάθρου προς την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους. Ως σημείο βέλτιστης αποκοπής γεγονότων τίθεται το σημείο της μέγιστης σημαντικότητας, δηλαδή 0.32.



Εικόνα 6.2 Οι αποδοτικότητες των τιμών αποκοπών γεγονότων για την μέθοδο Likelihood.

6.2 BDT

Στην μέθοδο BDT το ιστόγραμμα της συνάρτησης ταξινόμησης φαίνεται στην εικόνα 6.3.

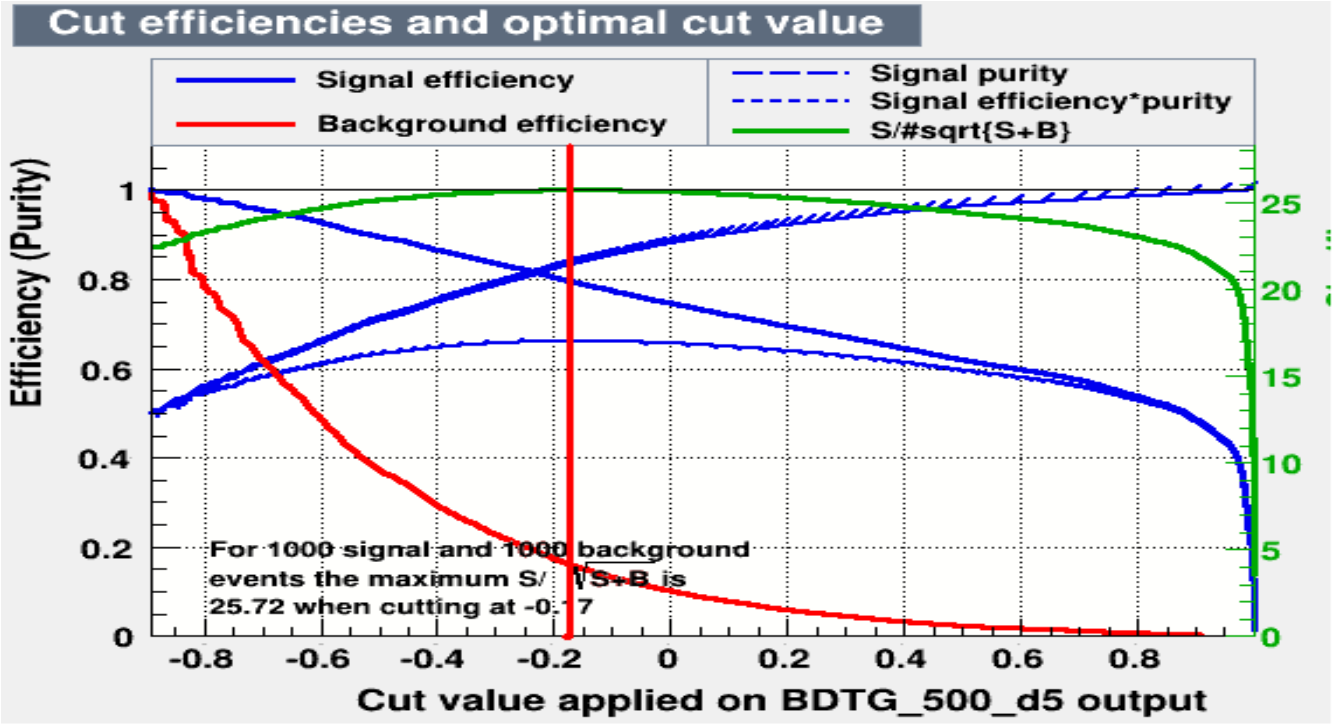


Εικόνα 6.3 Το ιστόγραμμα της συνάρτησης ταξινόμησης για την μέθοδο BDT.

Στην εικόνα 6.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα ότι οι τιμές της συνάρτησης ταξινόμησης δεν είναι ίδιες όπως στην μέθοδο Likelihood, αλλά αυτήν την φορά κυμαίνονται από -1 έως 1. Το εύρος της συνάρτησης ταξινόμησης εξαρτάται κάθε φορά από την μέθοδο που χρησιμοποιούμε. Στην προκειμένη περίπτωση δεν εκφράζει πιθανότητα αλλά ένα μέγεθος ανάλογο της πιθανότητας. Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι και αυτήν την φορά ένα μέρος των πιδάκων που αποτελούν το σήμα βρίσκεται στη

περιοχή του υπόβαθρου. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα γεγονότα πρόκειται να χαθούν όποια τιμή της συνάρτησης ταξινόμησης και αν χρησιμοποιήσουμε. Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι αυτή την φορά ένα μικρό μέρος των γεγονότων υπόβαθρου έχει περάσει στην περιοχή σήματος. Κάτι τέτοιο δεν μας ενοχλεί, γιατί πρόκειται για έναν απειροελάχιστο αριθμό γεγονότων. Επιπλέον εάν περάσουν κάποια γεγονότα υπόβαθρου κατά πάσα πιθανότητα κόβονται στα επόμενα στάδια του σκανδαλιστή. Αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως σε αυτό το στάδιο είναι να κόψουμε όσο περισσότερο υπόβαθρο με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες γεγονότων σήματος.

Στην εικόνα 6.4 μπορούμε να δούμε διάφορα διαγράμματα των αποδοτικοτήτων για τις διάφορες τιμές αποκοπών γεγονότων. Αξίζει να σημειώσουμε ότι αποτέλεσμα των γεγονότων υποβάθρου στην περιοχή του σήματος είναι η ήπια πτώση της αποδοτικότητάς τους. Το σημείο της βέλτιστης αποκοπής γεγονότων είναι η τιμή -0.17. Οι καμπύλες σε αυτά τα διαγράμματα είναι κανονικοποιημένες. Επίσης μπορούμε να δούμε ποσοτικά ότι η διαρροή γεγονότων υποβάθρου στο σήμα δεν επηρεάζει την αγνότητα, που είναι το μέγεθος που μας δείχνει την αναλογία σήματος υποβάθρου για δεδομένη τιμή στην συνάρτηση ταξινόμησης.



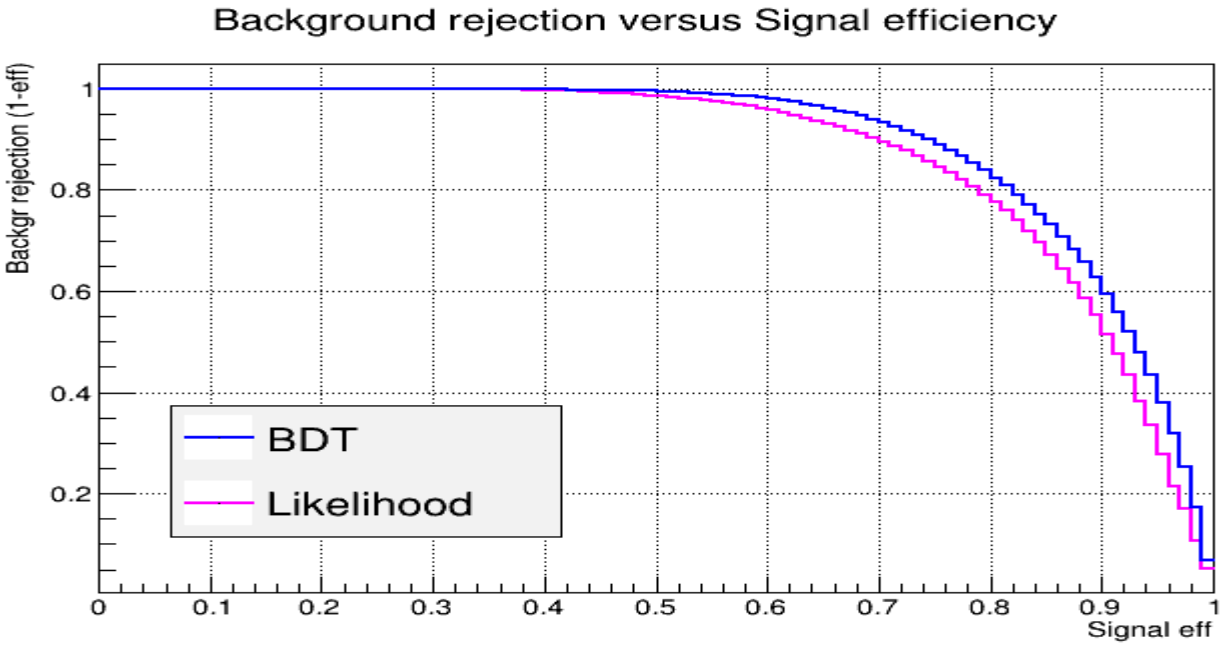
Εικόνα 6.4 Οι αποδοτικότητες των τιμών αποκοπών γεγονότων για την μέθοδο BDT.

6.4 Σύγκριση των μεθόδων Likelihood και BDT

Συγκρίνοντας τις εικόνες 6.1 και 6.3 μπορούμε να εντοπίσουμε τις διαφορές τους. Πέρα από το εύρος των τιμών των συναρτήσεων ταξινόμησης, παρατηρούμε ότι στην εικόνα 6.3 στην περιοχή του σήματος υπάρχουν μερικά γεγονότα υποβάθρου που δεν υπάρχουν στην 6.1. Τα γεγονότα αυτά φαίνονται απειροελάχιστα και δεν περιμένουμε να αποτελέσουν αιτία μείωσης της απόδοσης της μεθόδου BDT. Μία άλλη διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός, ότι στην μέθοδο BDT παρατηρούμε ένα μικρότερο αριθμό γεγονότων σήματος στην περιοχή υποβάθρου. Αυτό σημαίνει ότι τα γεγονότα που σήματος που χάνουμε είναι λιγότερα. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει την απόδοση διότι δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην διατήρηση του μέγιστου αριθμού γεγονότων σήματος.

Συγκρίνοντας τις εικόνες 6.2 και 6.4 βλέπουμε πως η αποδοτικότητα του σήματος στην περίπτωση των BDT είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη Likelihood. Αυτό οφείλεται στην διατήρηση μεγαλυτέρου αριθμού γεγονότων σήματος. Μπορούμε επίσης να δούμε την διαφορά στην αποδοτικότητα του υποβάθρου. Η αποδοτικότητα του υποβάθρου των BDT φαίνεται να ακολουθεί διαφορετικό νόμο. Η αποδοτικότητα

στην περίπτωση των BDT παρόλο που εκτείνεται για μεγαλύτερο διάστημα τιμών μειώνεται πιο γρήγορα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η μέθοδος BDT αποδίδει καλύτερα και καταφέρνει να διαχωρίσει τους πίδακες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για να το επιβεβαιώσουμε παραθέτουμε την καμπύλη ROC (Εικόνα 6.5).

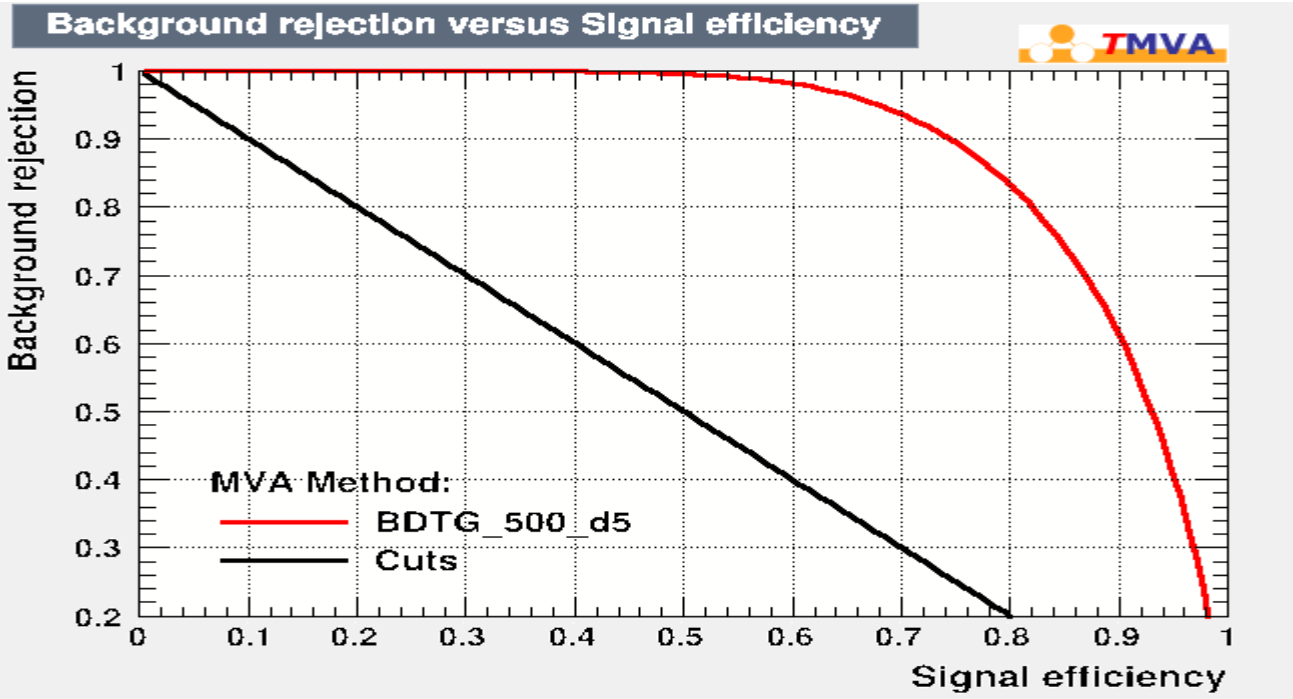


Εικόνα 6.5 Η σύγκριση των αποδόσεων των δύο μεθόδων.

Μπορούμε να δούμε ότι η μέθοδος BDT έχει εμφανώς και αισθητά μεγαλύτερη απόδοση από την μέθοδο Likelihood, όπως είχαμε υποθέσει και πιο πάνω.

6.5 Σύγκριση με την απλή εφαρμογή τιμών αποκοπών γεγονότων

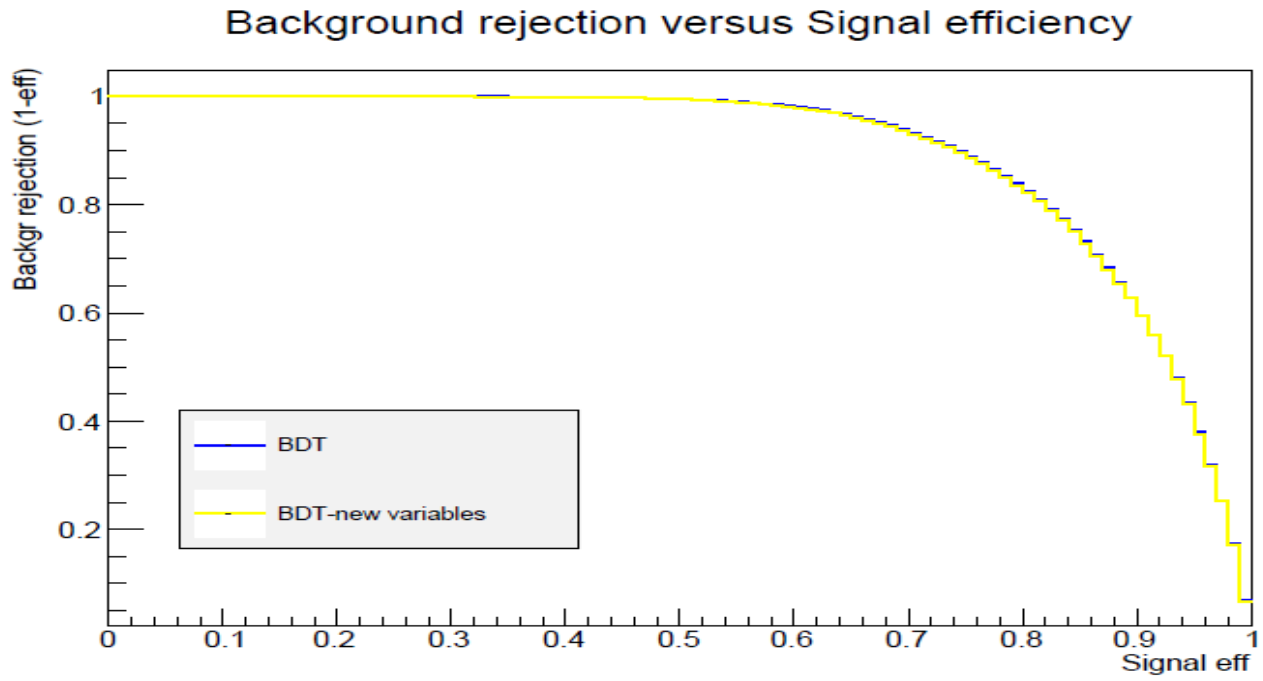
Έχοντας εκπαιδεύσει τις μεθόδους και έχοντας βρει την καλύτερη, το επόμενο βήμα είναι να συγκρίνουμε την απόδοσή της, με την απόδοση της έως τώρα χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Μέχρι τώρα στον σκανδαλιστή χρησιμοποιούσαμε αποκοπές γεγονότων σε διάφορες μεταβλητές για να διαχωρίσουμε σήμα και υπόβαθρο. Γενικά η χρήση αποκοπών γεγονότων είναι διαδεδομένη στην φυσική υψηλών ενεργειών, ενώ δεν είναι πολύ αποδοτική. Για αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται οι MVA μέθοδοι. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση της είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν για τα BDTs όπως περιγράφονται στον πίνακα 5.2. Στην εικόνα 6.6 βλέπουμε την σύγκριση μεταξύ της αποδόσεως της μεθόδου αποκοπής γεγονότων και της BDT. Όπως είναι εμφανές η απόδοση των αποκοπών γεγονότων είναι πολύ μικρότερη, οπότε δεν υπάρχει κάποιος λόγος προτίμησής της. Από την στιγμή που ο σκανδαλιστής αναμένεται να αποκτήσει καινούργιες ηλεκτρονικές κάρτες που επιτρέπουν την χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων, η επιλογή των MVA μεθόδων είναι μονόδρομος. Η επικρατέστερη είναι τα BDT.



Εικόνα 6.6 Η σύγκριση της απόδοσης του BDT με την αποκοπή γεγονότων.

6.6 Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το σημείο της εργασίας χρησιμοποιούμε την δεύτερη ομάδα μεταβλητών όπως τις ορίσαμε στο κεφάλαιο 3 και εκπαιδεύουμε την μέθοδο BDT χρησιμοποιώντας της επιλογές που καθορίσαμε στο κεφάλαιο 5. Ο λόγος που το κάνουμε αυτό είναι για να επιβεβαιώσουμε ότι οι μεταβλητές στις οποίες βασίστηκε η ανάλυση, χρησιμοποιούν όλες τις πληροφορίες που μπορεί να δώσει ο ανιχνευτής. Επομένως και μια διαφορετική ομάδα μεταβλητών δεν θα έχει διαφορετικά αποτελέσματα. Στην εικόνα 6.7 μπορούμε να δούμε την καμπύλη ROC για της δύο ομάδες. Όπως βλέπουμε δεν υπάρχει διαφορά, άρα δεν υπάρχει κάποια επιπλέον πληροφορία που δεν χρησιμοποιήθηκε. Επόμενος οι δυο ομάδες μεταβλητών είναι απόλυτα συσχετισμένες και άρα μεταφέρουν την ίδια «πληροφορία».



Εικόνα 6.7 Σύγκριση απόδοσης με την χρήση δύο ομάδων μεταβλητών.

6.7 Συμπεράσματα

Το LHC μετά την LS1 έχει αναβαθμιστεί, προσφέροντας μεγαλύτερη ενέργεια (13TeV) και υψηλότερη φωτεινότητα. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε αύξηση των γεγονότων pile-up, που είναι αδιάφορα για εμάς. Τα πολλά γεγονότα pile-up, επηρεάζουν άμεσα τον L1, αυξάνοντος τον ρυθμό σκανδαλισμού. Επηρεάζουν με δύο τρόπους: αυξάνοντας την ενέργεια των πιδάκων, με αποτέλεσμα να αποθηκεύουμε πίδακες που κανονικά θα αγνοούσαμε στην θέση πιο ενδιαφερόντων πιδάκων και παίρνοντας την θέση των ίδιων των πιδάκων.

Τα ηλεκτρονικά έχουν σταθερό ρυθμό αποθήκευσης (100Hz) και δεν μπορούμε να τον ξεπεράσουμε, οπότε πρέπει να αυξήσουμε τα όρια σκανδαλισμού. Αυτό όμως οδηγεί σε απώλεια Φυσικής, ιδιαίτερα σε γεγονότα με πολλούς αλλά μικρής ενέργειας πίδακες. Για να το αποφευχθεί αυτό, το CMS χρησιμοποίησε τον χρόνο της LS1 για να βελτιώσει τον σκανδαλιστή. Οι αλλαγές στον καλοριμετρικό L1 συμπεριελάμβαναν μοντέρνες κάρτες FPGAs με μεγάλες μνήμες και νέα αρχιτεκτονική λειτουργίας. Αυτές οι αλλαγές επιτρέπουν την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων αλγορίθμων με καλύτερη εύρεση θέσης και ενέργειας αλλά και με την δυνατότητα αφαίρεσης του υποβάθρου. Η αφαίρεση του ποσοστού της ενέργειας που αντιστοιχεί στο υπόβαθρο γίνεται με χρήση του αλγορίθμου DONUT.

Για να διαχωρίσουμε τα ενδιαφέροντα γεγονότα από τα αυτά που προέρχονται από pile-up χρησιμοποιούμε την μέθοδο των BDT. Ο λόγος που διαλέξαμε τα BDTs είναι επειδή έχει καλά αποτελέσματα, είναι γρήγορη ανθεκτική, και δύσκολα μπορεί να εκπαιδευτεί λάθος. Τα BDT ανήκουν στην οικογένεια των αλγορίθμων supervised learning, οι οποίοι εκπαιδεύονται με την χρήση γεγονότων που ξέρουμε εκ των προτέρων εάν είναι pile up ή όχι. Τα γεγονότα αυτά προέρχονται από προσημειώσεις. Χωρίζουμε τα γεγονότα μας σε δύο μέρη ένα για εκπαίδευση και ένα για αξιολόγηση. Το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας τα γεγονότα εκπαίδευσε και αξιολόγησε τις επιλογές των BDT. Η καλύτερη εκπαίδευση των BDT έγινε με την χρήση 500 δέντρων, Gradient boosting, 20 cut points και με ρυθμό μάθησης 0.1-0.25. Τα δέντρα εκπαιδευτήκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να μην επηρεάζονται από την υπερεκπαίδευση. Ο classifier της μεθόδου έχει μέγιστο στο -0.17 και είναι το σημείο που θέτουμε το cut.

Στο τέλος συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της εκπαιδευμένης μεθόδου BDT με την μέθοδο που χρησιμοποιείται τώρα (rectangular cuts) και βλέπουμε πως έχει αισθητά καλύτερα αποτελέσματα. Οπότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα BDT που εκπαιδεύσαμε για να ξεχωρίσουμε σήμα από υπόβαθρο.

7. Βιβλιογραφία

[1]CMS Technical Design Report,lhcc-2006-001,CERN

[2]CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade,CMS-TDR-012, CERN 1August 2013

[3] CMS Collaboration, CMS CR-2015/017

[4] CMS Collaboration, CMS CR-2012/032

[5] CMS Collaboration, CMS CR-2013/170

[6] CMS Collaboration, CMS CR-2014/438

[7] CMS Collaboration, J.High Energy Phys. 10, 132

[8] CMS Collaboration, J.High Energy Phys. 08, 117

[9] CMS Collaboration, hep-ex:1110.4973

[10] CMS Collaboration, Phys. Lett. B 701, 535

[11] CMS Collaboration, CMS-PAS-EWK-11-010

[12] CMS Collaboration, CMS-PAS-EWK-10-012

[13] CMS Collaboration, hep-ex:1110.33226

[14] CMS Collaboration, CMS-PAS-EWK-10-015

[15] CMS Collaboration, CMS-PAS-EWK-11-013

[16] CMS Collaboration, J.High Energy Phys. 04, 050

[17] CMS Collaboration, Phys. Rev. D 84, 112002

[18] CMS Collaboration, CMS-PAS-EWK-11-011

[19] CMS Collaboration, CMS-PAS-TOP-12-019

[20] CMS Collaboration, Phys. Lett. B 728

[21] CMS Collaboration, arXiv:1411.5621

[22] N. Kidonakis, arXiv:1311.0283

[23] CMS Collaboration, Phys. Lett. B 736

[24] CMS Collaboration, CMS-PAS-TOP-14-005

[25] CMS Collaboration, CMS-PAS-TOP-13-001

[26] CMS Collaboration, CMS-PAS-TOP-12-029

[27] CMS Collaboration, CMS-PAS-TOP-14-015

[28]M.Cacciari, G.P.Salam, and G.Soyez, “The anti-k_T jet clustering algorithm”, JHEP 0804 063

[29] CMS Collaboration, CMS-DP 2013/011

[30] CMS Collaboration, Phys. Rev. D87 112002

[31] CMS Collaboration, arXiv:1304.7498

[32] CMS Collaboration, JHEP 1305 090

[33] CMS Collaboration, JHEP 05 055

[34] LHC Higgs Cross Section Working Group, S. Heinemeyer, C. Mariotti, G. Passarino and R. Tanaka, CERN Preprint 1307.1347

[35] CMS Collaboration, Eur.Phys.J. C74 3076

[36] CMS Collaboration, Phys. Rev. D89 092007

[37] CMS Collaboration, JHEP 1401 096

[38] CMS Collaboration, JHEP 1405 104

[39] CMS Collaboration, Phys. Rev. D89 012003

[40] CMS Collaboration, CMS-PAS-HIG-14-009

[41] CMS Collaboration, Phys. Lett. B736 64

[42] CMS Collaboration, CMS-PAS-HIG-13-016

[43]L1 stage-2, Jad Marouche, June 2014

[44]TMVA 4 Users Guide

[45]ROOT Users Guide

[46]C++ guide

Appendix

A1. Μέθοδοι

1 Rectangular Cuts
Σε κάθε μεταβλητή, αναζητούμε μία τιμή που μεγιστοποιεί την αποκοπή γεγονότων υποβάθρου σε δεδομένη αποδοτικότητα σήματος. Για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων χρησιμοποιούνται οι αλγορίθμοι Monte Carlo ή Genetic Algorithm. Αντίθετα με τις άλλες μεθόδους, η συγκεκριμένη αποδίδει μόνο δύο τιμές ταξινομητή, που αντιστοιχούν στο σήμα και το υπόβαθρο.

2 Likelihood
Αυτή η μέθοδος μας δίνει την πιθανότητα για κάθε γεγονός να είναι σήμα. Για να το πετύχει αυτό φτιάχνει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για όλες τις μεταβλητές (PDF) και από εκεί υπολογίζει την πιθανότητα, θεωρώντας τις μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους.

3 Probability Density Estimator Range Search(PDERS)
Η μέθοδος PDERS είναι μία γενίκευση της μεθόδου Likelihood σε πολλές διαστάσεις. Η μέθοδος εξετάζει έναν όγκο που ορίζει ο χρήστης, γύρω από ένα γεγονός. Στη συνέχεια μετρά τα γεγονότα υποβάθρου και σήματος σε αυτόν τον όγκο και τα συγκρίνει με τα γεγονότα υποβάθρου και σήματος σε όλον το χώρο των δεδομένων εκπαίδευσης.

4 Multidimensional K-Nearest Neighbor(K-NN)
Όπως και η μέθοδος PDERS, η K-NN ασχολείται με έναν όγκο γύρω από το γεγονός που μας ενδιαφέρει. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο είναι ότι ενώ η PDERS εξετάζει έναν συγκεκριμένο όγκο, η K-NN εξετάζει συγκεκριμένο αριθμό πρώτων γειτόνων. Η απόσταση ανάμεσα στο γεγονός και τον πρώτο γείτονα λαμβάνεται υπόψη. Όπως είναι εμφανές ο όγκος σε αυτήν την περίπτωση εξαρτάται από την κατανομή των γεγονότων, και διαφέρει από μεταβλητή σε μεταβλητή.

5 H-Matrix Estimator
Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιείται ο αντίστροφος πίνακας συνδιακύμανσης των μεταβλητών για το σήμα και το υπόβαθρο, για να υπολογιστεί η ποσότητα χ^2 για το σήμα και το υπόβαθρο. Η ταξινόμηση γίνεται με τον υπολογισμό της διαφοράς των χ^2 του σήματος και του υποβάθρου διαιρεμένου με το άθροισμα τους για κάθε γεγονός.

6 Fisher Discriminant
Σε αυτήν την μέθοδο ο υπερχώρος των μεταβλητών που εισήχθηκε αντιστοιχίζεται σε έναν άλλο υπερχώρο μέσω ενός γραμμικού μετασχηματισμού. Η ιδιότητα του νέου χώρου είναι να έχει μηδενικές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο τα γεγονότα που είναι μέρος του σήματος απέχουν λίγο μεταξύ τους ενώ απέχουν πολύ με τα γεγονότα υποβάθρου. Αντίστοιχο συμβαίνει και για τα γεγονότα υποβάθρου.

7 Function Discriminanat Analysis(FDA)
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μία σχέση που της δίνει ο χρήστης για να ξεχωρίσει το σήμα από το υπόβαθρο. Για να βελτιωθεί η απόδοση της, οι παράμετροι της σχέσης που δόθηκε, μπορούν να προσαρμοστούν με την χρήση αλγορίθμων όπως Monte Carlo ή Genetic Algorithm.

8 Boosted Decision Trees (BDT)
Στην περίπτωση των BDT τα δεδομένα σήματος και υποβάθρου χωρίζονται χρησιμοποιώντας μία τιμή αποκοπής γεγονότων στην μεταβλητή όπου ο διαχωρισμός γίνεται μέγιστος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να διαχωριστούν όλα τα γεγονότα ή να παραχθεί ο μέγιστος αριθμός «κλαδιών» (δηλαδή αποκοπών

γεγονότων). Για να μειώσουμε την επίπτωση των στατιστικών διακυμάνσεων, συνήθως δεν φτιάχνουμε ένα δέντρο, αλλά πολλά (δάσος).

9 Artificial Neural Network (ANN)
Το TMVA παρέχει τρείς διαφορετικές επιλογές για νευρωνικό δίκτυο:

- Το Clermont-Ferrand νευρωνικό δίκτυο
- Το νευρωνικό δίκτυο του ROOT
- Το Multilayer Perception(MLP) νευρωνικό δίκτυο

Όλα τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από νευρώνες σε επίπεδα, που συνδέονται μόνο με το επόμενο επίπεδο. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων (συνάψεις) έχουν συγκεκριμένο βάρος το οποίο καθορίζεται κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί μία δεδομένη εξίσωση σφάλματος. Ο ταξινομητής χρησιμοποιεί τις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων για να ξεχωρίσει τα γεγονότα.

10 Rule-Fit
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων για να διαχωρίσει σήμα από υπόβαθρο. Κάθε κανόνας περιέχει ένα σύνολο απαιτήσεων που πρέπει να πληρούνται από τις μεταβλητές, ώστε ένα γεγονός να χαρακτηριστεί ως σήμα. Νοητικά η συγκεκριμένη μέθοδος ταιριάζει με τα BDT. Εάν όλες οι απαιτήσεις ενός κανόνα πληρούνται, τότε αυτό το γεγονός χαρακτηρίζεται ως σήμα. Εάν έστω και μία απαίτηση δεν πληρείται τότε είναι υπόβαθρο.

11 Support Vector Machine (SVM)
Αυτή η μέθοδος διαχωρίζει τα γεγονότα σήματος από τα γεγονότα υποβάθρου, φτιάχνοντας ένα υπερεπίπεδο ανάμεσα τους. Όλα τα γεγονότα θεωρούνται ανύσματα. Το υπερεπίπεδο καθορίζεται με χρήση του ελάχιστου δυνατού υποσυνόλου ανυσμάτων που έχουν υπολογιστεί κατά την εκπαίδευση της μεθόδου (βοηθητικά ανύσματα). Το επίπεδο φτιάχνεται έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ επιπέδου και βοηθητικών ανυσμάτων να είναι μέγιστη.