

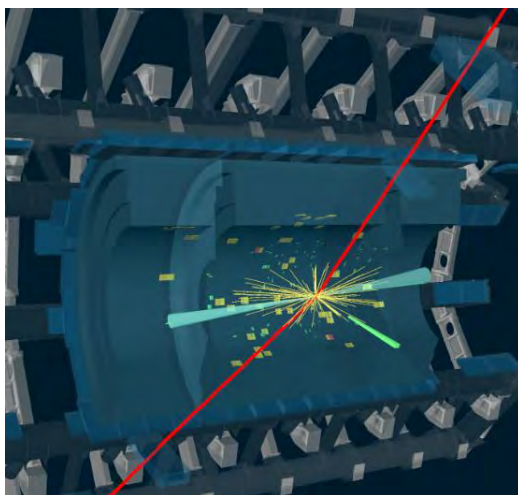


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΔΥΟ ΜΠΟΖΟΝΙΩΝ WZ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ
 $p+p \rightarrow WZ \rightarrow 3 \text{“λεπτόνια”} + 1 \text{“νεutrino”}$ στο πείραμα ATLAS

Βάγγου Σταματία



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Πτυχίου Φυσικής

ΛΑΜΙΑ 2024

© 2024 Σταματία Βάγγου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής [Διονύσιος Βαβουγιός, Καθηγητής](#)
(Επιβλέπων)

Δεύτερος Εξεταστής [Σοφός Φίλιππος, Επίκουρος Καθηγητής](#)

Τρίτος Εξεταστής [Αβραμόπουλος Άγγελος, Αναπληρωτής Καθηγητής](#)

Πρόλογος

Η μελέτη της παραγωγής δύο μποζονίων WZ μέσω της διεργασίας $p+p \rightarrow WZ \rightarrow 3$ "λεπτόνια" $+1$ "νεutrino" στο πείραμα ATLAS αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας στη σωματιδιακή φυσική. Η έρευνα αυτή εμβαθύνει στις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο υποατομικό επίπεδο, ρίχνοντας φως στη συμπεριφορά των μποζονίων WZ και στο ρόλο τους στο Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής.

Το πείραμα ATLAS, που βρίσκεται στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) στο CERN, παρέχει ένα μοναδικό περιβάλλον για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των σωματιδίων με πρωτοφανή ενέργεια και ακρίβεια. Μέσω της σχολαστικής ανάλυσης των δεδομένων με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++ και του προγράμματος ROOT, ενός ανοιχτού κώδικα πλαίσιο ανάλυσης δεδομένων που χρησιμοποιείται από τη φυσική υψηλών ενεργειών, η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην αποσαφήνιση του σήματος της διμποζονικής κατάστασης WZ από το υπόβαθρο με τη χρήση συγκεκριμένων κριτηρίων. Με την εφαρμογή αυτών των κριτηρίων επιλογής, η παρούσα έρευνα επιδιώκει να βελτιώσει την ακρίβεια του εντοπισμού των γεγονότων του μποζονίου WZ .

Σταματία Βάγγου

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΔΥΟ ΜΠΟΖΟΝΙΩΝ WZ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ $p+p \rightarrow WZ \rightarrow 3\text{“λεπτόνια”} + 1\text{“νεutrino”}$ στο πείραμα ATLAS

Σταματία Βάγγου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυσικής, 2024

Επιβλέπων Καθηγητής: Βαβουγιός Διονύσιος

Περίληψη

Η διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της παραγωγής της διμποζονικής κατάστασης WZ, εστιάζοντας στον πλήρη λεπτονικό τρόπο διάσπασης των μποζονίων, που περιλαμβάνει τρία λεπτόνια και ένα νεutrino στην τελική κατάσταση. Μέσω αναλογιών σήματος προς υπόβαθρο και αξιολογήσεων σημαντικότητας σε διάφορες τιμές μεταβλητών ως κριτήριο επιλογής γεγονότων συγκρούσεων πρωτονίου - πρωτονίου, ενισχύει την κατανόηση της πειραματικής ευαισθησίας στα σήματα WZ. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία των ακριβών κριτηρίων επιλογής δεδομένων και των αυστηρών τεχνικών ανάλυσης για τη διάκριση σπάνιων διεργασιών από το υπόβαθρο. Επιπλέον, συμβάλλουν στην ευρύτερη κατανόηση των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων, προωθώντας τους ερευνητικούς στόχους της σωματιδιακής φυσικής, ιδίως στο πλαίσιο του πειράματος ATLAS στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων στο CERN. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν αυτά τα ευρήματα για να βελτιώσουν τις πειραματικές μεθοδολογίες και να εμβαθύνουν στα φαινόμενα της σωματιδιακής φυσικής.

Λέξεις Κλειδιά: WZ παραγωγή, λεπτονική διάσπαση, σήμα προς υπόβαθρο, πείραμα ATLAS, Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων.

STUDY OF THE PRODUCTION OF TWO WZ BOSONS BY THE PROCESS $p+p \rightarrow WZ \rightarrow 3 \text{ "leptons"} + 1 \text{ "neutrino"}$ in the ATLAS experiment

Stamatia Vangou

University of Thessaly, Department of Physics, 2024

Supervisor: Vavougiuos Dionisius

Abstract

The thesis provides a comprehensive analysis of the production of WZ boson, focusing on the fully leptonic decay mode of the bosons, which involves three leptons and a neutrino in the final state. Through signal-to-background ratios and significance evaluations at various variable values as criteria for selecting proton-proton collision events, it enhances our understanding of the experimental sensitivity to WZ signals. The findings highlight the importance of accurate data selection criteria and rigorous analysis techniques for discriminating rare processes from the background. Moreover, they contribute to a broader understanding of fundamental particle interactions, advancing the research goals of particle physics, in the context of the ATLAS experiment at the Large Hadron Collider at CERN. Future studies could exploit these findings to improve experimental methodologies and to deepen the understanding of particle physics phenomena.

Keywords: *WZ production, lepton decay, signal to background, ATLAS experiment, Large Hadron Collider.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1 Το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 Οι θεμελιώδεις δυνάμεις και τα σωματίδια φορείς τους	Error! Bookmark not defined.
2.2 Τα μποζόνια W και Z	3
2.3 Η παραγωγή της WZ διμποζονικής κατάστασης	7
2.4 Υπάρχοντα Πειραματικά αποτελέσματα	6
Κεφάλαιο 3 Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων LHC στο CERN	12
3.1 Σχεδιασμός και Φωτεινότητα	12
3.2 Φωτεινότητα στο Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων	14
3.3 Εκκίνηση και χρονοδιάγραμμα λειτουργίας του LHC	14
Κεφάλαιο 4 Το πείραμα ATLAS	Error! Bookmark not defined.
4.1 Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων	20
4.2 Οι υπο-ανιχνευτές του πειράματος ATLAS	14
4.2.1 Εσωτερικός Ανιχνευτής (Inner Detector – ID)	14
4.2.2 Καλορίμετρα (Calorimeter)	14
4.2.3 Το μιονικό φασματόμετρο	14

4.3	Το σύστημα σκανδαλισμού (Trigger System)	14
4.4	Το σύστημα μαγνητών	14
4.5	Ανακατασκευές τροχιών των ηλεκτρονίων και μιονίων και η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια	14

Κεφάλαιο 5 Μελέτη γεγονότων διμποζονικής κατάστασης Error! Bookmark not defined.

5.1	Στόχος Εργασίας	36
5.2	Δεδομένα της ανάλυσης	45
5.2.1	Δείγματα δεδομένων σήματος Monte-Carlo	45
5.2.2	Δείγματα δεδομένων υποβάθρου Monte-Carlo	45
5.2.3	Προετοιμασία δεδομένων	45
5.3	Μεθοδολογία	45
5.3.1	Εξαγωγή ιστογραμμάτων ελέγχου των μεταβλητών της ανάλυσης	45
5.3.2	Σύγκριση της μορφής κατανομών	45
5.4	Λόγος του σήματος προς το υπόβαθρο	45
5.4.1	Γεγονότα σήματος και υποβάθρου χωρίς την εφαρμογή κριτηρίων επιλογής	45

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα 75

Βιβλιογραφία 78

Παράρτημα Α Error! Bookmark not defined.

Παράρτημα Β Error! Bookmark not defined.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Πίνακας με όλες τις θεμελιώδεις δυνάμεις και τους φορείς τους.....	6
Πίνακας 5.1: Πίνακας με δεδομένα από διάφορα κανάλια και ο αριθμός των γεγονότων χωρίς περικοπές.....	61
Πίνακας 5.2: Απόδοση Διαφόρων Κριτηρίων Επιλογής για τη Μάζα του Z Μποζονίου (MZ) σε Όρους Αριθμού Γεγονότων Σήματος, Υποβάθρου, S/B, και S/√(S+B).....	72
Πίνακας 5.3: Κριτήρια Επιλογής για τη Μεταβλητή mwz.....	74
Πίνακας 5.4: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή m123.....	75
Πίνακας 5.5: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή mz.....	75
Πίνακας 5.6: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή mtw.....	76

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Τα σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου και μερικές από τις ιδιότητές τους: φορτίο, χρωματικό φορτίο, μάζα και σπιν.....	4
Εικόνα 2.2: (Πάνω δύο σχήματα) Διάγραμμα Feynman με διάσπαση του Z μποζονίου σε e^+e^- και $\mu^+\mu^-$. (Κάτω σχήμα) Διάγραμμα Feynman της παραγωγής του W μποζονίου που ακολουθείται από διάσπαση σε ζεύγος $e^+ + \nu_e$	8
Εικόνα 2.3: Τα διαγράμματα Feynman για την παραγωγή ζεύγους $W^\pm Z$	9
Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση της πλήρως λεπτονικής τελικής κατάστασης της διμπζονικής κατάστασης $W^\pm Z$	10
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση του συγκροτήματος επιταχυντών του CERN.....	13
Εικόνα 3.2: Το LHC και οι διαφορετικές τοποθεσίες ανιχνευτών.....	14
Εικόνα 3.3: Πίνακας με την κινητική ενέργεια και την αντίστοιχη ταχύτητα (ως ποσοστό της ταχύτητας του φωτός) που επιτυγχάνουν οι επιταχυντικές διατάξεις του LHC.....	16
Εικόνα 3.4: Παράμετροι των συγκρούσεων πρωτονίου-πρωτονίου του LHC για τις περιόδους λήψης δεδομένων: 2010, 2011 και 2012, και οι τιμές σχεδιασμού. Οι παρατιθέμενες παράμετροι είναι: η ενέργεια του κέντρου μάζας $\sqrt{s}$, ο αριθμός πρωτονίων ανά δέσμη n_b , ο αριθμός δεσμών ανά δέσμη n_b , η χρονική απόσταση δέσμης προς δέσμη Δt , η κανονικοποιημένη εγκάρσια εκπομπή δέσμης e_n , η στιγμιαία φωτεινότητα κορυφής L και η ολοκληρωμένη φωτεινότητα ανά έτος. Κάθε τιμή που αναφέρεται αντιστοιχεί στην καλύτερη απόδοση που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια του έτους.....	18
Εικόνα 4.1: Μια τρισδιάστατη πλευρική άποψη του ανιχνευτή ATLAS και των υποσυστημάτων του.....	21
Εικόνα 4.2: Σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από το πείραμα ATLAS στον LHC.....	22
Εικόνα 4.3: Αντιστοιχία μεταξύ της pseudorapidity η και της πολικής γωνίας θ	23
Εικόνα 4.4: Ο ανιχνευτής ATLAS και ο ορισμός του ορθογώνιου συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων.....	23
Εικόνα 4.5: Αποκομμένη όψη του εσωτερικού ανιχνευτή ATLAS.....	25
Εικόνα 4.6: Σκίτσο μιας μονάδας ηλεκτρομαγνητικού θερμιδόμετρου σε η και ϕ για κάθε ένα από τα τρία στρώματα.....	27

Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού.....	28
Εικόνα 4.8: Το πρώτο εσωτερικό κάλυμμα του ανιχνευτή ATLAS μετά την πλήρη τοποθέτησή του στον Liquid Argon Cryostat.....	29
Εικόνα 4.9: Αποκομμένη τρισδιάστατη διάταξη του Φασματομέτρου Μιονίων ATLAS με την επισήμανση των υποσυστημάτων του.....	30
Εικόνα 4.10: Πραγματική όψη του πειράματος ATLAS.....	31
Εικόνα 4.11: Αποκομμένη όψη του συστήματος θερμιδόμετρου ATLAS.....	32
Εικόνα 4.12: Σύστημα μαγνητών του πειράματος ATLAS.....	33
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα Feynman WZ	40
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}$	40
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}Z$. Στην εικόνα και παρουσιάζονται οι όροι ISR και FSR, δηλαδή Initial State Radiation (Ακτινοβολία Αρχικής Κατάστασης) και Final State Radiation (Ακτινοβολία Τελικής Κατάστασης). Παραδείγματα ISR θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διαγράμματα όπου το μποζόνιο Z εκπέμπεται από ένα παρτόνιο (κουάρκ ή γκλουόνιο) στην αρχική κατάσταση πριν από την κύρια αλληλεπίδραση. Παραδείγματα FSR θα περιλάμβαναν το μποζόνιο Z που εκπέμπεται από ένα από τα σωματίδια της τελικής κατάστασης μετά την αλληλεπίδραση, όπως ένα άνω (top) κουάρκ που εκπέμπει ένα μποζόνιο Z μετά την παραγωγή του.....	41
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}W$	42
Εικόνα 5.5: Διαγράμματα Feynman $Z\gamma$	42
Εικόνα 5.6: Διαγράμματα Feynman ZZ	43
Εικόνα 5.7: Διαγράμματα Feynman για διάσπαση $Z\mu\mu$ (αριστερά) και Zee (δεξιά).....	43
Εικόνα 5.8: Ιστογράμματα μεταβλητών που αφορούν τις ορμές.....	50
Εικόνα 5.9: Ιστογράμματα με μεταβλητές που αφορούν την κατεύθυνση.....	52
Εικόνα 5.10: Ιστόγραμμα με τη μεταβλητή της ελλείπουσας εγκάρσιας ενέργειας.....	52

Εικόνα 5.11: Ιστογράμματα με μεταβλητές που αφορούν τους πίδακες.....	53
Εικόνα 5.12: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τη μάζα.....	55
Εικόνα 5.13: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τις ορμές.....	57
Εικόνα 5.14: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν την κατεύθυνση.....	58
Εικόνα 5.15: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με την ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια.....	59
Εικόνα 5.16: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τους πίδακες.....	59
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_{WZ} μετρημένη σε GeV.....	63
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής m_{123} μετρημένη σε GeV.....	64
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής m_Z μετρημένη σε GeV.....	65
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής m_{TW}	65
Εικόνα 5.21: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής n_{bjets}	66
Εικόνα 5.22: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_{WZ} μετρημένη σε GeV.....	67
Εικόνα 5.23: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_{123} μετρημένη σε GeV.....	68
Εικόνα 5.24: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_Z μετρημένη σε GeV.....	69

Εικόνα 5.25: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_{tw} μετρημένη σε GeV.....69

Εικόνα 5.26: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής n_{bjets}70

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της κατανόησής μας για τη φύση της ύλης ξεκίνησε από την αρχαιότητα, με τον Δημόκριτο να πρωτοεισάγει την έννοια των "αδιαιρέτων" σωματιδίων, τα οποία αργότερα ονομάστηκαν "άτομα". Παρόλο που αυτή η ιδέα ήταν προκλητική για την εποχή του, σήμερα γνωρίζουμε ότι ο κόσμος των σωματιδίων είναι πολύ πιο πολύπλοκος από ό,τι περιέγραψε ο Δημόκριτος. Αντί για τα αδιαίρετα άτομα, ανακαλύψαμε τα κουάρκ, τα λεπτόνια και τα σωματίδια που διαδίδουν τις δυνάμεις, που αποτελούν τα θεμέλια της σύγχρονης σωματιδιακής φυσικής.

Μέσω της συνδυασμένης προσπάθειας πειραμάτων και θεωρητικής ανάλυσης, δημιουργήθηκε το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής, που αποτελεί μια σύνθεση των πιο σημαντικών ανακαλύψεων στον τομέα. Αυτό το πρότυπο περιγράφει τα βασικά σωματίδια και τις αλληλεπιδράσεις τους με έναν ακριβή και συνολικό τρόπο. Παρόλα αυτά, αν και το Καθιερωμένο Πρότυπο αποτελεί μία εντυπωσιακή και συμπαγή περιγραφή του κόσμου των σωματιδίων και των αλληλεπιδράσεών τους, εξακολουθούν να υπάρχουν ανεξήγητα φαινόμενα και ανοιχτές ερωτήσεις που τίθενται μπροστά μας.

Η πρόοδος στη φυσική σωματιδίων συνδέεται στενά με τις επιστημονικές παρατηρήσεις και την τεχνολογική εξέλιξη. Η ανάπτυξη μεγάλων επιταχυντών σωματιδίων και η δυνατότητα δημιουργίας ελεγχόμενων συγκρούσεων μεταξύ αυτών έχει δώσει τη δυνατότητα να δοκιμαστούν τα όρια του Καθιερωμένου Προτύπου. Παρόλο που οι πειραματικές παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν συχνά τις προβλέψεις του Καθιερωμένου Προτύπου, υπάρχουν επίσης περιπτώσεις που αντίκεινται στις θεωρητικές προβλέψεις. Αυτό δείχνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και κατανόηση σε αυτό τον σημαντικό τομέα της φυσικής.

Λαμβάνοντας υπόψη το ευρύ φάσμα του Καθιερωμένου Προτύπου, αυτή η εργασία παρουσιάζει μια επισκόπηση μόνο ορισμένων από τις πτυχές της θεωρίας. Παρουσιάζεται

λοιπόν το πλαίσιο της μέτρησης της παραγωγής δύο μποζονίων $W^\pm Z$, εστιάζοντας στον ηλεκτρασθενή τομέα του Καθιερωμένου Προτύπου και αναλύοντας τη διαδικασία παραγωγής του. Πειραματικά, η παραγωγή δύο μποζονίων $W^\pm Z$ μελετάται με την ανάλυση γεγονότων σύγκρουσης σε επιταχυντές σωματιδίων υψηλής ενέργειας, όπως ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (Large Hadron Collider - LHC). Το πείραμα ATLAS, μεταξύ άλλων, συλλέγει δεδομένα από συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων και χρησιμοποιεί εξελιγμένους ανιχνευτές για τον εντοπισμό και την ανακατασκευή των προϊόντων διάσπασης των παραγόμενων μποζονίων. Συγκρίνοντας τους παρατηρούμενους ρυθμούς συμβάντων και τις κινηματικές κατανομές με τις θεωρητικές προβλέψεις, οι ερευνητές μπορούν να επικυρώσουν το Καθιερωμένο Πρότυπο. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της παραγωγής δύο μποζονίων $W^\pm Z$ παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη φύση των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων και μπορούν να περιορίσουν τις παραμέτρους του Καθιερωμένου Προτύπου.

Η δομή της παρούσας εργασίας είναι η εξής: Το κεφάλαιο 2 εστιάζει στο Καθιερωμένο Πρότυπο, τα μποζόνια W και Z , την παραγωγή της διμποζονικής κατάστασης WZ , καθώς και τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο επιταχυντής LHC, αναλύοντας το σχεδιασμό του και τη φωτεινότητα.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζεται το πείραμα ATLAS, αναλύοντας τη γεωμετρία του, τα υποσυστήματα του, το σύστημα σκανδαλισμού, το σύστημα μαγνητών και οι ανακατασκευές τροχιών των ηλεκτρονίων και μιονίων και ορίζεται η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η ανάλυση και τα αποτελέσματα της έρευνάς μου καθώς και η ανάλυση δεδομένων για την αναγνώριση και τον χαρακτηρισμό των διμποζονικών συμβάντων WZ .

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα ευρήματά μου και παρουσιάζονται τα συμπεράσματά μου.

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής

Το Καθιερωμένο Πρότυπο της Σωματιδιακής Φυσικής ορίζει πώς τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία της ύλης αλληλεπιδρούν χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις δυνάμεις. Από τη δεκαετία του 1930, εκατοντάδες φυσικοί ανέπτυξαν υποθέσεις και έκαναν ανακαλύψεις που οδήγησαν στη δημιουργία αυτού του προτύπου[1-4]. Το Καθιερωμένο Πρότυπο έχει περιγράψει με επιτυχία σχεδόν όλα τα πειραματικά ευρήματα και έχει προβλέψει με ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα φαινομένων. Με την πάροδο του χρόνου και μέσω πολλαπλών δοκιμών, έχει εξελιχθεί σε μια καλά επικυρωμένη θεωρία της φυσικής. Το Καθιερωμένο Πρότυπο μπορεί να εξηγήσει την ύπαρξη εκατοντάδων σωματιδίων και τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις τους με μόνο έξι κουάρκ, έξι λεπτόνια και σωματίδια που δρουν ως φορείς των δυνάμεων για κάθε αλληλεπίδραση και ονομάζονται μποζόνια.

Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται στοιχειώδη σωματίδια επειδή δεν φαίνεται να είναι φτιαγμένα από συνδυασμούς μικρότερων σωματιδίων.

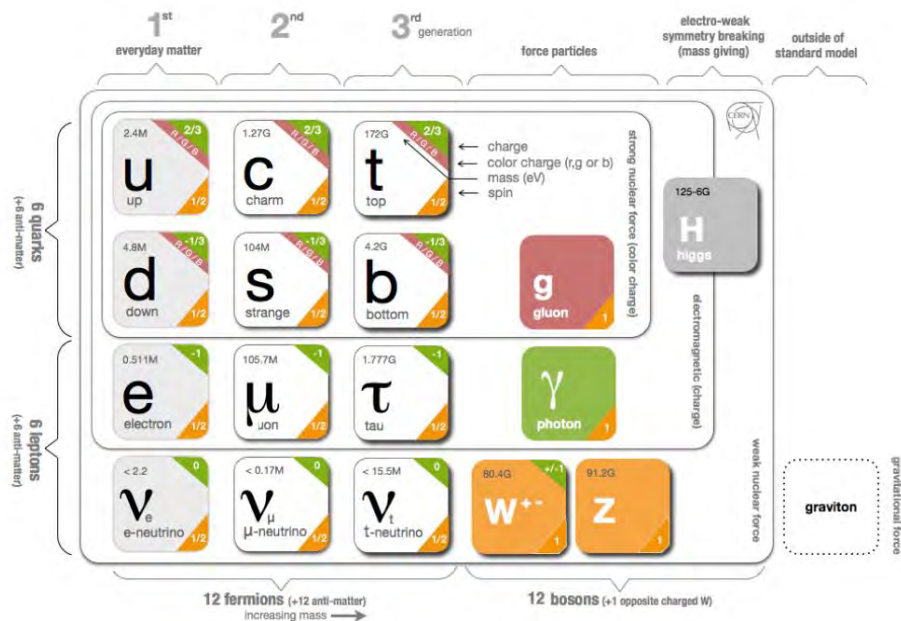
Τα στοιχειώδη σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις διατηρούμενες ποσότητες, που ονομάζονται κβαντικοί αριθμοί. Τα κουάρκ και τα λεπτόνια έχουν σπιν $1/2$ και υπακούουν στη στατιστική Fermi-Dirac, ενώ οι διαδότες των δυνάμεων έχουν ακέραιο σπιν και ακολουθούν τη στατιστική Bose-Einstein.

Ένα αντισωματίδιο συνδέεται με κάθε ένα από τα στοιχειώδη σωματίδια. Αν και ορισμένα από αυτά είναι τα ίδια τα αντισωματίδιά τους. Μεταξύ των λεπτονίων, τα ηλεκτρόνια, τα μίονια και τα ταυ είναι ηλεκτρικά φορτισμένα, ενώ τα αντίστοιχα νετρίνα είναι χωρίς φορτίο. Τα κουάρκ φέρουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο και, επιπλέον, έχουν και χρωματικό φορτίο. Κάθε κουάρκ εμφανίζεται σε τρεις διαφορετικές χρωματικές καταστάσεις: "κόκκινο", "μπλε" και "πράσινο". Αυτό είναι σημαντικό για τη δυνατή τους

αλληλεπίδραση, η οποία τα συνδέει μαζί μέσα σε άχρωμα σωματίδια που ονομάζονται αδρόνια (όπως τα πρωτόνια)[1,2].

Τα φερμιόνια (κουάρκ και λεπτόνια) μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις γενιές με ίδια δομή, διαφέροντας μόνο κατά τη μάζα τους, οι οποίες αποτελούν συνολικά έξι είδη (ή «γεύσεις» όπως συνήθως λέγονται στην ορολογία της σωματιδιακής φυσικής) κουάρκ και έξι γεύσεις λεπτονίων. Η μάζα αυξάνεται από την πρώτη γενιά στην επόμενη. Η πρώτη γενιά φερμιονίων αποτελείται από τα ελαφρύτερα σωματίδια, τα οποία αποτελούν τα δομικά στοιχεία της συνηθισμένης ύλης. Η δεύτερη και η τρίτη γενιά των φορτισμένων λεπτονίων (μ και τ) είναι ασταθείς και διασπώνται σε άλλα σωματίδια.

Τα μποζόνια είναι οι διαδότες θεμελιωδών δυνάμεων της φυσικής: ισχυρή, ηλεκτρομαγνητική, ασθενή και βαρυτική. Κάθε θεμελιώδης δύναμη έχει το δικό της αντίστοιχο μποζόνιο: η ισχυρή δύναμη μεταφέρεται από γκλουόνια, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη από το φωτόνιο, και τα $W^\pm$ και Z μποζόνια είναι υπεύθυνα για την ασθενή δύναμη.



Εικόνα 2.1: Τα σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου και μερικές από τις ιδιότητές τους: φορτίο, χρωματικό φορτίο, μάζα και σπιν.

Μια συνοπτική εικόνα των βασικών σωματιδίων του Καθιερωμένου Προτύπου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Στην εικόνα φαίνονται τα κουάρκ, τα λεπτόνια, τα μποζόνια

και οι τρεις γενιές φερμιονίων. Παρουσιάζονται τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν μέσω των ισχυρών πυρηνικών, ηλεκτρομαγνητικών και ασθενών πυρηνικών δυνάμεων. Παρουσιάζεται επίσης το υποθετικό μποζόνιο της βαρυτικής αλληλεπίδρασης το βαρυτόνιο παρόλο που δεν αποτελεί μέρος του Καθιερωμένου Προτύπου.

2.1.1 ΟΙ ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΦΟΡΕΙΣ ΤΟΥΣ

Το σύμπαν διέπεται από τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις: την ισχυρή δύναμη, την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, την ασθενή δύναμη και τη βαρύτητα. Κάθε μία από αυτές τις δυνάμεις διαμεσολαβείται από σωματίδια γνωστά ως μποζόνια [4-7].

Η ισχυρή δύναμη, η οποία συνδέει τα κουάρκ μεταξύ τους για να σχηματίσουν πρωτόνια, νετρόνια και άλλα αδρόνια, μεταφέρεται από γκλουόνια. Τα γκλουόνια είναι σωματίδια χωρίς μάζα που αλληλεπιδρούν με τα κουάρκ μέσω της ανταλλαγής χρωματικού φορτίου, μιας από τις θεμελιώδεις ιδιότητες των κουάρκ. Στην Κβαντική Χρωμοδυναμική (QCD), το "χρώμα" είναι μια ιδιότητα των κουάρκ και των γκλουονίων που εξηγεί την ισχυρή αλληλεπίδραση, η οποία συγκρατεί τα κουάρκ μαζί για να σχηματίσουν αδρόνια όπως τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Τα κουάρκ έχουν τρία είδη χρωματικού φορτίου (κόκκινο, πράσινο, μπλε), ενώ τα αντικουάρκ έχουν αντίστοιχα αντικόκκινο, αντιπράσινο και αντιμπλε. Τα γκλουόνια, που μεσολαβούν στην ισχυρή δύναμη, μεταφέρουν συνδυασμούς χρώματος και αντιχρώματος, επιτρέποντας τη συνεχή αλλαγή χρώματος των κουάρκ, ενώ παράλληλα διατηρούν τη χρωματική ουδετερότητα των αδρονίων. Αυτή η δυναμική διαδικασία εξασφαλίζει τον "περιορισμό χρώματος", σύμφωνα με τον οποίο τα κουάρκ δεν εμφανίζονται ποτέ ελεύθερα στη φύση, αλλά πάντα εντός αδρονίων[8].

Η εμβέλεια της ισχυρής αλληλεπίδρασης είναι της τάξης περίπου 10^{-15} μέτρων και είναι η ισχυρότερη δύναμη, με μια σταθερά σύζευξης που μεταβάλλεται με την ενεργειακή κλίμακα. Η ασυμπτωτική ελευθερία είναι μια ιδιότητα της ισχυρής δύναμης, που περιγράφεται από την κβαντική χρωμοδυναμική (QCD), όπου η δύναμη μεταξύ των κουάρκ γίνεται ασθενέστερη όσο πλησιάζουν μεταξύ τους. Σε εξαιρετικά μικρές αποστάσεις ή υψηλές ενέργειες, τα κουάρκ συμπεριφέρονται σχεδόν σαν ελεύθερα σωματίδια, βιώνοντας

ελάχιστη αλληλεπίδραση. Αντίθετα, καθώς τα κουάρκ απομακρύνονται, η δύναμη μεταξύ τους ενισχύεται, εμποδίζοντας τον διαχωρισμό τους. Αυτή η μοναδική συμπεριφορά έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, όπου η δύναμη μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. Η ασυμπτωτική ελευθερία είναι μια κρίσιμη έννοια για την κατανόηση του περιορισμού των κουάρκ μέσα στα πρωτόνια, τα νετρόνια και άλλα αδρόνια[9].

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη, υπεύθυνη για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων, διαμεσολαβείται από τα φωτόνια. Τα φωτόνια είναι σωματίδια χωρίς μάζα που μεταφέρουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Η δύναμη αυτή έχει άπειρη εμβέλεια, που σημαίνει ότι μπορεί να δράσει σε οποιαδήποτε απόσταση. Η ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης χαρακτηρίζεται από τη σταθερά λεπτής υφής α , η οποία είναι περίπου ίση με $1/137$, έναν αριθμό χωρίς διαστάσεις που ποσοτικοποιεί την ισχύ της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης στο πεδίο της κβαντομηχανικής. Η δύναμη αυτή διέπει ένα ευρύ φάσμα φαινομένων, από τη συμπεριφορά των ατόμων και των μορίων έως την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός, καθιστώντας την θεμελιώδη.

Η ασθενής δύναμη, η οποία διέπει διαδικασίες όπως η διάσπαση βήτα και οι αλληλεπιδράσεις νετρίνων, μεταφέρεται από τα μποζόνια $W^\pm$ και Z . Έχει πολύ μικρή εμβέλεια περίπου 10^{-18} μέτρα και είναι ασθενέστερη τόσο από την ισχυρή όσο και από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Σε αντίθεση με τις ισχυρές και τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, η ασθενής αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη γεύση των σωματιδίων και στη μετατροπή ενός τύπου κουάρκ ή λεπτονίου σε άλλο.

Τέλος, η βαρύτητα, είναι η ασθενέστερη δύναμη στο σύμπαν και υποτίθεται ότι διαμεσολαβείται από το βαρυτόνιο, αν και δεν έχει ακόμη παρατηρηθεί πειραματικά. Η αλληλεπίδραση αυτών των θεμελιωδών δυνάμεων και των μποζονίων τους διαμορφώνει τη συμπεριφορά της ύλης και της ενέργειας στο πιο θεμελιώδες επίπεδο.

Θεμελιώδεις Δυνάμεις				
Αλληλεπίδραση	Φορέας	Σύμβολο	Μάζα (GeV)	Εμβέλεια
Ηλεκτρομαγνητική	Φωτόνιο	γ	0	άπειρη
Ασθενής	Μποζόνιο $W^\pm$	$W^\pm$	80.22	10^{-18} (m)
Ασθενής	Μποζόνιο Z^0	Z^0	91.19	10^{-18} (m)
Ισχυρή	Γκλουόνιο	g	0	10^{-15} (m)
Βαρυτική	Βαρυτόνιο	G	0	άπειρη

Πίνακας 2.1: Πίνακας με όλες τις θεμελιώδεις δυνάμεις και τους φορείς τους.

2.2 Τα μποζόνια W και Z

Τα μποζόνια W και Z είναι συστατικά του Καθιερωμένου Προτύπου της Σωματιδιακής Φυσικής, υπεύθυνα για τη διαμεσολάβηση της ασθενούς δύναμης, μιας από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης[10].

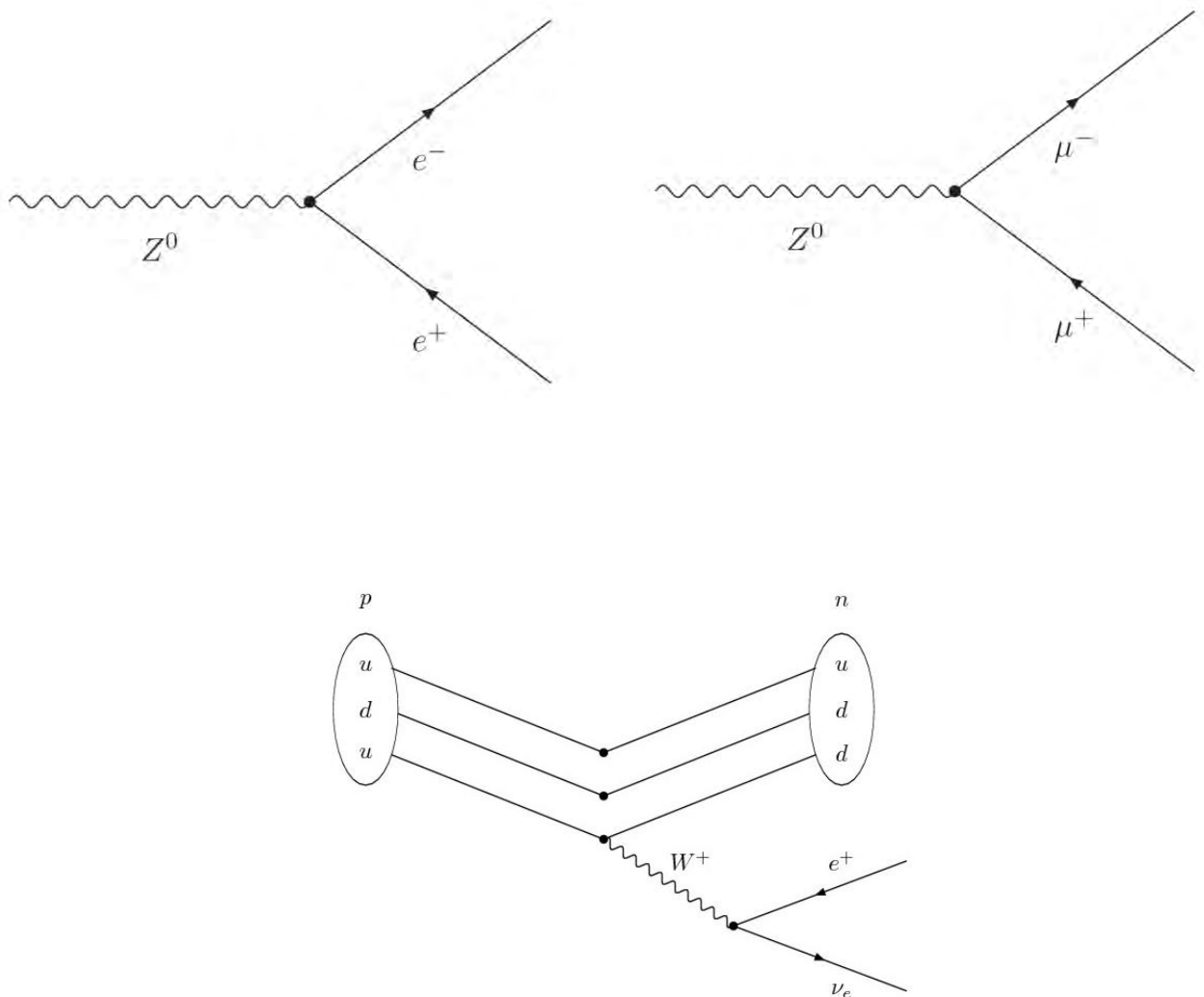
Αυτά τα μποζόνια προέκυψαν από τις θεωρητικές προσπάθειες για την ενοποίηση της ασθενούς και της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης σε ένα ενιαίο πλαίσιο γνωστό ως ηλεκτρασθενής θεωρία.

Τα μποζόνια W και Z παράγονται σε συγκρούσεις σωματιδίων υψηλής ενέργειας, όπως αυτές που συμβαίνουν σε επιταχυντές σωματιδίων όπως ο LHC. Για παράδειγμα, μπορούν να παραχθούν όταν κουάρκ ή λεπτόνια συγκρούονται σε επαρκείς ενέργειες. Μόλις παραχθούν, τα μποζόνια W και Z διασπώνται γρήγορα σε άλλα σωματίδια. Τα μποζόνια W, W^+ και W^- , διασπώνται σε ένα λεπτόνιο (όπως ένα ηλεκτρόνιο ή μιονίο) και ένα νεutrino ή σε ένα ζεύγος κουάρκ. Το μποζόνιο Z διασπάται συνήθως σε ένα ζεύγος λεπτονίων (όπως ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο) ή σε ένα ζεύγος κουάρκ.

Τα μποζόνια W έχουν μάζα περίπου $80.37 \text{ GeV}/c^2$, καθιστώντας τα περίπου 80 φορές βαρύτερα από ένα πρωτόνιο. Το μποζόνιο Z είναι ελαφρώς βαρύτερο, με μάζα περίπου $91.18 \text{ GeV}/c^2$, δηλαδή περίπου 90 φορές τη μάζα ενός πρωτονίου.

Τα μποζόνια W και Z παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά το 1983 στο CERN από τα πειράματα UA1 και UA2 χρησιμοποιώντας τον επιταχυντή Super Proton Synchrotron. Αυτή η πρωτοποριακή ανακάλυψη επιβεβαίωσε την ηλεκτρασθενή θεωρία που πρότειναν οι Sheldon Glashow, Abdus Salam και Steven Weinberg, η οποία τους χάρισε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής[11-13]. Η ηλεκτρασθενής θεωρία ενοποιεί δύο από τις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης: τον ηλεκτρομαγνητισμό και την ασθενή πυρηνική δύναμη. Προτάθηκε τη δεκαετία του 1970 από τους Sheldon Glashow, Abdus Salam και Steven Weinberg και περιγράφει πώς αυτές οι δύο δυνάμεις ήταν κάποτε ξεχωριστές οντότητες αλλά ενοποιήθηκαν καθώς το σύμπαν ψύχθηκε μετά τη Μεγάλη Έκρηξη [14].

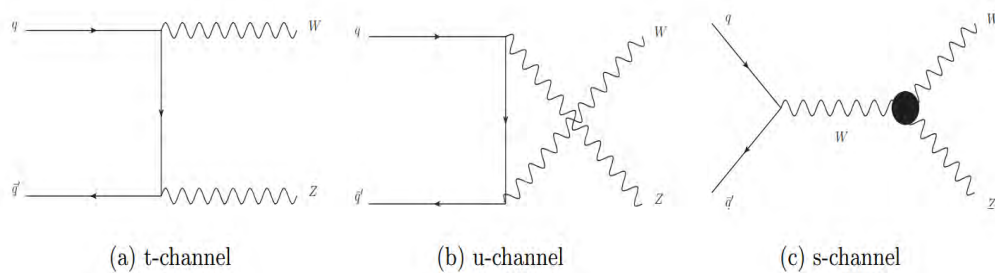
Τα διαγράμματα Feynman παρέχουν μια οπτική αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων που αφορούν τα μποζόνια W και Z. Για παράδειγμα, κατά την παραγωγή ενός μποζονίου W, ένα κουάρκ από ένα πρωτόνιο και ένα αντικουάρκ από ένα αντιπρωτόνιο μπορούν να εξαϋλωθούν, με αποτέλεσμα την εκπομπή ενός μποζονίου W^+ . Κατά τη διάσπαση, ένα μποζόνιο W μπορεί να διασπαστεί σε ένα λεπτόνιο και ένα νεutrino. Για τα μποζόνια Z, ένα τυπικό διάγραμμα δείχνει το μποζόνιο Z να διασπάται σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου ή ένα ζεύγος μιονίου-αντιμιονίου.



Εικόνα 2.2: (Πάνω δύο σχήματα) Διάγραμμα Feynman με διάσπαση του Z μποζονίου σε e^+e^- και $\mu^+\mu^-$. (Κάτω σχήμα) Διάγραμμα Feynman της παραγωγής του W μποζονίου που ακολουθείται από διάσπαση σε ζεύγος $e^+\nu_e$ [15].

2.3 Η παραγωγή της WZ διμποζονικής κατάστασης

Η ταυτόχρονη παραγωγή δύο μποζονίων W και Z ανακαλύφθηκε πρώτα στο Fermilab χρησιμοποιώντας έναν επιταχυντή πρωτονίων-αντιπρωτονίων. Σήμερα, μελετάται στο περιβάλλον του επιταχυντή πρωτονίων πρωτονίων στον LHC στο CERN το οποίο προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερους ρυθμούς παραγωγής λόγω της αυξημένης φωτεινότητας (luminosity) του επιταχυντή. Ο πρωταρχικός μηχανισμός παραγωγής στους επιταχυντές αδρονίων είναι μέσω αλληλεπιδράσεων κουάρκ-αντικουάρκ. Παρόλο που τα μποζόνια W και Z είναι εξαιρετικά ασταθή σωματίδια, γνωρίζουμε την ύπαρξή τους μετρώντας τις ιδιότητες των παραγόμενων σωματιδίων. Η ταυτόχρονη παραγωγή αυτών των δύο ασθενών μποζονίων είναι μια φυσική διαδικασία που εμπλέκεται σε ένα μεγάλο εύρος μετρήσεων στο LHC και ονομάζεται παραγωγή ζεύγους μποζονίων WZ. Τα διαγράμματα Feynman χαμηλότερης τάξης (LO) για τη διαδικασία $q\bar{q} \rightarrow W^\pm Z$ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.3.



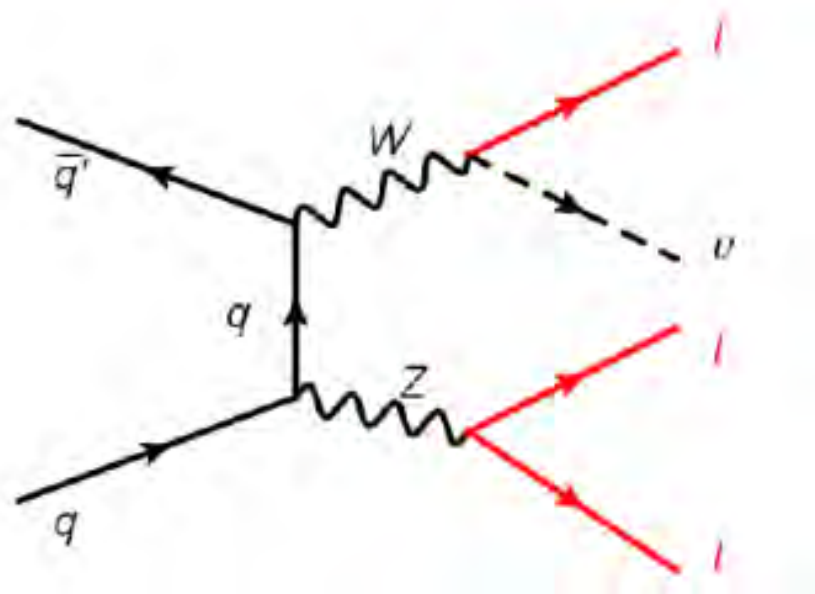
Εικόνα 2.3: Τα διαγράμματα Feynman για την παραγωγή ζεύγους $W^\pm Z$ [16].

Από αριστερά προς τα δεξιά, οι αλληλεπιδράσεις ακολουθούν τα κανάλια t (σκέδαση), u και s (εξαϋλωση), με το κανάλι s να είναι το μοναδικό διάγραμμα LO που περιλαμβάνει έναν κόμβο Triple Gauge Coupling (WWZ).

Το "Triple Gauge Coupling" (TGC)[17] αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο τύπο αλληλεπίδρασης στη σωματιδιακή φυσική που περιλαμβάνει τρία μποζόνια: δύο μποζόνια W (που αντιπροσωπεύουν τους φορτισμένους φορείς της ασθενούς δύναμης) και ένα μποζόνιο Z (που αντιπροσωπεύει τον ουδέτερο φορέα της ασθενούς δύναμης).

Στο πλαίσιο της ηλεκτρασθενούς θεωρίας, οι αλληλεπιδράσεις TGC είναι θεμελιώδεις καθώς περιγράφουν την ταυτόχρονη ανταλλαγή αυτών των μποζονίων κατά τη διάρκεια ορισμένων αλληλεπιδράσεων σωματιδίων.

Στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 2.4, ένα ζεύγος $q\bar{q}'$ εξαυλώνεται σε ένα W μποζόνιο, το οποίο στη συνέχεια διασπάται σε ένα ζεύγος $W^\pm Z$. Επιπλέον, υπάρχουν διορθώσεις δεύτερης τάξης (NLO) από κουάρκ-γκλουόνια και αντι-κουάρκ-γκλουόνια, που προκαλούν την παρουσία ενός επιπλέον κουάρκ στην τελική κατάσταση. Άλλες συνεισφορές NLO περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις $q\bar{q}'$ με διακλαδώσεις γκλουόνιων στην τελική κατάσταση και αλληλεπιδράσεις $q\bar{q}'$ με εικονικές διορθώσεις. Σε ορισμένες διαδικασίες γκλουόνιο-γκλουόνιο, το ζεύγος μποζονίων $W^\pm Z$ συχνά συνοδεύεται από τουλάχιστον δύο πίδακες, οδηγώντας σε διορθώσεις NNLO με πολύ μικρή συνεισφορά.



Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση της πλήρως λεπτονικής τελικής κατάστασης της διμπζονικής κατάστασης $W^\pm Z$ [18].

Αυτή η εργασία διερευνά την παραγωγή ζευγών μποζονίων WZ από γεγονότα που διασπώνται αποκλειστικά λεπτονικά. Όταν γίνεται αναφορά σε "αποκλειστικά λεπτονική διάσπαση", υπονοείται ότι το ζεύγος μποζονίων WZ διασπάται σε λεπτόνια και τα αντισωματίδιά τους χωρίς να εμπλέκονται αδρονικά προϊόντα διάσπασης. Τα λεπτόνια περιλαμβάνουν σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια, τα μύονια, με εξαίρεση τα ταυ λεπτόνια και τα αντίστοιχα νετρίνα τους.

Εναλλακτικά, το ζεύγος μποζονίων WZ θα μπορούσε να διασπαστεί μέσω άλλων καναλιών, όπως η ημιλεπτονική διάσπαση, όπου το ένα μποζόνιο (W ή Z) διασπάται

λεπτονικά και το άλλο μποζόνιο (Z ή W) αδρονικά, με αποτέλεσμα μια τελική κατάσταση με λεπτόνια και πίδακες αδρονίων.

Μια άλλη πιθανότητα είναι η πλήρως αδρονική διάσπαση, όπου και τα δύο μποζόνια W και Z διασπώνται αδρονικά, οδηγώντας σε μια τελική κατάσταση που αποτελείται εξ ολοκλήρου από πίδακες αδρονίων. [16]

2.4 Υπάρχοντα Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα για τις διασπάσεις της διμποζονικής κατάστασης $W^\pm Z$, ιδιαίτερα στις πλήρως λεπτονικές τελικές καταστάσεις, έχουν μελετηθεί εκτενώς σε διάφορα πειράματα φυσικής υψηλών ενεργειών. Ειδικότερα, οι συνεργασίες ATLAS και CMS στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) έχουν προσφέρει σημαντικές γνώσεις.

Για παράδειγμα, η συνεργασία CMS έχει διεξάγει λεπτομερείς μελέτες για την παραγωγή $W^\pm Z$, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων της ενεργού διατομής παραγωγής σε συγκρούσεις πρωτονίου-πρωτονίου. Μια τέτοια μελέτη ανέφερε μια μέτρηση σε ενέργεια κέντρου μάζας 8 TeV, χρησιμοποιώντας δεδομένα που αντιστοιχούν σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα 19.6 fb^{-1} . Αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε σε γεγονότα όπου τόσο τα μποζόνια W όσο και τα μποζόνια Z διασπώνται σε λεπτόνια, με αποτέλεσμα τελικές καταστάσεις που περιλαμβάνουν ηλεκτρόνια, μίονια και ελλείπουσα εγκάρσια ορμή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενεργός διατομή παραγωγής είναι σύμφωνη με τις προβλέψεις του Καθιερωμένου Προτύπου εντός των πειραματικών και συστηματικών αβεβαιοτήτων [19].

Η συνεργασία ATLAS διερεύνησε επίσης την παραγωγή διμποζονικής κατάστασης $W^\pm Z$ σε ενέργεια κέντρου μάζας 7 TeV, 8 TeV και 13 TeV χρησιμοποιώντας δεδομένα με ολοκληρωμένη φωτεινότητα 4.6 fb^{-1} , 20.3 fb^{-1} και 36.1 fb^{-1} αντίστοιχα [20].

Κεφάλαιο 3 Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων LHC στο CERN

Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (Large Hadron Collider - LHC) λειτουργεί στο Ευρωπαϊκό Οργανισμό Πυρηνικών Ερευνών (CERN) και αναπτύχθηκε για να επιταχύνει πρωτόνια σε πολύ υψηλές ενέργειες[21-22]. Χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή συγκρούσεων πρωτονίων-πρωτονίων με σκοπό τη μελέτη των ιδιοτήτων της ύλης σε πολύ υψηλές ενεργειακές κλίμακες, καθώς και για την ανίχνευση νέων σωματιδίων και την εξερεύνηση της φυσικής πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Ο LHC τοποθετήθηκε στην υπάρχουσα σήραγγα του προηγούμενου επιταχυντή, του Μεγάλου Επιταχυντή Ηλεκτρονίων - Ποζιτρονίων (LEP), χρησιμοποιώντας το ίδιο το σύστημα σήραγγας με σκοπό την αξιοποίηση της υποδομής που ήταν ήδη διαθέσιμη. Αυτό επέτρεψε τη μεγάλη ενεργειακή κλίμακα του LHC, ικανή να επιταχύνει πρωτόνια σε ενέργεια κέντρου μάζας περίπου 14 TeV και ιόντα μολύβδου σε 2.8 TeV ανά νουκλεόνιο[23].

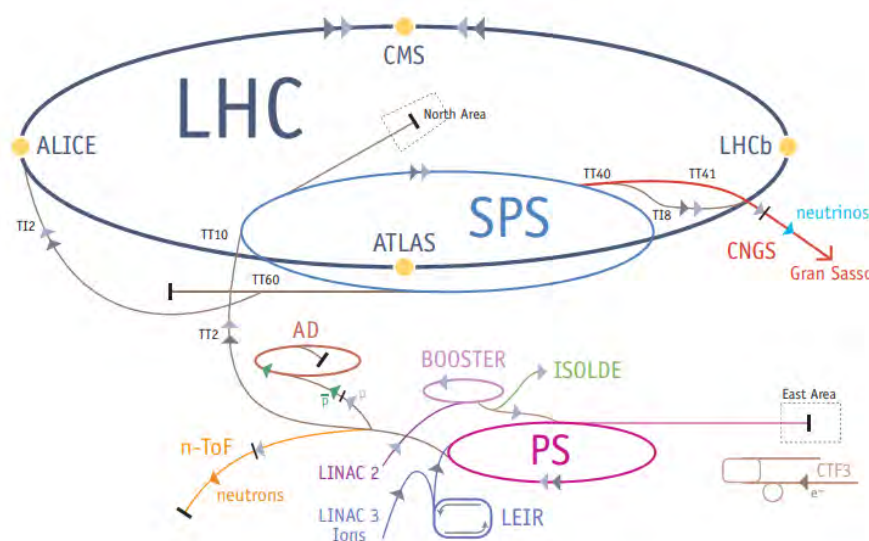
Η επιλογή της χρήσης αδρονίων αντί για λεπτονίων/ηλεκτρονίων έγινε λόγω της μικρότερης απώλειας ενέργειας μέσω της ακτινοβολίας σύγχροντρον, καθώς η απώλεια ενέργειας σε κυκλικούς επιταχυντές είναι ανάλογη του $1/m^4$, όπου m είναι η μάζα του επιταχυνόμενου σωματιδίου. Τα πρωτόνια είναι περίπου 2000 φορές βαρύτερα από τα ηλεκτρόνια[23], οπότε χάνουν πολύ λιγότερη ενέργεια μέσω της ακτινοβολίας. Αυτό το χαρακτηριστικό τα καθιστά πιο κατάλληλα για πειράματα υψηλής ενέργειας σε κυκλικούς επιταχυντές, όπου η ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της σταθερότητας της δέσμης και την επίτευξη υψηλότερων ενεργειών σύγκρουσης[24].

Επομένως, η χρήση αδρονίων προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και την πειραματική απόδοση σε ορισμένα περιβάλλοντα επιταχυντών σε σύγκριση με ελαφρύτερα σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια[25].

Ο LHC έχει διεξάγει περιόδους συγκρούσεων πρωτονίων πρωτονίων σε διάφορες ενέργειες στο κέντρο μάζας. Οι ενέργειες αυτές από τα 7 TeV στο κέντρο μάζας κατά το ξεκίνημα του προγράμματος του LHC έχουν φτάσει σήμερα στα 6.8 TeV ανά δέσμη, δηλαδή στα 13.6 TeV στο κέντρο μάζας. Η ονομαστική ενέργεια κέντρου μάζας στον LHC είναι 14 TeV. Οι συγκρούσεις των δεσμών του LHC πραγματοποιούνται σε τέσσερα σημεία πάνω στο

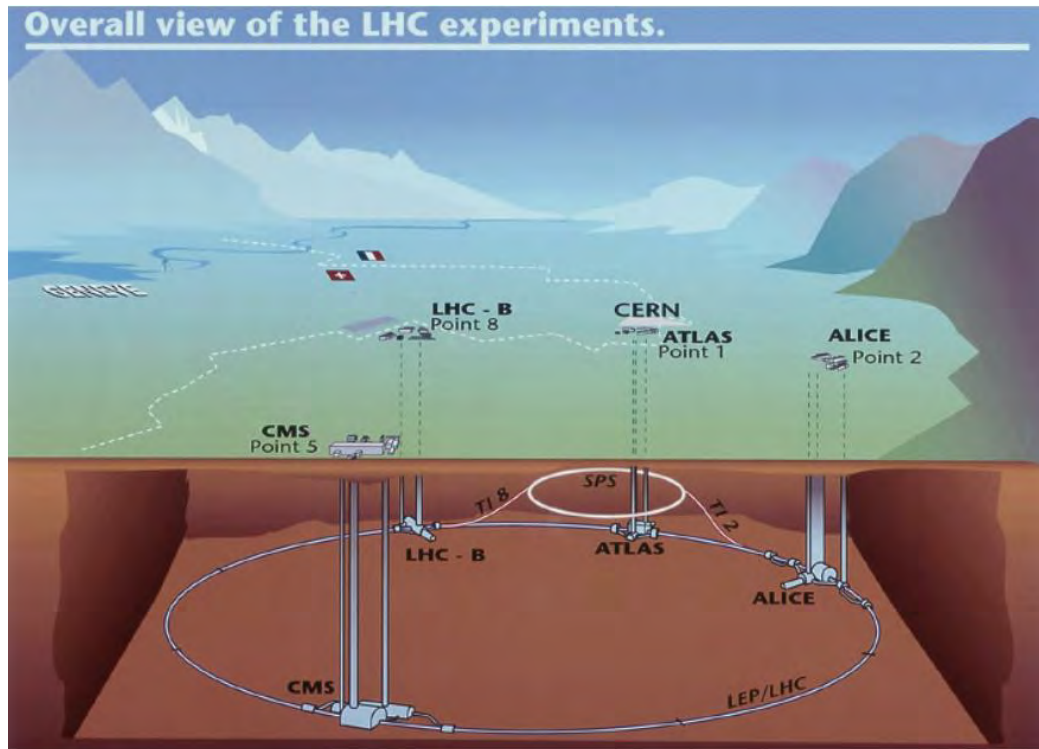
δακτύλιο του LHC, εκ των οποίων κάθε ένα είναι εξοπλισμένο με ανιχνευτές για την καταγραφή των σωματιδίων και των αλληλεπιδράσεων που προκύπτουν.

Τα πειράματα ATLAS και CMS είναι αφιερωμένα στη μελέτη των συγκρούσεων πρωτονίων-πρωτονίων και βαρέων ιόντων σε γενικό επίπεδο. Το πείραμα ALICE εστιάζει στη μελέτη της αλληλεπίδρασης ύλης σε ακραίες τιμές ενεργειακής πυκνότητας και θερμοκρασίας σε συγκρούσεις πυρήνων-πυρήνων. Το πείραμα LHCb εξετάζει την παραβίαση CP (charge parity). Τα πειράματα TOTEM και LHCf εστιάζουν στην πολύ εμπρόσθια περιοχή για μετρήσεις σχετικές με τη διασπορά και την ελαστική σκέδαση σωματιδίων[26].



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση του συγκροτήματος επιταχυντών του CERN[26].

Η εικόνα 3.1 απεικονίζει το συγκρότημα επιταχυντών του CERN. Περιλαμβάνει διάφορους επιταχυντές και τους σχετικούς δακτυλίους και διατάξεις. Τα πειράματα του LHC σημειώνονται με κίτρινους κύκλους. Ο LHC είναι ο τελευταίος δακτύλιος (σκούρα γκρίζα γραμμή) σε μια αλυσίδα επιταχυντών σωματιδίων. Οι μικρότερες επιταχυντικές διατάξεις χρησιμοποιούνται στην αλυσίδα για να βοηθήσουν τα σωματίδια να φτάσουν στις τελικές τους ενέργειες.



Εικόνα 3.2: Το LHC και οι διαφορετικές τοποθεσίες ανιχνευτών[27].

3.1 Σχεδιασμός και Φωτεινότητα

Ο LHC αποτελεί τον μεγαλύτερο και πιο ισχυρό επιταχυντή σωματιδίων παγκοσμίως. Εκκίνησε τη λειτουργία του στις 10 Σεπτεμβρίου 2008 και αποτελεί την τελευταία προσθήκη στο συγκρότημα επιταχυντών του CERN. Το σχήμα του LHC περιλαμβάνει έναν κυκλικό δακτύλιο μήκους 27 χιλιομέτρων, σε βάθος από 50 έως 175 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η επιλογή του τούνελ έγινε για να αποφευχθεί η αγορά ακριβών επιφανειακών εκτάσεων και να εκμεταλλευτεί το θωρακισμό κατά της φυσικής ακτινοβολίας που παρέχει ο φλοιός της Γης[22]. Το τούνελ, διαμέτρου 3.8 μέτρων, ολοκληρώθηκε μεταξύ 1983 και 1988 και χρησιμοποιούνταν από τον Μεγάλο Επιταχυντή Ηλεκτρονίων-Ποζιτρονίων (LEP)[22]. Το τούνελ διασχίζει τα σύνορα μεταξύ Ελβετίας και Γαλλίας σε τέσσερα σημεία, με το μεγαλύτερο μέρος του να βρίσκεται στη Γαλλία. Στον κυκλικό δακτύλιο τοποθετούνται υπεραγώγιμοι μαγνήτες, καθώς και μια σειρά από επιταχυντικές δομές που βοηθούν στην αύξηση της ενέργειας των σωματιδίων κατά μήκος της διαδρομής[22].

Στο εσωτερικό του επιταχυντή, δύο δέσμες σωματιδίων υψηλής ενέργειας ταξιδεύουν με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός πριν συγκρουστούν.

Πριν οι δέσμες πρωτονίων εισέλθουν στον LHC διέρχονται διαδοχικά από μία σειρά μικρότερων επιταχυντικών διατάξεων οι οποίες αυξάνουν διαδοχικά την ενέργειά τους μέχρι τα 450 GeV και η ταχύτητά τους να φτάσει στο 99.9998% της ταχύτητας του φωτός. Η σχέση μεταξύ της κινητικής ενέργειας ενός πρωτονίου και της ταχύτητάς του στα διάφορα στάδια επιτάχυνσης από τις προ-επιταχυντικές διατάξεις του CERN φαίνεται στην εικόνα 3.3 [21].

Συνοπτικά τα στάδια επιτάχυνσης είναι:

1. Ξεκινώντας από το Linac 4, τα πρωτόνια επιταχύνονται σε κινητική ενέργεια 160 MeV, επιτυγχάνοντας ταχύτητες περίπου 52% της ταχύτητας του φωτός (c).
2. Στη συνέχεια, τα πρωτόνια εισέρχονται στον PS Booster, όπου η κινητική τους ενέργεια αυξάνεται στα 2 GeV, με αποτέλεσμα ταχύτητες της τάξης του 94,8% της ταχύτητας του φωτός.
3. Η επιτάχυνση συνεχίζεται στο Synchrotron Πρωτονίων (PS), όπου η κινητική ενέργεια φτάνει τα 25 GeV και τα πρωτόνια κινούνται με ταχύτητα 99,93% της ταχύτητας του φωτός.
4. Περαιτέρω επιτάχυνση λαμβάνει χώρα στο Super Proton Synchrotron (SPS), αυξάνοντας τα πρωτόνια στα 450 GeV και σε ταχύτητα 99,9998% της ταχύτητας του φωτός.
5. Τέλος, στον LHC, τα πρωτόνια φτάνουν την ενέργεια σχεδιασμού τους των 7 TeV, επιτυγχάνοντας μια αξιοσημείωτη ταχύτητα 99,9999991% της ταχύτητας του φωτός. Η μάζα ηρεμίας ενός πρωτονίου είναι 0.938 GeV/c², η οποία χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για αυτούς τους υπολογισμούς.

Kinetic energy of a proton (K)	Speed (%c)	Accelerator
160 MeV	52	Linac 4
2 GeV	94.8	PS Booster
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV (design energy)	99.9999991	LHC
Relationship between kinetic energy and speed of a proton in the CERN machines. The rest mass of the proton is 0.938 GeV/c ²		

Εικόνα 3.3: Πίνακας με την κινητική ενέργεια και την αντίστοιχη ταχύτητα (ως ποσοστό της ταχύτητας του φωτός) που επιτυγχάνουν οι επιταχυντικές διατάξεις του LHC [21].

Οι δέσμες ταξιδεύουν προς αντίθετες κατευθύνσεις σε ξεχωριστούς σωλήνες δέσμης - δύο σωλήνες που διατηρούνται σε υπερυψηλό κενό, το οποίο είναι της τάξης 10^{-13} atm γιατί θέλουμε να αποφύγουμε συγκρούσεις των επιταχυνόμενων σωματιδίων με τα μόρια του αέρα, το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των χαρακτηριστικών της δέσμης που απαιτούνται από τις προδιαγραφές του πειράματος. Οι δέσμες οδηγούνται γύρω από τον δακτύλιο του επιταχυντή από ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο που διατηρείται από υπεραγωγίσιμους ηλεκτρομαγνήτες. Οι ηλεκτρομαγνήτες είναι κατασκευασμένοι από πηνία ειδικού ηλεκτρικού καλωδίου που λειτουργεί σε υπεραγώγιμη κατάσταση. Αυτό απαιτεί την ψύξη των μαγνητών στους -271.3°C - θερμοκρασία που είναι χαμηλότερη από οτιδήποτε ξέρουμε στο διάστημα. Για το λόγο αυτό, μεγάλο μέρος του επιταχυντή είναι συνδεδεμένο με ένα σύστημα διανομής υγρού ηλίου, το οποίο ψύχει τους μαγνήτες[22].

3.2 Φωτεινότητα στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων

Στον LHC, τα πρωτόνια κινούνται γύρω από τον δακτύλιο σε καθορισμένες ομάδες (bunches). Η κατανομή αυτών των ομάδων πρωτονίων προκύπτει από τη μέθοδο επιτάχυνσης με ραδιοσυχνότητες (RF). Η επιτάχυνση των πρωτονίων συμβαίνει μόνο όταν το RF πεδίο έχει τη σωστή κατεύθυνση καθώς τα σωματίδια διέρχονται από μια κοιλότητα επιτάχυνσης, κάτι που συμβαίνει σε συγκεκριμένες στιγμές ενός κύκλου RF. Στον LHC, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε δέσμη πρωτονίων αποτελείται από 2808 ομάδες, με κάθε ομάδα να περιλαμβάνει περίπου 10^{11} πρωτόνια[27].

Βασική παράμετρος ενός επιταχυντή είναι η φωτεινότητα - ο αριθμός των συγκρούσεων ανά μονάδα επιφάνειας ανά δευτερόλεπτο σε ένα δεδομένο σημείο αλληλεπίδρασης- συνήθως εκφράζεται σε μονάδες $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ και συνδέει το ρυθμό παραγωγής γεγονότων R και την ενεργό διατομή:

$$R = L \times \sigma$$

Η παράμετρος, φωτεινότητα, μπορεί να υπολογιστεί από τη γνώση των παραμέτρων των συγκρουόμενων δεσμών. Συγκεκριμένα, τα σωματίδια σε έναν επιταχυντή ομαδοποιούνται σε δέσμες που συγκρούονται σε ένα ή περισσότερα σημεία αλληλεπίδρασης, όπου βρίσκονται οι ανιχνευτές του LHC[28]. Αν υποθέσουμε ότι οι δέσμες συγκρούονται μετωπικά και ότι ο αριθμός των σωματιδίων στις συγκρουόμενες δέσμες είναι n_1 και n_2 , με f τη συχνότητα περιστροφής, n_b τον αριθμό των δεσμών που συγκρούονται στο σημείο αλληλεπίδρασης και Σ_x και Σ_y το οριζόντιο και κατακόρυφο προφίλ της δέσμης αντίστοιχα, η στιγμιαία φωτεινότητα υπολογίζεται ως εξής [29]:

$$L = f \frac{n_1 n_2 n_b}{2\pi \Sigma_x \Sigma_y}$$

Η ολοκληρωμένη φωτεινότητα, από την άλλη πλευρά, εξετάζει τον συνολικό αριθμό των γεγονότων κατά τη διάρκεια μιας περιόδου λήψης δεδομένων. Δηλαδή, συσχετίζει τον συνολικό αριθμό των παραγόμενων γεγονότων με την ενεργό διατομή, μέσω της σχέσης:

$$N_{total} = \sigma \int L dt$$

Οι προβλεπόμενες τιμές φωτεινότητας για τον LHC καταγράφονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 3.4. Συγκεκριμένα, οι αναμενόμενες φωτεινότητες είναι $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ για συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων[24]. Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον στην προτελευταία σειρά του πίνακα παρατηρώντας τη φωτεινότητα του επιταχυντή LHC. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η φωτεινότητα τη χρονιά 2010 είναι 2.07×10^{32} , τη χρονιά 2011 είναι 3.65×10^{33} και τη χρονιά 2012 είναι 7.73×10^{33} , όλες οι φωτεινότητες μετρώνται σε μονάδες μέτρησης $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτεινότητα στον LHC δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων, αλλά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της φθοράς της δέσμης. Η μείωση αυτή είναι περίπου κατά έναν παράγοντα 2 εντός δέκα ωρών, όπου μετά από αυτό το διάστημα λαμβάνει χώρα μια νέα έγχυση στον LHC.

Parameter	2010	2011	2012	Nominal
$\sqrt{s}$ [TeV]	7	7	8	14
N_b				1.15×10^{11}
n_b	368	1380	1380	2808
Δt [ns]	150	50	50	25
ϵ_n [$\mu\text{m rad}$]				3.75
β^* [m]	3.5	1.0	0.60	0.55
L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	2.07×10^{32}	3.65×10^{33}	7.73×10^{33}	10^{34}
Int. lumi. per year [fb^{-1}]	0.0481	5.61	21.7	80

Εικόνα 3.4: Παράμετροι των συγκρούσεων πρωτονίου-πρωτονίου του LHC για τις περιόδους λήψης δεδομένων: 2010, 2011 και 2012, και οι τιμές σχεδιασμού. Οι παρατιθέμενες παράμετροι είναι: η ενέργεια του κέντρου μάζας $\sqrt{s}$, ο αριθμός πρωτονίων ανά δέσμη n_b , ο αριθμός δεσμών ανά δέσμη N_b , η χρονική απόσταση δέσμης προς δέσμη Δt , η κανονικοποιημένη εγκάρσια εκπομπή δέσμης ϵ_n , η στιγμιαία φωτεινότητα κορυφής L και η ολοκληρωμένη φωτεινότητα ανά έτος. Κάθε τιμή που αναφέρεται αντιστοιχεί στην καλύτερη απόδοση που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια του έτους [35-38].

3.3 Εκκίνηση και χρονοδιάγραμμα λειτουργίας του LHC

Οι πρώτες δέσμες κυκλοφόρησαν στο LHC τον Σεπτέμβριο του 2008. Εννιά ημέρες αργότερα, μια βλάβη που προκλήθηκε από μια ελαττωματική ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ δύο μαγνητών ανάγκασε την αναβολή της λειτουργίας για περίπου ένα χρόνο. Μετά από τις απαραίτητες επισκευές και ενίσχυση των δομών, ο LHC άρχισε συγκρούσεις πρωτονίων προς το τέλος του 2009. Οι πρώτες αυτές συγκρούσεις πραγματοποιήθηκαν σε ενέργεια κέντρου μάζας $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$, και αργότερα σε ενέργεια κέντρου μάζας $\sqrt{s} = 2.36 \text{ TeV}$. Μετά την περίοδο αναστολής λειτουργίας λόγω του χειμερινού διαλείμματος, ο LHC επανεκκινήθηκε τον Μάρτιο του 2010 και αυξήθηκε γρήγορα η ενέργεια συγκρούσεων στο σύστημα κέντρου μάζας 7 TeV, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη φωτεινότητα περίπου 50 pb^{-1} ανά πείραμα προς το τέλος του έτους. Αμέσως μετά από αυτήν την περίοδο συγκρούσεων πρωτονίου-πρωτονίου, στον LHC πραγματοποιήθηκαν συγκρούσεις βαρέων ιόντων για μερικές εβδομάδες[39-41].

Το 2011, στον LHC συνεχίστηκαν οι συγκρούσεις πρωτονίου-πρωτονίου σε ενέργεια κέντρου μάζας 7 TeV, με στιγμιαίες φωτεινότητες $3.65 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, που επέτρεψαν μια συνολική ολοκληρωμένη φωτεινότητα περίπου 6 fb^{-1} προς το τέλος του έτους. Ακολούθησε περίοδος συγκρούσεων βαρέων ιόντων για λίγες εβδομάδες[42].

Κατά τη διάρκεια του 2012, η ενέργεια κέντρου μάζας αυξήθηκε στα 8 TeV, με τον ATLAS να καταγράφει συνολικά 21.7 fb^{-1} δεδομένων και να επιτυγχάνει στιγμιαία φωτεινότητα $7.73 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Το 2012, επιτεύχθηκε ένα σημαντικό ορόσημο με την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs[43]. Η ανακάλυψη αυτή είχε βαθύ αντίκτυπο στις επιστημονικές προσπάθειες του LHC.

Στις αρχές του 2013, πραγματοποιήθηκαν λίγες εβδομάδες συγκρούσεων βαρέων ιόντων, ενώ ξεκίνησε μια μακρά περίοδος διακοπής λειτουργίας, η οποία είχε διάρκεια περίπου δύο χρόνια. Κατά τη χρονική περίοδο αυτή ο LHC υποβλήθηκε σε αναβάθμιση, γνωστή ως Long Shutdown 1 (LS1). Η αναβάθμιση αυτή είχε ως στόχο να επιτρέψει συγκρούσεις σε υψηλότερη ενέργεια στο κέντρο μάζας, να βελτιώσει τους ανιχνευτές των πειραμάτων αλλά και τους προ-επιταχυντές. Μετά το LS1, ο LHC επανεκκίνησε στις 5 Απριλίου 2015 για τη δεύτερη χρονική περίοδο λειτουργίας. Παρά τις αναβαθμίσεις, η ενέργεια λειτούργησε σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα από τα προγραμματισμένα, φτάνοντας τα 6.5 TeV ανά δέσμη (ενέργεια σύγκρουσης 13 TeV) μέχρι το 2018[44-45].

Η μακρά διακοπή λειτουργίας 2 (LS2) ξεκίνησε στις 10 Δεκεμβρίου 2018 και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2022. Ο LHC τέθηκε και πάλι σε λειτουργία στις 22 Απριλίου 2022, για την τρίτη επιχειρησιακή του λειτουργία (Run-3). Αυτή η λειτουργία αναμένεται να συνεχιστεί μέχρι το 2026, διαθέτοντας υψηλότερη ενέργεια δέσμης 6.8 TeV (ενέργεια σύγκρουσης στο κέντρο μάζας 13.6 TeV) και αναμενόμενη υψηλότερη φωτεινότητα[46-48].

Κεφάλαιο 4 Το πείραμα ATLAS

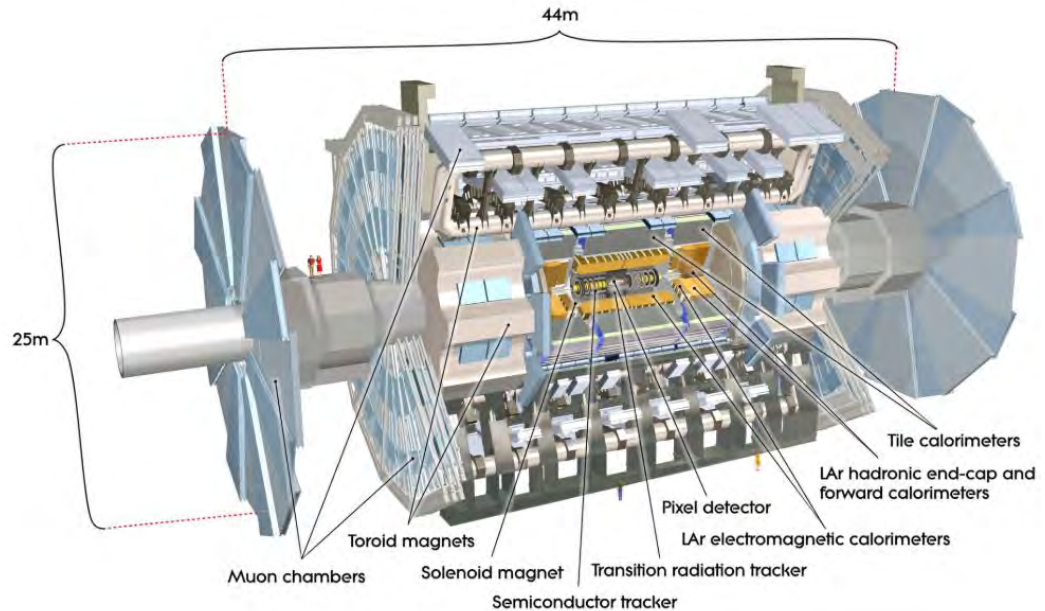
Ο ανιχνευτής ATLAS είναι ένα εντυπωσιακό επιστημονικό εργαλείο που βοηθά στην κατανόηση των βασικών θεμελίων του σύμπαντος, εξερευνώντας τα πιο μικρά στοιχεία της ύπαρξής μας και την κατανόηση της φύσης της ύλης και της ενέργειας.

Το ATLAS είναι ένα από τα δύο κύρια ανιχνευτικά συστήματα στον LHC. Έχει ως κύριο στόχο τη μελέτη φαινομένων σε υψηλές ενέργειες, όπως την ύπαρξη και τις ιδιότητες του μποζονίου Higgs, μετρήσεις ακριβείας στα πλαίσια του Καθιερωμένου Προτύπου, έρευνα για την ύπαρξη επιπλέον διαστάσεων, όπως προβλέπονται από θεωρητικά μοντέλα που προσπαθούν να ενοποιήσουν την κβαντική θεωρία με την βαρυτική αλληλεπίδραση, και υποθετικών σωματιδίων που πιθανόν να αποτελούν συστατικά της σκοτεινής ύλης[21].

Δέσμες σωματιδίων από τον LHC συγκρούονται στο κέντρο του ανιχνευτή ATLAS δημιουργώντας θραύσματα σύγκρουσης με τη μορφή νέων σωματιδίων, τα οποία εκτοξεύονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο ανιχνευτής αποτελείται από τρία βασικά υποσυστήματα που καταγράφουν τις τροχιές, την ορμή και την ενέργεια των σωματιδίων. Ένα τεράστιο μαγνητικό σύστημα καμπυλώνει τις πορείες των φορτισμένων σωματιδίων για να μπορέσουν να μετρηθούν οι ορμές τους[22].

Οι αλληλεπιδράσεις στον ανιχνευτή ATLAS παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Για να διαχειριστεί αυτά τα δεδομένα, χρησιμοποιείται ένα προηγμένο σύστημα "trigger" για να επιλέξει ποια γεγονότα θα καταγραφούν. Σύνθετα συστήματα απόκτησης δεδομένων και υπολογιστικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των καταγεγραμμένων συγκρούσεων.

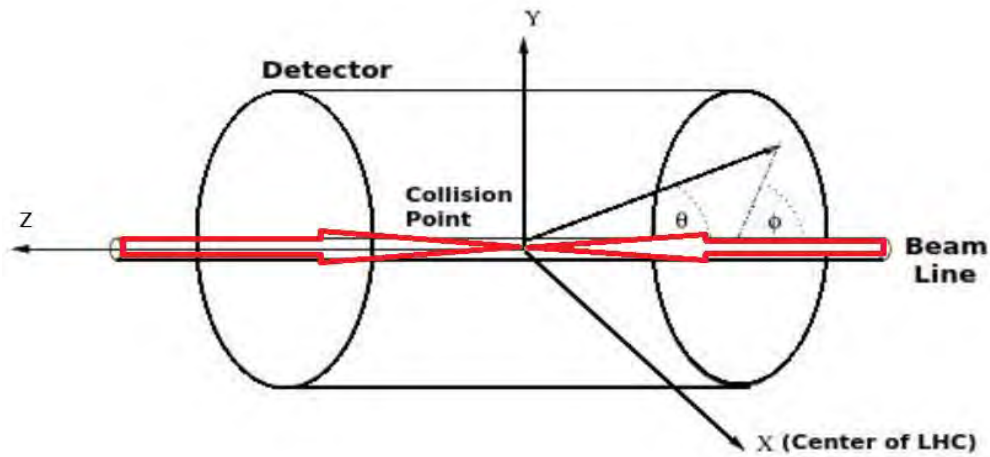
Με διαστάσεις 46 μέτρα μήκος, 25 μέτρα ύψος και 25 μέτρα πλάτος, ο ανιχνευτής ATLAS είναι ο μεγαλύτερος ανιχνευτής σωματιδίων που έχει κατασκευαστεί ποτέ. Είναι εγκατεστημένος 100 μέτρα κάτω από το έδαφος κοντά στην κύρια τοποθεσία του CERN, κοντά στο χωριό Meyrin της Ελβετίας[49].



Εικόνα 4.1: Μια τρισδιάστατη πλευρική άποψη του ανιχνευτή ATLAS και των υποσυστημάτων του[50].

4.1 Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων

Ο ανιχνευτής ATLAS έχει κυλινδρικό σχήμα και χρησιμοποιεί ένα δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων. Το κέντρο του ανιχνευτή αντιστοιχεί στο σημείο αλληλεπίδρασης και ορίζεται ως η αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η κατεύθυνση της δέσμης ορίζει τον άξονα z και το επίπεδο x - y είναι κάθετο στην κατεύθυνση της δέσμης. Ο άξονας x δείχνει προς το κέντρο του δακτυλίου του LHC και ο άξονας y προς τα πάνω στην κατακόρυφη κατεύθυνση.



Εικόνα 4.2: Σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από το πείραμα ATLAS στον LHC[51].

Συχνά χρησιμοποιείται ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων, οριζόμενο από το ακτινικό διάνυσμα R , την αζιμουθιακή γωνία ϕ , και την πολική γωνία θ . Η γωνία ϕ μετριέται από τον άξονα x και κυμαίνεται από $-\pi$ έως π , ενώ η θ μεταβάλλεται από 0 έως π , και το R ξεκινά από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η πολική γωνία μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της pseudorapidity (ψευδοωκότητας), η οποία ορίζεται από την εξίσωση[52]:

$$\eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$

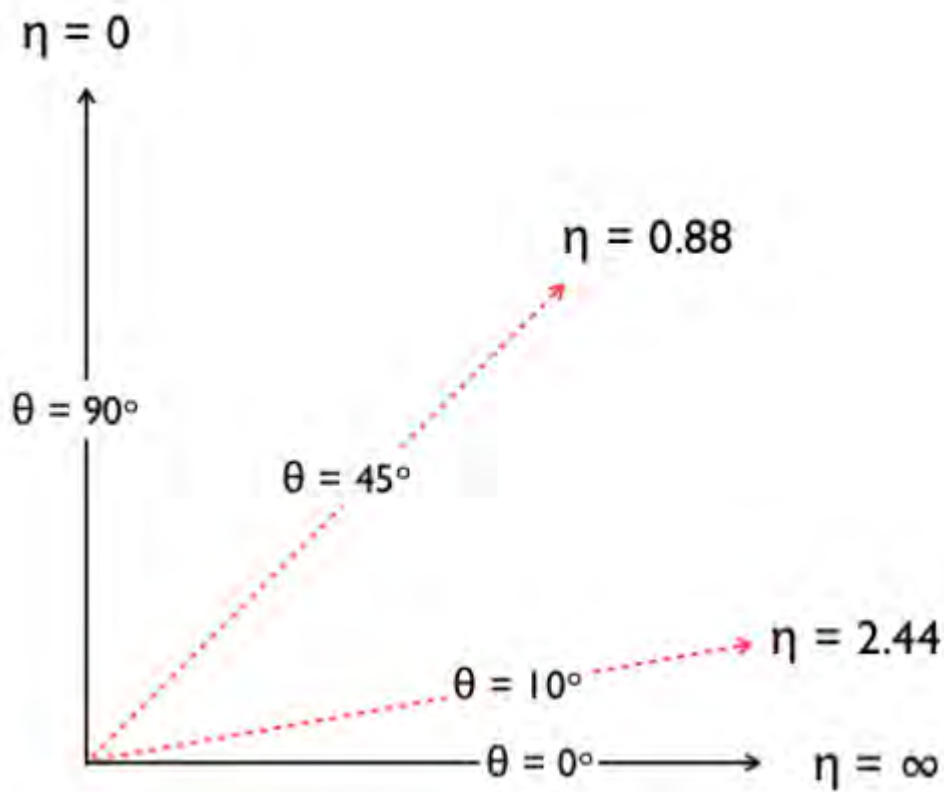
Η pseudorapidity προσφέρει ανεξαρτησία από τους μετασχηματισμούς της δέσμης κατά μήκος του άξονα z . Αυτή η ανεξαρτησία είναι χρήσιμη για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ σωματιδίων στο επίπεδο ϕ - η . Στον ανιχνευτή ATLAS, η μεταξύ των σωματιδίων απόσταση στο επίπεδο ϕ - η ορίζεται από την εξίσωση

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$$

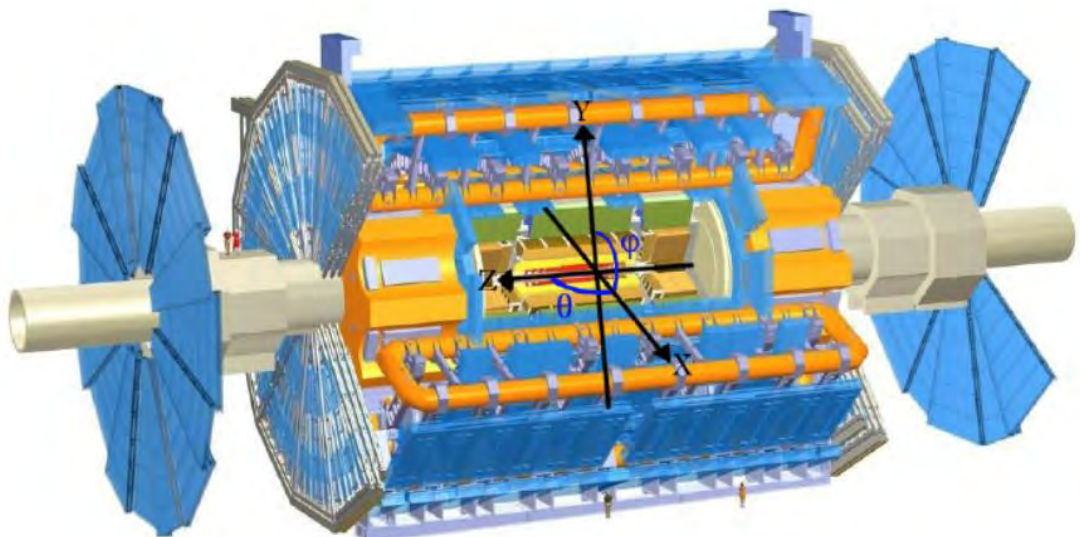
όπου $\Delta\eta$ και $\Delta\phi$ είναι οι αντίστοιχες αλλαγές στη pseudorapidity και στη γωνία ϕ αντίστοιχα[52].

Ο όρος «εγκάρσια» αναφέρεται για τις μεταβλητές που είναι στο επίπεδο x - y που είναι κάθετο στη δέσμη. Για παράδειγμα, η εγκάρσια ορμή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$p_T = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2}$$



Εικόνα 4.3: Αντιστοιχία μεταξύ της pseudorapidity η και της πολικής γωνίας θ .



Εικόνα 4.4: Ο ανιχνευτής ATLAS και ο ορισμός του ορθογώνιου συστήματος καρτεσιανών συντεταγμένων[53].

4.3 Οι υπο-ανιχνευτές του πειράματος ATLAS

4.3.1. Εσωτερικός Ανιχνευτής (Inner Detector – ID)

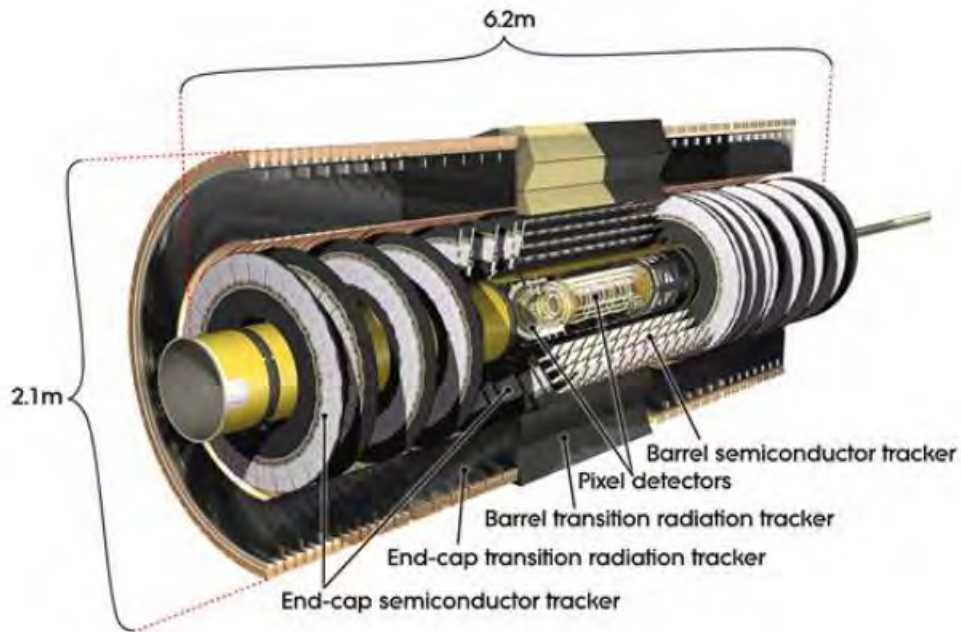
Ο Εσωτερικός Ανιχνευτής, ο οποίος είναι τοποθετημένος μόλις λίγα εκατοστά μακριά από τον άξονα της δέσμης πρωτονίων και εκτείνεται σε ακτίνα 1.2 μέτρων, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση φορτισμένων σωματιδίων εντός του ανιχνευτή ATLAS. Καλύπτοντας ένα μήκος 6.2 μέτρων κατά μήκος του σωλήνα της δέσμης, λειτουργεί ανιχνεύοντας τις αλληλεπιδράσεις αυτών των σωματιδίων με το υλικό σε διακριτά σημεία, προσφέροντας έτσι λεπτομερείς γνώσεις σχετικά με τα είδη σωματιδίων και την ορμή τους[54].

Αυτό το συμπαγές και εξαιρετικά ευαίσθητο σύστημα περιλαμβάνει τρία διακριτά συστήματα αισθητήρων βυθισμένα σε μαγνητικό πεδίο έντασης 2 Tesla που παράγεται από ένα κεντρικό σωληνοειδές και είναι παράλληλο προς τον άξονα της δέσμης. Εκμεταλλευόμενος την επίδραση του μαγνητικού πεδίου στα φορτισμένα σωματίδια, ο Εσωτερικός Ανιχνευτής μπορεί να διακρίνει το φορτίο και την ορμή τους με βάση την καμπυλότητα των τροχιών τους. Επιπλέον, αξιοποιεί τα σημεία εκκίνησης αυτών των τροχιών για να συλλέξει πολύτιμες πληροφορίες, όπως η αναγνώριση σωματιδίων που προέρχονται από τη διάσπαση αδρονίων που περιέχουν ένα bottom-κουάρκ (κάτω quark). Τα bottom κουάρκ (b-quarks) διαφέρουν από άλλα κουάρκ λόγω του μεγάλου τους βάρους και της μοναδικής τους συμπεριφοράς στη διάσπαση και την αλληλεπίδραση με άλλα σωματίδια. Είναι το δεύτερο βαρύτερο γνωστό κουάρκ, με μάζα περίπου $4.18 \text{ GeV}/c^2$, φορτίο $-1/3$ και spin $1/2$. Τα b-quarks συνήθως σχηματίζουν σωματίδια, τα οποία διασπώνται κυρίως σε charm κουάρκ και σπανιότερα σε up κουάρκ, συνοδευόμενα από φορτισμένα λεπτόνια όπως ηλεκτρόνια, μύονια ή ταυ λεπτόνια, και τα αντίστοιχα νετρίνα τους[55].

Ο Εσωτερικός Ανιχνευτής παρακολουθεί σχολαστικά φορτισμένα σωματίδια εντός της περιοχής ψευδοωκότητας $|\eta| < 2.5$, παρέχοντας πλήρη αζιμουθιακή κάλυψη. Αποτελείται από τρεις επιμέρους ανιχνευτές: The Silicon Pixel Detector (Pixel), the Silicon micro-strip Detector (SCT), και το straw-tube transition-radiation detector (TRT).

Αυτό το σύστημα βοηθάει να εντοπιστούν και να μελετηθούν σωματίδια ή φαινόμενα που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ή συμπεριφορές, όπως η κίνησή τους και η ενέργειά

τους. Επιπλέον, βοηθάει στην αναγνώριση συγκεκριμένων ειδών σωματιδίων σε συγκεκριμένες περιοχές και ενέργειες. Για να επιτύχει αυτά, πρέπει να αντέχει στην ακτινοβολία. [53].



Εικόνα 4.5: Αποκομμένη όψη του εσωτερικού ανιχνευτή ATLAS[56].

4.3.2. Καλορίμετρα (Calorimeter)

Το σύστημα καλορίμετρων του ATLAS έχει ως κύριο στόχο να παρέχει ακριβείς μετρήσεις των ενεργειών των σωματιδίων, σταματώντας τα καθώς διέρχονται από τον ανιχνευτή. Τα καλορίμετρα του ATLAS βρίσκονται γύρω από τον Εσωτερικό Ανιχνευτή και είναι οργανωμένα σε δύο περιοχές: την περιοχή του κυλίνδρου και την περιοχή της βάσης του κυλινδρικού ανιχνευτή (end – caps)[57].

Το Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο σχεδιάστηκε για να σταματά σωματίδια που παράγουν ηλεκτρομαγνητικές δέσμες, όπως ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια, και να παρέχει πληροφορίες για διάφορες ιδιότητές τους. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν την ενέργεια των σωματιδίων, την ακριβή θέση όπου τα σωματίδια εισέρχονται και αλληλεπιδρούν με το καλορίμετρο, τον χρόνο άφιξής τους, και την κατανομή της ενέργειας,

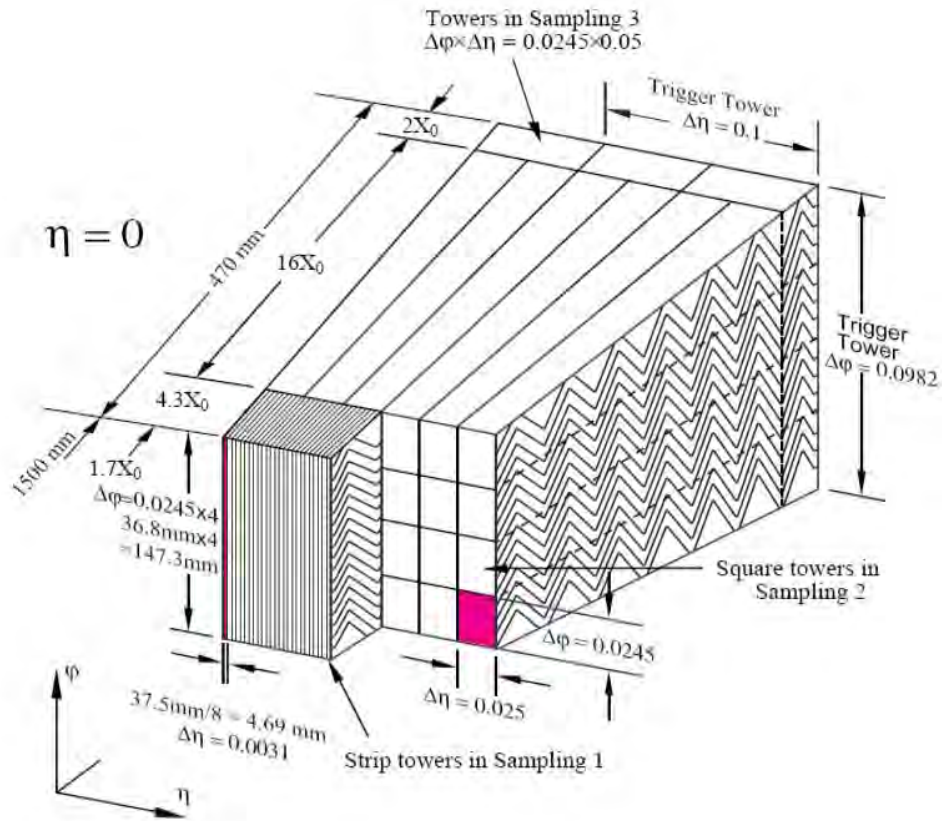
η οποία παρέχει στοιχεία για τη φύση του σωματιδίου και την αλληλεπίδρασή του. Το Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο έχει μια γωνιακή κάλυψη $|\eta| < 1.475$ στο μέρος του κυλίνδρου και $|\eta| > 1.375$ στις δύο βάσεις του κυλινδρικού ανιχνευτή. Το υλικό ανίχνευσης του Ηλεκτρομαγνητικού Καλοριμέτρου είναι υγρό άργο με απορροφητικές πλάκες από μόλυβδο σε όλο το εύρος του. Τα δευτερεύοντα σωματίδια χαμηλής ενέργειας που επιβιώνουν από τους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς, κυρίως ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια, ιονίζουν το υγρό άργο. Το σήμα που προκύπτει ενισχύεται, ψηφιοποιείται και καταγράφεται. Το υγρό αργό εμφανίζει εξαιρετική αντοχή στην ακτινοβολία και παρέχει επίσης μια λεπτή γραμμική απόκριση[58].

Τα εισερχόμενα σωματίδια διασχίζουν τις μολύβδινες πλάκες και δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς (showers) παράγοντας δευτερεύοντα σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας. Το βάθος και το πάχος του υλικού του Ηλεκτρομαγνητικού καλοριμέτρου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προσεκτικά προκειμένου να αποτραπεί η ακτινοβολία από τους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς από το να φτάσει στο σύστημα των μιονίων.

Το διερχόμενο μέσο αλληλεπιδρά με τα εισερχόμενα σωματίδια μειώνοντας την αρχική τους ενέργεια κατά έναν παράγοντα $1/e$ για κάθε μήκος ακτινοβολίας X_0 . Το πάχος του μολύβδου στο καλοριμέτρο είναι περίπου $22 X_0$ στο μέρος του κυλίνδρου και περίπου $24 X_0$ στις βάσεις του κυλινδρικού ανιχνευτή. Με αυτό το βάθος, το ΗΜ καλοριμέτρο μπορεί να συγκεντρώσει σχεδόν όλους τους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς που προκαλούνται από σωματίδια με ενέργειες χαμηλότερες από 1 TeV . Πράγματι, το πάχος του μολύβδου βελτιστοποιείται ως συνάρτηση της ψευδοωκότητας (η), έτσι λαμβάνει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές τιμές του η [58].

Τα δευτερεύοντα χαμηλής ενέργειας σωματίδια που επιβιώνουν από τους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς, κυρίως ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια, ιονίζουν το υγρό αργό. Τα ηλεκτρόνια μετά τον ιονισμό συλλέγονται σε ηλεκτρόδια από χαλκό, παράγοντας ένα ρεύμα που μετριέται. Η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου είναι ανάλογη με τον αριθμό των σωματιδίων που ιονίζουν το υγρό Αργό, και έτσι είναι και το μετρημένο φορτίο και το μέγιστο ρεύμα. Το σήμα που προκύπτει από το ηλεκτρικό ρεύμα ενισχύεται, ψηφιοποιείται και καταγράφεται. Στην γωνιακή περιοχή που έχει την ίδια κάλυψη με τον Εσωτερικό

Ανιχνευτή ($|\eta| < 2,5$), το ΗΜ καλορίμετρο είναι χωρισμένο σε τρεις ενότητες ή στρώματα ανάλογα με τον σκοπό του.



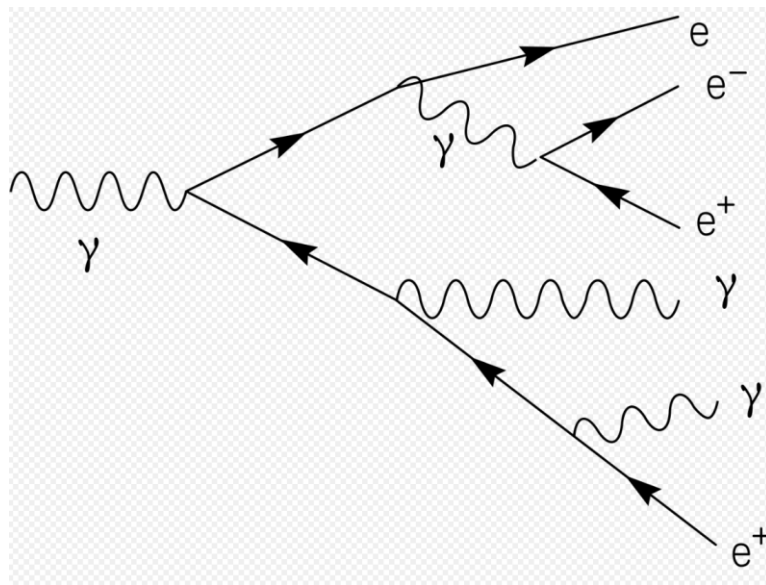
Εικόνα 4.6: Σκίτσο μιας μονάδας ηλεκτρομαγνητικού θερμιδόμετρου σε η και ϕ για κάθε ένα από τα τρία στρώματα[58].

Το Αδρονικό Καλορίμετρο αποτελεί κρίσιμο εξάρτημα των πειραμάτων σωματιδιακής φυσικής, ιδίως σε πειράματα υψηλής ενέργειας σε επιταχυντές, όπως αυτά που διεξάγονται στον LHC. Η κύρια λειτουργία του είναι να μετρά την ενέργεια των αδρονίων, τα οποία είναι σύνθετα σωματίδια που αποτελούνται από κουάρκ που συνδέονται μεταξύ τους με την ισχυρή δύναμη. Τα αδρόνια περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, πρωτόνια και νετρόνια.

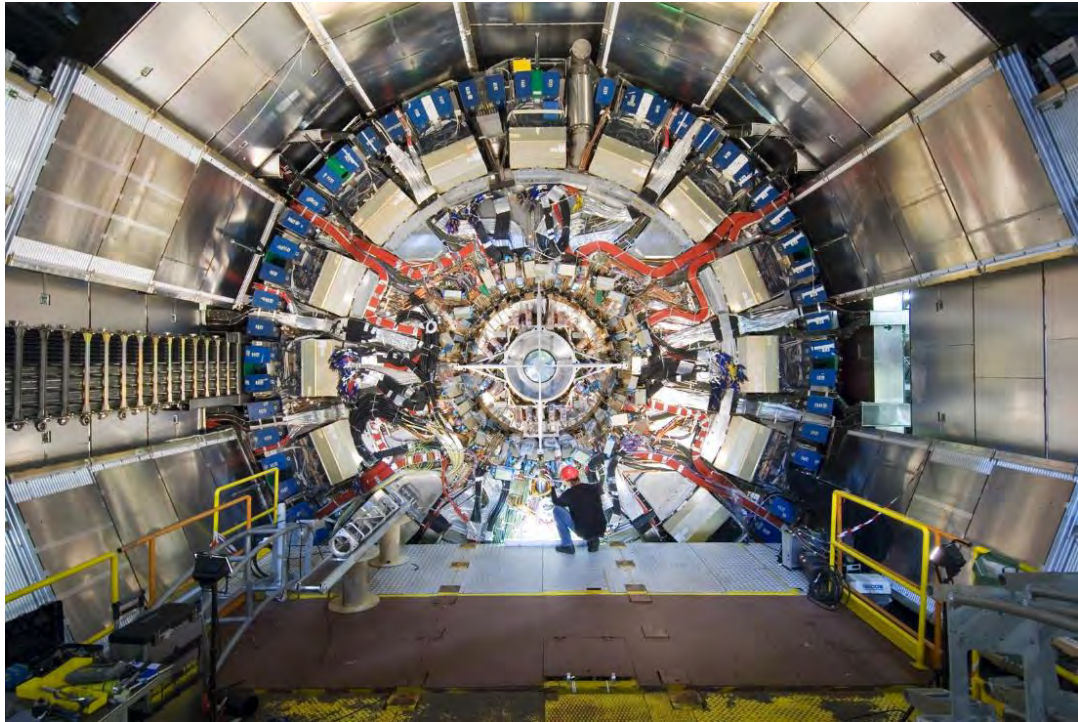
Το Αδρονικό Καλορίμετρο αποτελείται συνήθως από στρώματα πυκνού υλικού που διαδέχονται ευαίσθητοι ανιχνευτές. Όταν ένα αδρόνιο αλληλεπιδρά με το υλικό, υφίσταται μια διαδικασία που ονομάζεται αδρονικός καταγισμός, όπου παράγει δευτερογενή σωματίδια μέσω αλληλεπιδράσεων με τους ατομικούς πυρήνες του υλικού. Αυτά τα

δευτερογενή σωματίδια εναποθέτουν στη συνέχεια την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, επιτρέποντας στο καλορίμετρο να μετρήσει τη συνολική ενέργεια του αρχικού αδρονίου[59].

Το Αδρονικό Καλορίμετρο αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετεί, τη θέση του στο χώρο του πειράματος και την τεχνολογία του : το Tile Calorimeter, το Forward Calorimeter και το Hadronic End-Cap Calorimeter[58].



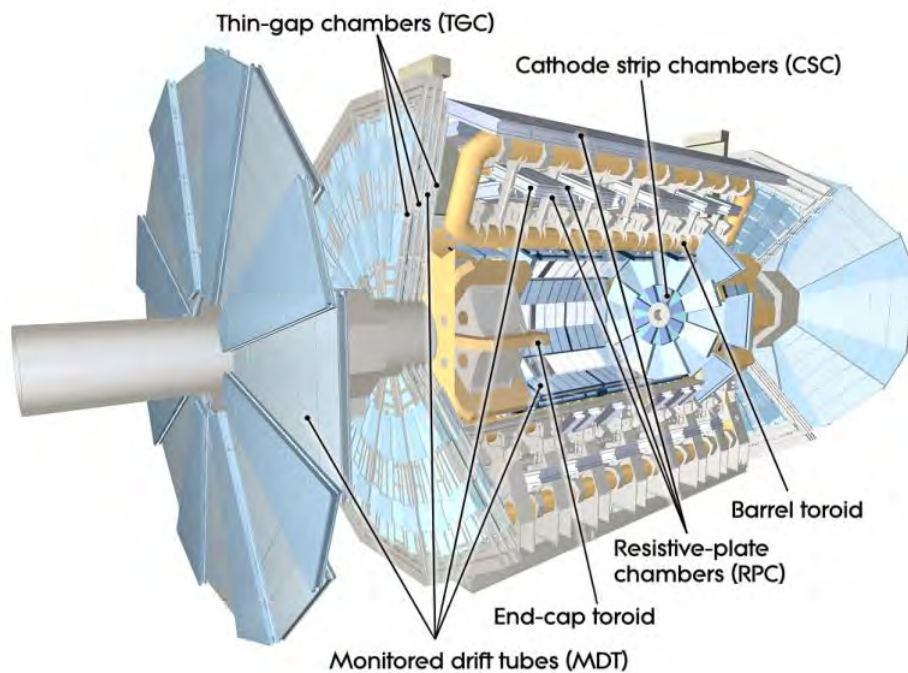
Εικόνα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού καταγισμού[60].



Εικόνα 4.8: Το πρώτο εσωτερικό κάλυμμα του ανιχνευτή ATLAS μετά την πλήρη τοποθέτησή του στον Liquid Argon Cryostat[49].

4.3.3 ΤΟ ΜΙΟΝΙΚΟ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΟ

Το Μιονικό Φασματόμετρο αποτελεί το εξωτερικό σύστημα του ανιχνευτή ATLAS και περιβάλλει τα καλορίμετρα. Το Μιονικό φασματόμετρο σχεδιάστηκε για να μετρά τις τροχιές, τις ορμές και το φορτίο των μιονίων. Αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα, όπως οι Monitored Drift Tubes (MDTs), οι Cathode Strip Chambers (CSCs), οι Resistive Plate Chambers (RPCs) και οι Thin Gap Chambers (TGCs)[61].



Εικόνα 4.9: Αποκομμένη τρισδιάστατη διάταξη του Φασματομέτρου Μιονίων ATLAS με την επισήμανση των υποσυστημάτων του [56].

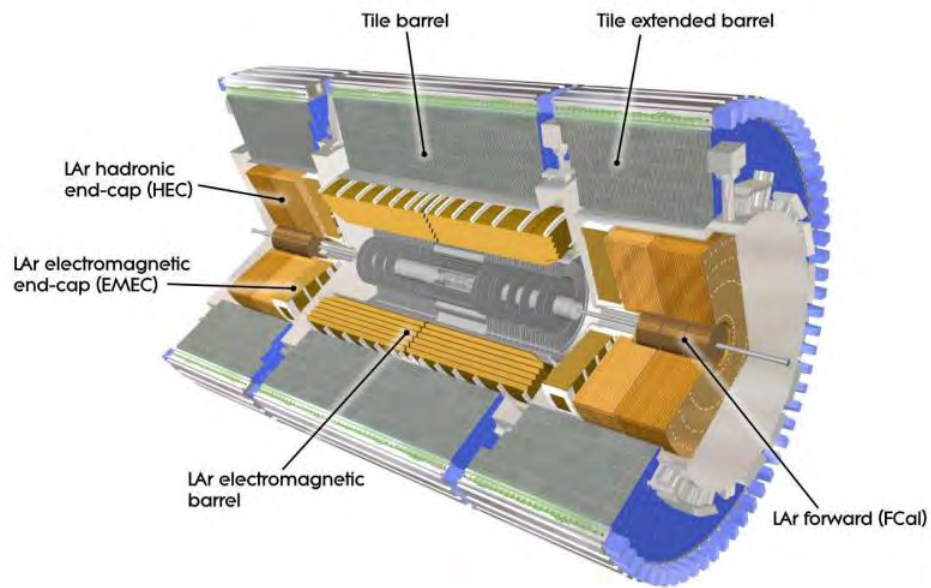
Το Μιονικό Φασματόμετρο επιτρέπει τη μέτρηση της ορμής των μιονίων και την αναγνώριση τους στην περιοχή $|\eta| < 2.7$ και έχει επίσης δυνατότητες ενεργοποίησης στην περιοχή $|\eta| < 2.4$, αυτό σημαίνει ότι το φασματόμετρο μπορεί να ανιχνεύει και να σηματοδοτεί την παρουσία μιονίων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την αποδοχή ή την απόρριψη γεγονότων για περαιτέρω ανάλυση. Στην περιοχή $|\eta| < 2.4$, το φασματόμετρο μπορεί να συμβάλει στο σύστημα trigger, βοηθώντας στη λήψη αποφάσεων σχετικά με το ποιες συγκρούσεις πρέπει να καταγραφούν και να αναλυθούν, βασιζόμενο στην ανίχνευση μιονίων. Η δυνατότητα ενεργοποίησης στην περιοχή $|\eta| < 2.4$ σημαίνει ότι το Μιονικό Φασματόμετρο μπορεί να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει την καταγραφή δεδομένων για συγκεκριμένες συνθήκες. Με άλλα λόγια, μπορεί να αποφασίσει ποια δεδομένα θα καταγραφούν ή ποια συμβάντα θα αγνοηθούν, βασιζόμενο στις πληροφορίες που λαμβάνει για την παρουσία μιονίων σε συγκεκριμένες περιοχές του ανιχνευτή. Τα μέτρα ορμής στην κλίμακα των GeV θεωρούνται αξιόπιστα, (οι μετρήσεις ορμής σε αυτή την κλίμακα είναι αξιόπιστες, δηλαδή έχουν μικρή αβεβαιότητα ή σφάλμα) ενώ οι αναλύσεις δείχνουν σχετική διακριτική ικανότητα στην μέτρηση της ορμής(resolution) περίπου 3% στα περίπου 200 GeV. Επίσης, το Μιονικό Φασματόμετρο μπορεί να μετρήσει την ορμή ενός μιονίου χωρίς να

εξαρτάται από τις πληροφορίες που παρέχονται από τον εσωτερικό ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής τροχιών παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαδρομή του μιονίου μέσα στον ανιχνευτή. Συνδυάζοντας αυτές τις πληροφορίες με τις μετρήσεις ορμής που πραγματοποιούνται από το Μιονικό Φασματόμετρο, επιτυγχάνεται μία πλήρης ανακατασκευή της τροχιάς του μιονίου, χωρίς την ανάγκη για πρόσθετη εξάρτηση από τον ανιχνευτή τροχιών (εσωτερικός ανιχνευτής). Αυτό επιτρέπει την αξιόπιστη και ακριβή μέτρηση της ορμής των μιονίων από το Μιονικό Φασματόμετρο, ενώ επιτυγχάνεται και η αποφυγή προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν από τυχόν αστοχίες ή ανεπάρκειες του εσωτερικού ανιχνευτή[58].

Οι ανιχνευτές, όπως οι MDTs και οι CSCs, προσφέρουν ακριβείς μετρήσεις των τροχιών των μιονίων, ενώ οι ανιχνευτές RPCs και οι TGCs, χρησιμοποιούνται για τη γρήγορη επιλογή των γεγονότων σύγκρουσης που είναι δυνητικά ενδιαφέροντα για ανάλυση φυσικής (δηλαδή χρησιμοποιούνται στο σύστημα trigger). Οι διαφορετικές τεχνολογίες ανιχνευτών χρησιμοποιούνται για να καλυφθούν διάφορες απαιτήσεις και περιοχές κάλυψης, ενώ η μέτρηση της ορμής των μιονίων επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της καμπυλότητας των τροχιών τους που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο που παράγουν τοροειδείς μαγνήτες. Η συνδυασμένη χρήση ακριβών και γρήγορων ανιχνευτών επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος[57].



Εικόνα 4.10: Πραγματική όψη του πειράματος ATLAS[46].



Εικόνα 4.11: Αποκομμένη όψη του συστήματος θερμιδόμετρου ATLAS[56].

4.4 Το Σύστημα Σκανδαλισμού (Trigger System)

Ο ανιχνευτής ATLAS στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων στο CERN χρησιμοποιεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα σκανδαλισμού τριών σταδίων για την επιλογή γεγονότων από έναν αρχικό ρυθμό σύγκρουσης 40 MHz έως έναν τελικό ρυθμό καταγραφής περίπου 300 Hz. Το πρώτο στάδιο, το trigger επιπέδου 1, είναι ένα σύστημα βασισμένο σε ανιχνευτικές διατάξεις που μειώνουν τον ρυθμό γεγονότων σε λιγότερο από 75 kHz χρησιμοποιώντας τον κεντρικό επεξεργαστή ενεργοποίησης (CTP) για την επεξεργασία σημάτων από τους ανιχνευτές θερμιδόμετρου και μιονίου. Αυτό το στάδιο εντοπίζει σωματίδια υψηλής εγκάρσιας ορμής, όπως μόνια, ηλεκτρόνια, φωτόνια, πίδακες και τ-λεπτόνια που διασπώνται σε αδρόνια, καθώς και γεγονότα με σημαντική ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια. Τα συμβάντα που περνούν την ενεργοποίηση επιπέδου 1 επισημαίνονται με σήμα "Αποδοχή επιπέδου 1" και ορίζουν περιοχές ενδιαφέροντος για περαιτέρω ανάλυση.

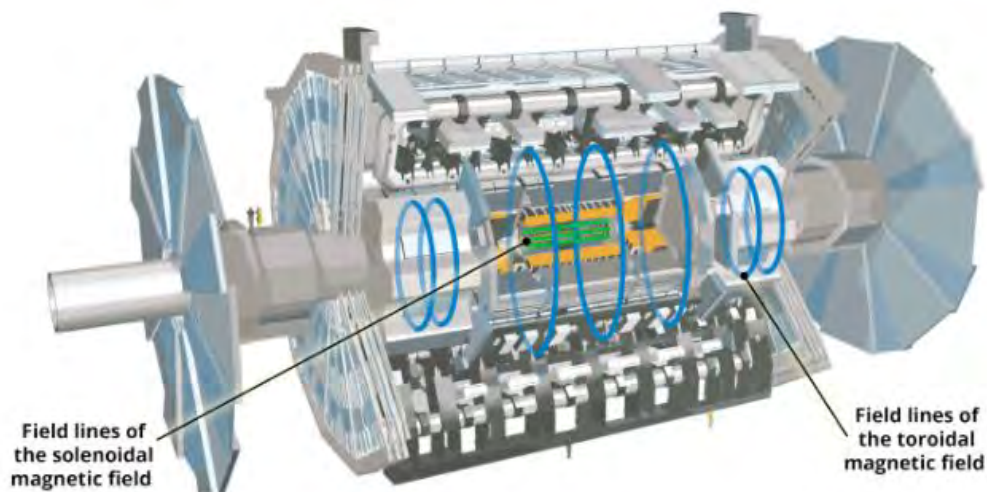
Το δεύτερο στάδιο, επίπεδο-2, αξιοποιεί τις περιοχές ενδιαφέροντος που ορίζονται από το επίπεδο 1 για να εκτελέσει πιο λεπτομερείς αναλύσεις χρησιμοποιώντας πλήρη δεδομένα του ανιχνευτή εντός αυτών των περιοχών, μειώνοντας το ρυθμό συμβάντων σε

περίπου 3,5 kHz με μέσο χρόνο επεξεργασίας 40 ms ανά συμβάν. Το τελικό στάδιο, το φίλτρο συμβάντων, βελτιώνει περαιτέρω την επιλογή σε περίπου 200 Hz [63].

4.5 Το Σύστημα Μαγνητών

Ο ανιχνευτής ATLAS στο CERN διαθέτει ένα εξελιγμένο υβριδικό σύστημα τεσσάρων μεγάλων υπεραγώγιμων μαγνητών, σχεδιασμένο να κάμπτει φορτισμένα σωματίδια και να μετρά την ορμή και το φορτίο τους. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει έναν κεντρικό σωληνοειδή μαγνήτη, ένα τοροειδές βαρέλι και δύο τοροειδείς βάσεις. Το σωληνοειδές περιβάλλει τον εσωτερικό ανιχνευτή στον πυρήνα του πειράματος, έχει μήκος 5.8 μέτρα, διάμετρο 2.56 μέτρα, ζυγίζει πάνω από 5 τόνους και παρέχει μαγνητικό πεδίο 2 Tesla χρησιμοποιώντας πάνω από 9 χιλιόμετρα υπεραγώγιμου σύρματος νιόβιου-τιτανίου ενσωματωμένου σε λωρίδες καθαρού αλουμινίου. Το τοροειδές του κυλίνδρου και το τοροειδές των βάσεων του κυλίνδρου του ανιχνευτή δημιουργούν τοροειδή μαγνητικά πεδία περίπου 0.5 Tesla και 1 Tesla για τους ανιχνευτές μιονίων στις περιοχές του κεντρικού κυλίνδρου και των βάσεων του κυλίνδρου του ανιχνευτή, αντίστοιχα.

Ολόκληρο το σύστημα μαγνητών εκτείνεται σε διάμετρο 22 μέτρων και μήκος 26 μέτρων, με αποθηκευμένη ενέργεια 1.6 gigajoules, και παρέχει μαγνητικό πεδίο σε όγκο περίπου 12000 κυβικών μέτρων.



Εικόνα 4.12: Σύστημα μαγνητών του πειράματος ATLAS [64].

4.6 Ανακατασκευές τροχιών των ηλεκτρονίων και μιονίων και η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια

Για την ανακατασκευή των ηλεκτρονίων, οι ενεργειακές αποθέσεις στο ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο αντιστοιχίζονται με τα εσωτερικά ίχνη του ανιχνευτή χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο Gauss-Sum για να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας λόγω Bremsstrahlung. Τα ηλεκτρόνια με $E_T > 7$ GeV και μέσα σε $|\eta| < 2.47$ εξετάζονται, εξαιρουμένης της μεταβατικής περιοχής $1.37 < |\eta| < 1.52$ [65] μεταξύ της κεντρικής περιοχής και της περιοχής των βάσεων του κυλινδρικού ανιχνευτή.

Η ανακατασκευή μιονίων χρησιμοποιεί διάφορους αλγόριθμους, συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων Combined (CB), MuGirl, Segment tagged (ST), Calorimeter tagged (CT) και StandAlone. Κάθε αλγόριθμος προσφέρει μια διαφορετική προσέγγιση για την ανακατασκευή των μιονίων με βάση πληροφορίες από το φασματόμετρο μιονίων (MS), τον εσωτερικό ανιχνευτή και τους ανιχνευτές θερμιδόμετρου. Τα κριτήρια επιλογής εφαρμόζονται σε υποψήφιες τροχιές ηλεκτρονίων και μιονίων με βάση τις απαιτήσεις ταυτοποίησης και απομόνωσης, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ως "χαλαροί", "μεσαίοι" ή "αυστηροί".

Επιπλέον, εφαρμόζονται αυστηρά κριτήρια για τη διασφάλιση της ποιότητας των τροχιών, όπως η απαίτηση τα ηλεκτρόνια και τα μίονια να προέρχονται από την πρωτεύουσα κορυφή και να πληρούν τους περιορισμούς των παραμέτρων πρόσκρουσης (ενέργεια, τροχιά, ταχύτητα, μάζα κτλ). Τα λεπτόνια κατηγοριοποιούνται με βάση τα κριτήρια αναγνώρισης και απομόνωσης σε βασικά, χαλαρά, σφιχτά Z και σφιχτά W λεπτόνια.

Ένας πίδακας είναι μια στενά κατευθυνόμενη δέσμη σωματιδίων που δημιουργείται από την εκτόξευση ενός κουάρκ ή γκλουονίου. Λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης (QCD), τα κουάρκ και γκλουόνια δεν παρατηρούνται ελεύθερα αλλά προκαλούν καταιγισμούς από σωματίδια που ονομάζονται πίδακες (jets) που ανιχνεύονται ως συνδυασμένες οντότητες. Οι πίδακες ανακατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο anti-kt[66].

Συνοπτικά, η ανάλυση περιλαμβάνει ισχυρή ανακατασκευή και επιλογή των υποψηφίων ηλεκτρονίων και μιονίων, αυστηρά κριτήρια για την ποιότητα των τροχιών, κατηγοριοποίηση των λεπτονίων με βάση την αναγνώριση και την απομόνωση, και αξιοποίηση των πιδάκων για την ταξινόμηση των συμβάντων και την καταστολή του υποβάθρου.

Η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια (MET) είναι μια κρίσιμη μεταβλητή για την έμμεση ανίχνευση σωματιδίων που δεν αλληλεπιδρούν άμεσα με τους ανιχνευτές, όπως τα νετρίνα.. Υπολογίζεται ως το αρνητικό άθροισμα των διανυσμάτων της εγκάρσιας ορμής όλων των ανιχνεύσιμων σωματιδίων:

$$E_T = -\sqrt{(\sum p_x)^2 + (\sum p_y)^2}$$

Η υψηλή τιμή της met μπορεί να είναι ένδειξη της παραγωγής αυτών των αόρατων σωματιδίων στις συγκρούσεις[1].

Κεφάλαιο 5 Μελέτη γεγονότων διμποζονικής παραγωγής WZ

5.1 Στόχος της εργασίας

Η διμποζονική κατάσταση WZ αναφέρεται στην παραγωγή και τη μελέτη των σωματιδίων W και Z, τα οποία είναι δύο από τα τρία gauge μποζόνια της ηλεκτρασθενούς θεωρίας (EWK). Επομένως, η παραγωγή ζευγών WZ σε συγκρούσεις αδρονίων αποτελεί έναν σημαντικό έλεγχο της ορθότητας του ηλεκτρασθενούς τομέα του Καθιερωμένου Προτύπου.

Η μελέτη της διμποζονικής κατάστασης WZ είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σωματιδιακή φυσική για διάφορους λόγους. Πρώτον, τα σωματίδια W και Z είναι ζωτικής σημασίας για το μηχανισμό του σπασίματος της ηλεκτρασθενής συμμετρίας και τη δημιουργία μάζας σωματιδίων μέσω του μηχανισμού Higgs. Επιπλέον, η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μποζονίων WZ και άλλων σωματιδίων μπορεί να δώσει πληροφορίες για την αδυναμία του ηλεκτρασθενούς τομέα και τις διαδικασίες της κοσμικής εξέλιξης.

Οι τελικές καταστάσεις προκύπτουν όταν κουάρκ εκπέμπουν δύο διανυσματικά μποζόνια ή όταν ένα εικονικό W μποζόνιο διασπάται σε ένα ζεύγος δύο διανυσματικών μποζονίων, διαδικασία η οποία περιλαμβάνει μια σύζευξη με τρία μποζόνια (Triple Gauge Coupling - TGC). Επιπλέον, μπορούν να παραχθούν ζεύγη WZ σε διαδικασίες σκέδασης μποζονίων, οι οποίες περιλαμβάνουν σύζευξεις τριών και τεσσάρων μποζονίων (Quartic Gauge Coupling - QGC) και είναι ευαίσθητα στον τομέα του σπασίματος της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας του Καθιερωμένου Προτύπου[67].

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση της παραγωγής WZ στο πείραμα ATLAS στον LHC, με στόχο την βελτιστοποίηση των κριτηρίων επιλογής γεγονότων του σήματος από εκείνα του υποβάθρου. Η ανάλυση πραγματοποιείται με χρήση δεδομένων από προσομοίωση (Monte Carlo Simulation – MC). Τα γεγονότα MC προκύπτουν από τις

συγκρούσεις πρωτονίου – πρωτονίου και την προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή ATLAS στα σωματίδια των τελικών καταστάσεων. Η ανάλυση χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό επεξεργασίας δεδομένων, δημιουργίας ιστογραμμάτων και στατιστικών υπολογισμών για να διαχωρίσει τα γεγονότα κατά τα οποία παράγεται ένα ζεύγος μποζονίων WZ από τα γεγονότα που προέρχονται από διεργασίες υποβάθρου.

5.2 Δεδομένα της ανάλυσης

Όταν πραγματοποιούμε πειράματα με επιταχυντές σωματιδίων, συλλέγουμε τεράστιες ποσότητες δεδομένων για τις συγκρούσεις των σωματιδίων. Στην τελική τους μορφή τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε αρχεία (που ονομάζονται αρχεία ROOT) τα οποία μπορούν να διαβαστούν και να αναλυθούν με το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα ROOT [68].

Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί ένα δείγμα δεδομένων από συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων όπου τα παραγόμενα σήματα και τα γεγονότα υποβάθρου προσομοιώνονται πλήρως από γεννήτριες Monte-Carlo. Η απόκριση του ανιχνευτή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας την προσομοίωση του προγράμματος GEANT4 [69] στο πλαίσιο του λογισμικού του ATLAS. Η στοίβαξη (pile-up) γεγονότων, δηλαδή η προσομοίωση των πολλαπλών αλληλεπιδράσεων στις ίδιες και τις γειτονικές διασταυρώσεις δεσμών, γίνεται σε ξεχωριστό βήμα στην αλυσίδα προσομοίωσης, κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το προσομοιωμένο γεγονός της κύριας αλληλεπίδρασης ενσωματώνεται σε ανελαστικά γεγονότα σύγκρουσης πρωτονίου - πρωτονίου. Η κατανομή του αριθμού των γεγονότων pile-up αναπαράγει τη δομή της δέσμης και τον μέσο αριθμό αλληλεπιδράσεων ανά διασταύρωση δεσμών των πραγματικών περιόδων λειτουργίας του ανιχνευτή.

Τα γεγονότα που παράγονται από τις γεννήτριες MC προσομοιάζουν τις συγκρούσεις σε ενέργεια κέντρου μάζας 13 TeV, χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή ATLAS στο LHC. Τα MC δείγματα αυτά έχουν εκ των προτέρων κανονικοποιηθεί ώστε να αντιστοιχούν σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα 139 fb^{-1} με αβεβαιότητα 1.7%. Έχουν επίσης σταθμιστεί με τους παράγοντες απόδοσης του πειραματικού ανιχνευτή και τις πειραματικές συνθήκες που

επικρατούσαν στον ανιχνευτή κατά την περίοδο συλλογής δεδομένων από το 2015 έως το 2018.

Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία παράχθηκαν κεντρικά από τις εξειδικευμένες ομάδες ειδικών στο πείραμα ATLAS, στο πλαίσιο του λογισμικού του ATLAS.

5.2.1 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΗΜΑΤΟΣ MONTE-CARLO

Η διεργασία σήματος του Καθιερωμένου Προτύπου για την παραγωγή ζεύγους WZ προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια Sherpa έκδοση 2.2.2, με τη διεργασία να ορίζεται ως $pp \rightarrow l\nu ll$, περιλαμβάνοντας εκτός κελύφους μάζας μποζόνια W και Z . Η ενεργός διατομή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή του δείγματος είναι 4.583 pb και περιλαμβάνει τους αναφερόμενους λόγους διακλάδωσης (Branching Ratio).

5.2.2 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ MONTE-CARLO

Για την προσομοίωση της παραγωγής γεγονότων ενός Z μποζονίου με παρουσία πιδάκων αδρονίων (Z +jets) χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια Powheg με την Pythia 8 για την προσομοίωση του καταγισμού των παρτονίων, της αδρονοποίησης και του υποκείμενου γεγονότος. Χρησιμοποιήθηκαν 3 δείγματα, ένα για κάθε τελική κατάσταση που ορίζεται από την διάσπαση του Z μποζονίου σε e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ και $\tau^+\tau^-$ λεπτόνια. Η ενεργός διατομή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δειγμάτων είναι 1901.2 pb.

Για την προσομοίωση της παραγωγής γεγονότων ενός Z μποζονίου με ταυτόχρονη παραγωγή ενός φωτονίου γ ($Z+\gamma$) χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια Sherpa έκδοση 2.2.4. Χρησιμοποιήθηκαν 10 δείγματα, ένα για κάθε τελική κατάσταση που ορίζεται από την διάσπαση του Z μποζονίου σε e^+e^- και $\mu^+\mu^-$ λεπτόνια. Για κάθε μία από τις δύο αυτές τελικές καταστάσεις υπάρχουν 5 δείγματα που διαφοροποιούνται ως προς τα κινηματικά χαρακτηριστικά των μποζονίων Z και γ .

Για την προσομοίωση της παραγωγής γεγονότων ενός ζεύγους ZZ χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια Sherpa έκδοση 2.2.2. Εδώ έχουμε 2 δείγματα που το καθένα αφορά την διαδικασία

$ZZ \rightarrow III$, (όπου $I=e$ ή μ) και $ZZ \rightarrow II\nu$, (όπου $I=e$ ή μ και $\nu=\nu_{\text{νεutrino}}$). Η ενεργός διατομή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δειγμάτων είναι 1.2523 pb και 1.2501 pb αντίστοιχα.

Για την προσομοίωση της παραγωγής γεγονότων 2 top-quark και ενός μποζονίου Z ή W (ttV , όπου $V=W,Z$) χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια Madgraph με την Pythia 8 για την προσομοίωση του καταιγισμού των παρτονίων, της αδρονοποίησης και του υποκείμενου γεγονότος. Χρησιμοποιήθηκαν 3 δείγματα, ένα για κάθε τελική κατάσταση που ορίζεται από την διάσπαση του Z μποζονίου σε $e+e-$ και $\mu+\mu-$ λεπτόνια. Η ενεργός διατομή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δειγμάτων είναι 0.54822 pb για την διαδικασία ttW και 0.03686 pb για τις διαδικασίες $ttZ \rightarrow t\bar{t}ee$ και $ttZ \rightarrow t\bar{t}\mu\mu$.

Τέλος, για την διαδικασία στα πλαίσια του καθιερωμένου προτύπου $pp \rightarrow tt$ προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια Powheg με την Pythia 6 για την προσομοίωση του καταιγισμού των παρτονίων, της αδρονοποίησης και του υποκείμενου γεγονότος. Χρησιμοποιήθηκε 1 δείγμα με ενεργός διατομή 729.77 pb.

Για όλα τα δείγματα υποβάθρου, η αναφερόμενη ενεργός διατομή που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή του δείγματος περιλαμβάνει τους αντίστοιχους λόγους διακλάδωσης (Branching Ratio).

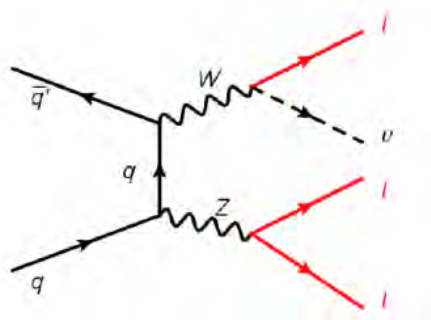
5.2.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η ανάλυση αρχίζει με το άνοιγμα των αρχείων ROOT που περιέχουν τα δεδομένα. Τα αρχεία αυτά αντιστοιχούν σε διαφορετικά δείγματα, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη φυσική διαδικασία ή υπόβαθρο. Υπάρχουν 20 κανάλια φυσικής (19 κανάλια υποβάθρου και 1 κανάλι σήματος), μερικά από αυτά τα κατηγοριοποιούμε σε κανάλια φυσικής όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Δηλαδή, στην τελική φάση κρατάμε 6 κανάλια φυσικής, 5 διαδικασίες υπόβαθρου και 1 κανάλι φυσικής που είναι το σήμα. Αναλυτικά:

Τελική κατάσταση: 3 λεπτόνια και 1 νεutrino, ξέρουμε ότι αυτό προκύπτει από ένα W μποζόνιο (το W διασπάται σε ένα λεπτόνιο και ένα νεutrino) και ένα Z μποζόνιο (το Z διασπάται σε δύο λεπτόνια).

WZ (σήμα): Η διαδικασία $WZ \rightarrow 3l + \nu$, όπου το W μποζόνιο διασπάται σε ένα λεπτόνιο (ηλεκτρόνιο ή μιονίο) και ένα νεutrino, και το Z μποζόνιο διασπάται σε δύο λεπτόνια.

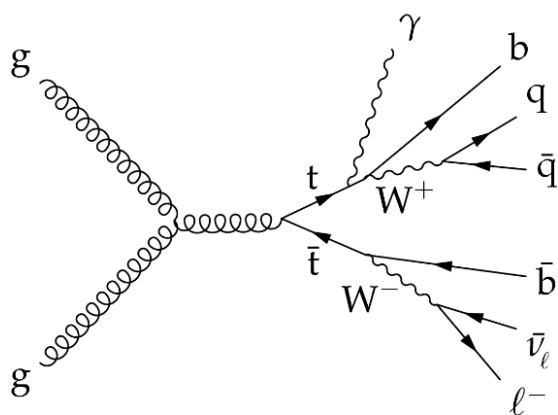
Στην παρακάτω εικόνα 5.1 δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής WZ χαμηλότερης τάξης που καταλήγει με την πλήρη λεπτονική διάσπαση στην τελική κατάσταση:



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα Feynman WZ.

- $t\bar{t}$: Διαδικασία όπου ένα t quark διασπάται σε W^+ και b quark, και ένα $\bar{t}$ quark διασπάται σε W^- και $\bar{b}$ quark.

Στην παρακάτω εικόνα 5.2 δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής $t\bar{t}$ χαμηλότερης τάξης:

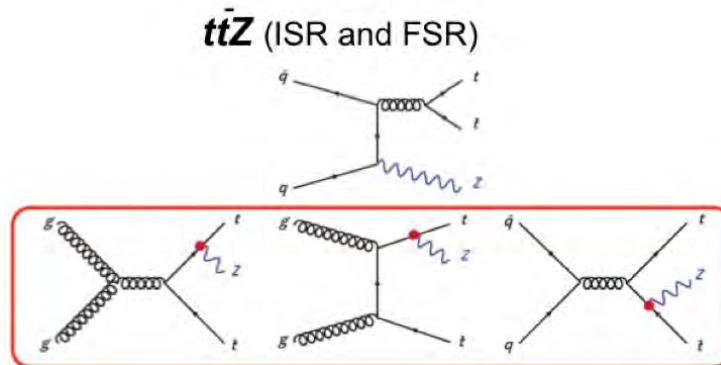


Εικόνα 5.2: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}$

- $t\bar{t}V$: Περιλαμβάνει τις διαδικασίες $t\bar{t}Z$ και $t\bar{t}W$:

$t\bar{t}Z$: Το Z μποζόνιο διασπάται σε δύο λεπτόνια (π.χ. μιονίο και αντιμιονίο ή ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο).

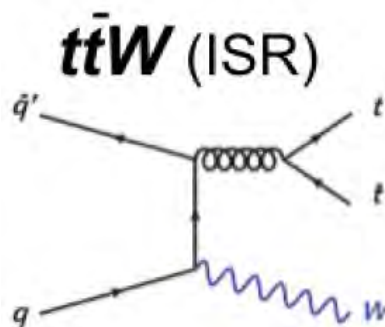
Στην παρακάτω εικόνα 5.3 δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής $t\bar{t}Z$ χαμηλότερης τάξης:



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}Z$. Στην εικόνα και παρουσιάζονται οι όροι ISR και FSR, δηλαδή Initial State Radiation (Ακτινοβολία Αρχικής Κατάστασης) και Final State Radiation (Ακτινοβολία Τελικής Κατάστασης). Παραδείγματα ISR θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διαγράμματα όπου το μποζόνιο Z εκπέμπεται από ένα παρτόνιο (κουάρκ ή γκλουόνιο) στην αρχική κατάσταση πριν από την κύρια αλληλεπίδραση. Παραδείγματα FSR θα περιλάμβαναν το μποζόνιο Z που εκπέμπεται από ένα από τα σωματίδια της τελικής κατάστασης μετά την αλληλεπίδραση, όπως ένα άνω (top) κουάρκ που εκπέμπει ένα μποζόνιο Z μετά την παραγωγή του.

$t\bar{t}W$: Το W μποζόνιο διασπάται σε λεπτόνιο και νευτρίνιο.

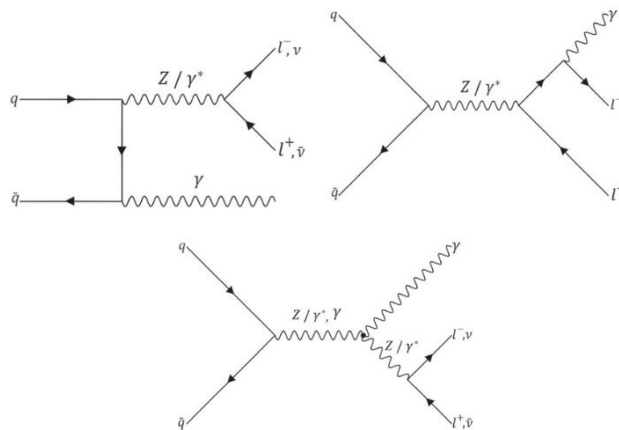
Στην παρακάτω εικόνα 5.4 δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής $t\bar{t}W$ χαμηλότερης τάξης:



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα Feynman $t\bar{t}W$.

- Ζγ: Το κανάλι όπου το Z μποζόνιο διασπάται σε δύο λεπτόνια και εκπέμπεται ένα φωτόνιο (γ).

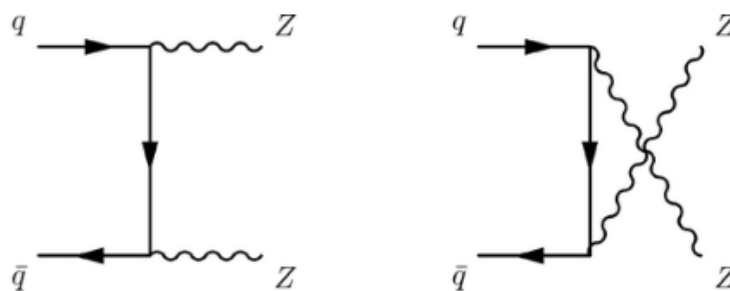
Στην παρακάτω εικόνα 5.5 δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής Ζγ χαμηλότερης τάξης:



Εικόνα 5.5: Διαγράμματα Feynman Ζγ.

- ΖΖ: Διαδικασία όπου δύο μποζόνια Ζ διασπώνται σε τελικά προϊόντα όπως 2 λεπτόνια και 2 νετρίνα ή 4 λεπτόνια.

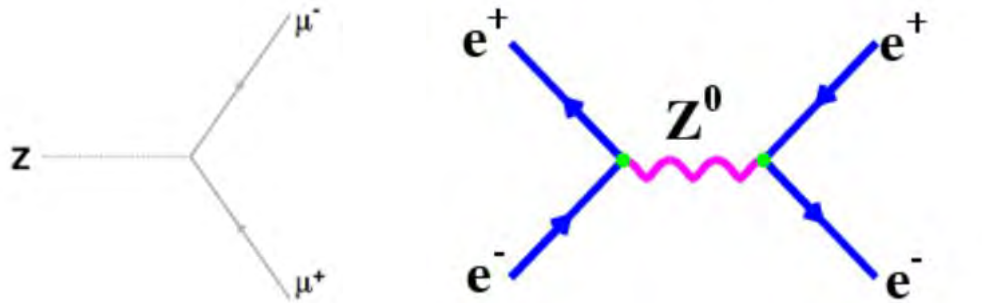
Στην παρακάτω εικόνα δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής ΖΖ χαμηλότερης τάξης:



Εικόνα 5.6: Διαγράμματα Feynman ΖΖ.

- ΖΧ: Περιλαμβάνει διαδικασίες με τελικά προϊόντα όπως Ζmu μ και Ζee, όπου το Ζ μποζόνιο διασπάται σε δύο λεπτόνια.

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται το διάγραμμα Feynman για την διαδικασία παραγωγής ΖΧ χαμηλότερης τάξης:



Εικόνα 5.7 Διαγράμματα Feynman για διάσπαση $Z\mu\mu$ (αριστερά) και Zee (δεξιά)

5.3 Μεθοδολογία

1. Μεταβλητές που Μελετάμε:

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μια σύγκρουση σωματιδίων, μελετάμε διάφορες φυσικές ποσότητες που ονομάζονται "μεταβλητές". Αυτές οι μεταβλητές μας επιτρέπουν να αποκτήσουμε μια λεπτομερή εικόνα των διεργασιών και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα των συγκρούσεων. Ενδεικτικά παραδείγματα αυτών των μεταβλητών είναι:

1. Μεταβλητές που σχετίζονται με τη μάζα και την ενέργεια
 - M_Z : Η μάζα του μποζονίου Z
 - M_{WZ} : Η μάζα του συστήματος WZ
 - M_{TWZ} : αναλλοίωτη μάζα του συστήματος WZ ανακατασκευασμένη στο εγκάρσιο επίπεδο. Το εγκάρσιο επίπεδο είναι το επίπεδο x-y, δηλαδή κάθετο στον άξονα της δέσμης

- M_{tw} : αναλλοίωτη μάζα του μποζονίου W ανακατασκευασμένη στο εγκάρσιο επίπεδο
- M_{123} : Η συνολική μάζα των τριών λεπτονίων

2. Μεταβλητές που σχετίζονται με την ορμή

- L_{p1pt} , L_{p2pt} , L_{p3pt} : Η εγκάρσια ορμή του πρώτου, δεύτερου και τρίτου λεπτονίου αντίστοιχα
- P_{twz} : Η εγκάρσια ορμή του συστήματος WZ (για τον όρο εγκάρσια βλέπε ενότητα 4.1)
- P_{tz} : Η εγκάρσια ορμή του μποζονίου Z
- P_{t123} : Η συνολική εγκάρσια ορμή των τριών λεπτονίων, δηλαδή το διανυσματικό άθροισμά τους
- Sum_{3pt} : Το άθροισμα των εγκάρσιων ορμών των τριών λεπτονίων, δηλαδή το αριθμητικό άθροισμά τους.

3. Μεταβλητές που σχετίζονται με την κατεύθυνση

- L_{p1eta} , L_{p2eta} , L_{p3eta} : Η pseudorapidity του πρώτου, δεύτερου και τρίτου λεπτονίου αντίστοιχα
- L_{p1phi} , L_{p2phi} , L_{p3phi} : Η γωνία ϕ (αζιμουθιακή γωνία) του πρώτου, δεύτερου και τρίτου λεπτονίου αντίστοιχα
- E_{tw} : Η pseudorapidity του μποζονίου W
- et_{az} : Η pseudorapidity του μποζονίου Z

4. Μεταβλητές που σχετίζονται με την Ελλείπουσα Εγκάρσια Ενέργεια

- Met : Η ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια

5. Μεταβλητές που σχετίζονται με τα jets (πιδάκες αδρονίων, βλέπε ενότητα 4.5)

- N_{jets} : Ο αριθμός των πιδάκων που ανιχνεύονται
- N_{bjets} : Ο αριθμός των πιδάκων που ανιχνεύονται που έχουν δημιουργηθεί από ένα κάτω (bottom) κουάρκ

2. Δημιουργία Γραφημάτων

Όταν μελετάμε συγκρούσεις σωματιδίων, χρησιμοποιούμε γραφήματα για να απεικονίσουμε την κατανομή των διαφόρων φυσικών μεγεθών που σχετίζονται με τα σωματίδια μετά τη σύγκρουση. Αυτά τα μεγέθη μπορεί να περιλαμβάνουν την ενέργεια, την ορμή και άλλα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε συγκεκριμένα κριτήρια επιλογής για να απομονώσουμε τα γεγονότα του σήματος (γεγονότα παραγωγής WZ). Τα όρια αυτά βασίζονται σε θεωρητικές προβλέψεις και μας βοηθούν να φιλτράρουμε τα δεδομένα διατηρώντας μόνο αυτά που είναι σημαντικά για τη μελέτη μας. Με αυτή τη τεχνική μπορούμε να διαχωρίσουμε τα γεγονότα που μας ενδιαφέρουν από τα υπόλοιπα δεδομένα που αποτελούν θόρυβο.

3. Εξέταση των Μεταβλητών:

Δημιουργούμε και αναλύουμε γραφήματα για να καταλάβουμε ποιες μεταβλητές μας βοηθούν καλύτερα να διαχωρίσουμε τα δεδομένα που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα γεγονότα από τα υπόλοιπα δεδομένα που δεν μας ενδιαφέρουν. Για παράδειγμα, φτιάχνουμε γραφήματα που δείχνουν πώς κατανέμονται οι τιμές της μάζας και της ορμής των σωματιδίων. Μελετώντας αυτά τα γραφήματα, μπορούμε να εντοπίσουμε τα χαρακτηριστικά των γεγονότων σήματος και να ξεχωρίσουμε τα δεδομένα τους από τον "θόρυβο" που προέρχεται από άλλα γεγονότα που δεν σχετίζονται άμεσα με το σήμα.

4. Σύγκριση κριτηρίων επιλογής:

Εξετάζουμε διαφορετικούς τρόπους επιλογής των δεδομένων μας (σαν να δοκιμάζουμε διάφορα φίλτρα) για να βρούμε ποιος τρόπος είναι πιο αποτελεσματικός στο να ξεχωρίσουμε το σήμα (τα γεγονότα WZ) από το υπόβαθρο.

5. Ποσοτικοποίηση της Αποτελεσματικότητας:

Χρησιμοποιούμε στατιστικές μεθόδους για να μετρήσουμε πόσο καλά καταφέραμε να ξεχωρίσουμε το σήμα από το υπόβαθρο. Ένας τρόπος να το κάνουμε αυτό είναι να μετρήσουμε την αναλογία σήματος προς υπόβαθρο (s/b) και την ποσότητα $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ που αντιπροσωπεύει πόσο καλά μπορούμε να διακρίνουμε τα γεγονότα σήμα μας (S) από το υπόβαθρο (B).

5.3.1 ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Γνωρίζοντας τα κανάλια φυσικής χρησιμοποιούνται ο παρακάτω μεταβλητές:

1. m_{WZ} (μάζα του WZ)
2. m_Z (μάζα του μποζονίου Z)
3. m_{123} (η αναλλοίωτη μάζα του συστήματος που σχηματίζεται από τα τρία λεπτόνια και το νεutrino)
4. m_{tw} (αναλλοίωτη μάζα του μποζονίου W) και
5. m_{twz} (αναλλοίωτη μάζα της διμποζονικής κατάστασης WZ)

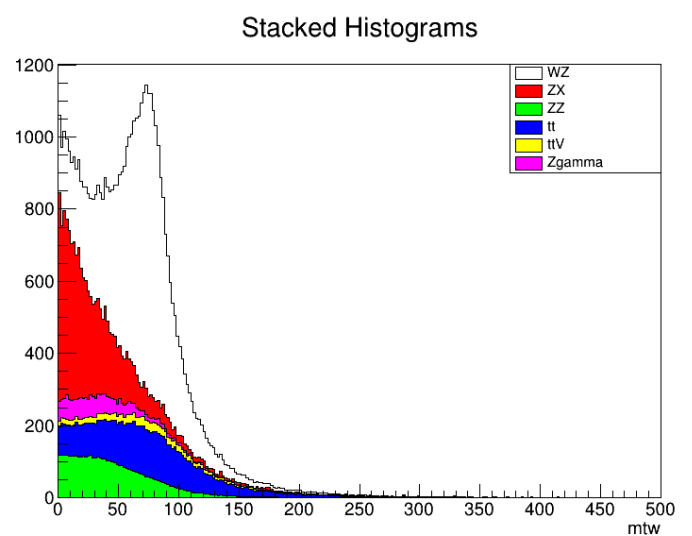
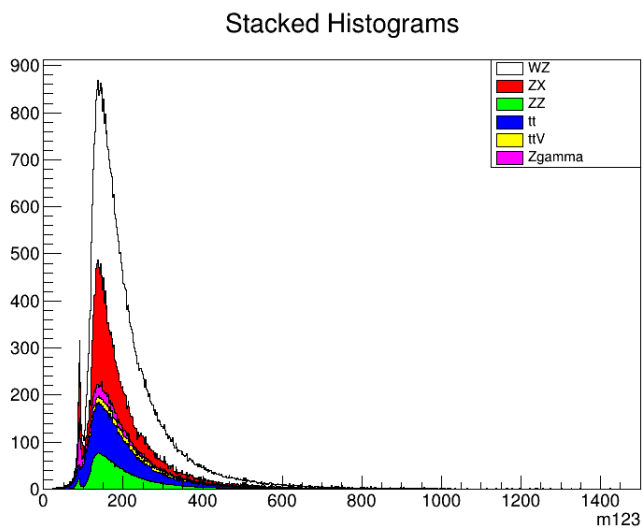
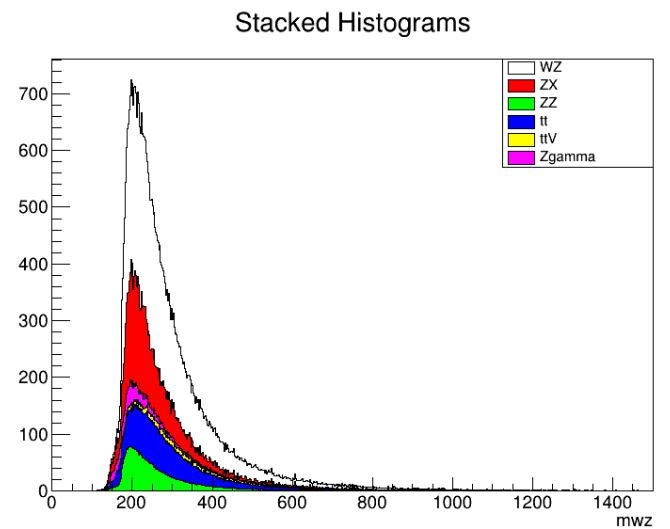
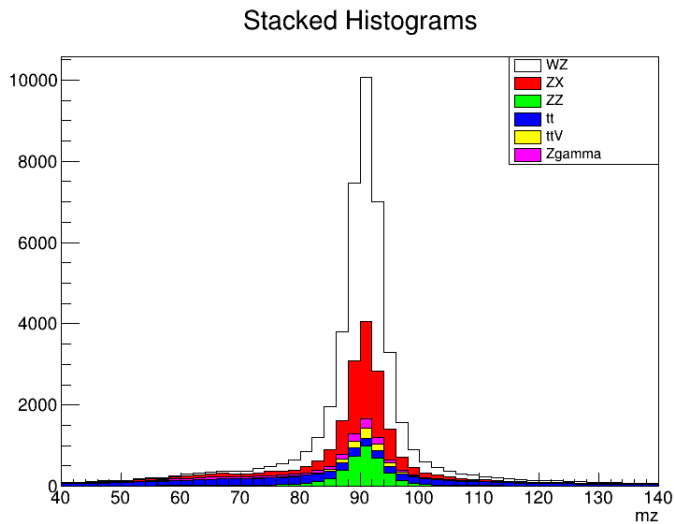
Χρησιμοποιούμε τις μεταβλητές 4 και 5 επειδή το μποζόνιο W διασπάται σε ένα λεπτόνιο και ένα νεutrino ($W \rightarrow l + \nu$), όπου η ταυτοποίηση του νεutrino βασίζεται στην ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια (MET). Τα νεutrino δεν αλληλεπιδρούν με το υλικό του ανιχνευτή, καθιστώντας την ανίχνευσή τους πρόκληση. Ως εκ τούτου, η MET, που αντιπροσωπεύει την ενεργειακή ανισορροπία στο εγκάρσιο επίπεδο, χρησιμοποιείται για να συναχθεί η παρουσία του νεutrino. Δεδομένου ότι η MET είναι αποκλειστικά στο επίπεδο xy , επιτρέπει τον εντοπισμό του νεutrino μέσω αυτού του επιπέδου.

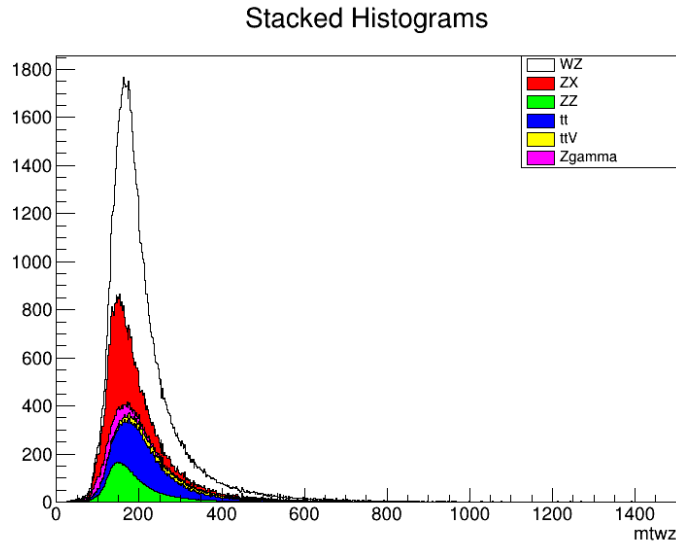
Κινηματικές μεταβλητές για τα 3 λεπτόνια ($WZ \rightarrow 3l + \nu$):

1. Οι εγάρσιες ορμές των τριών λεπτονίων ($lep1pt$, $lep2pt$ και $lep3pt$)
2. Το άθροισμα των τριών λεπτονίων ($sum3pt$), άθροισμα των τιμών τους
3. Η εγκάρσια ορμή του συστήματος που αποτελείται από τα τρία λεπτόνια και το νεutrino (pt_{123}), το διανυσματικό άθροισμά τους
4. Τα η των τριών λεπτονίων ($lep1eta$, $lep2eta$ και $lep3eta$)
5. Τα ϕ των τριών λεπτονίων ($lep1phi$, $lep2phi$ και $lep3phi$)
6. Οι εγάρσιες ορμές των μποζονίων (pt_w και pt_z)
7. Η εγκάρσια ορμή της διμποζονικής κατάστασης (pt_{wz})
8. Τα η των μποζονίων (eta_w και eta_z)
9. Ο αριθμός των jets (n_{jets})
10. Ο αριθμός των jets που προκύπτουν από παραγωγή b quark (n_{bjets})
11. Η Ελλείπουσα Εγκάρσια Ενέργεια (MET)

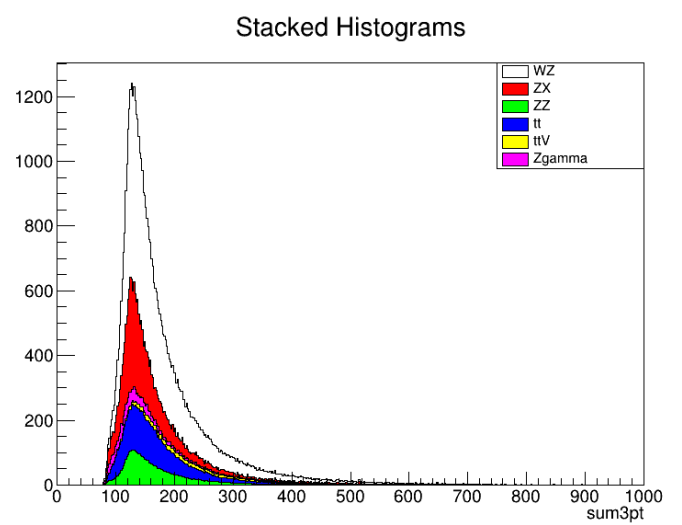
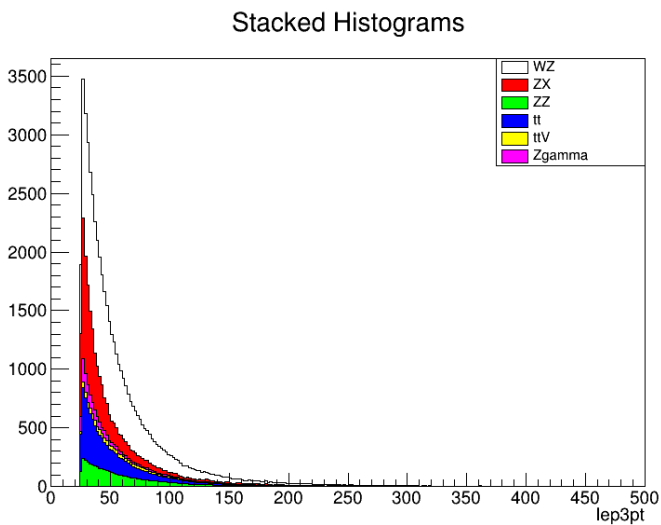
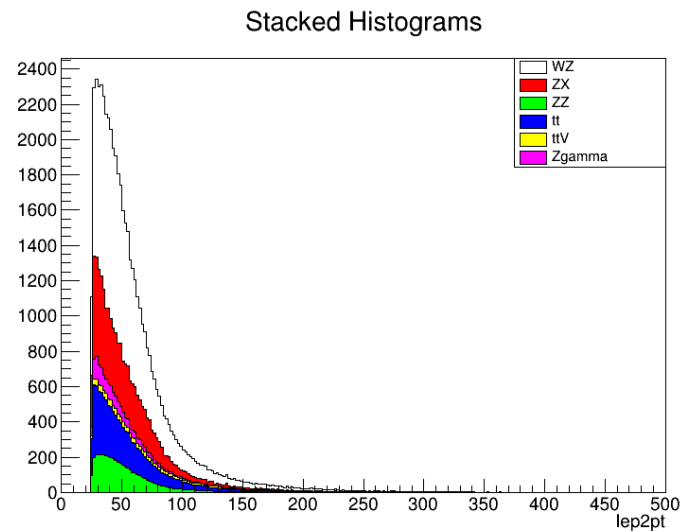
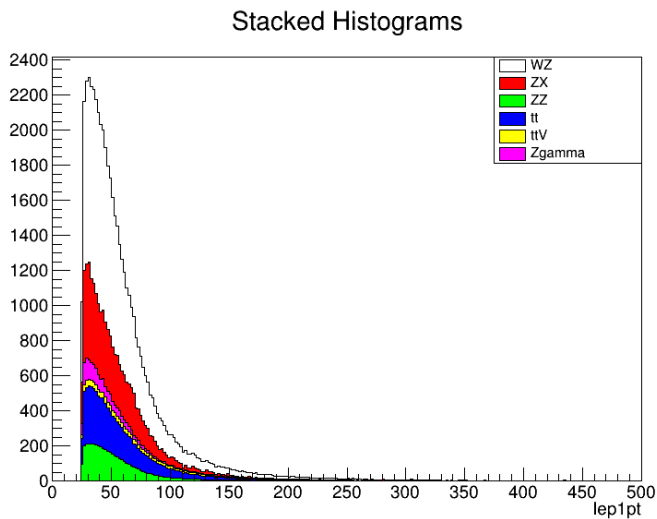
Ξεκινώντας την ανάλυση, η πρώτη μας εργασία είναι η δημιουργία stacked ιστογραμμάτων των παραπάνω μεταβλητών. Ο ορισμός "stacked" στο πλαίσιο της δημιουργίας ιστογραμμάτων αναφέρεται στην τεχνική της συσσωρευτικής πρόσθεσης ιστογραμμάτων. Κατά τη διαδικασία αυτή, δημιουργούνται πολλαπλά ιστογράμματα, και στη συνέχεια τα ιστογράμματα αυτά στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο στον ίδιο γραφικό πίνακα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τη συνολική κατανομή των δεδομένων μας, ενώ ταυτόχρονα να δείξουμε και τη συνεισφορά κάθε καναλιού φυσικής στην τελική κατανομή. Τα ιστογράμματα αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την οπτικοποίηση και την κατανόηση της κατανομής των δεδομένων μας. Με τη χρήση stacked ιστογραμμάτων, συνδυάζουμε τις κατανομές του κάθε καναλιού σε ένα ιστόγραμμα, δημιουργώντας έτσι μια συνολική εικόνα της συνεισφοράς κάθε καναλιού φυσικής. Δημιουργούμε stacked ιστογράμματα για τις μεταβλητές που αναφέρονται παραπάνω. Επιπλέον, αναφέρουμε ότι τα stacked ιστογράμματα είναι κανονικοποιημένα σε ολοκληρωμένη φωτεινότητα ίση με 139 fb^{-1} , σταθμίζονται για την απόδοση του ανιχνευτή και επιλέγονται με κριτήρια που εφαρμόζονται κατά την παραγωγή των δεδομένων από τις γεννήτριες γεγονότων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει να αναδείξουμε τις διαφορές μεταξύ των διαφορετικών καναλιών

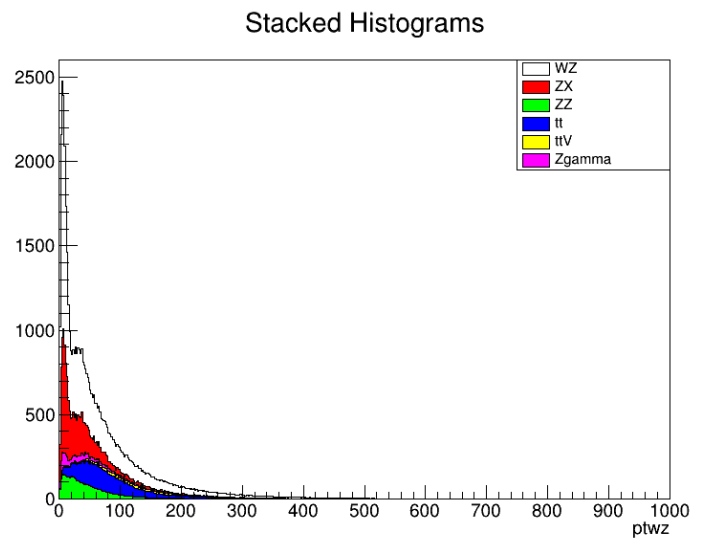
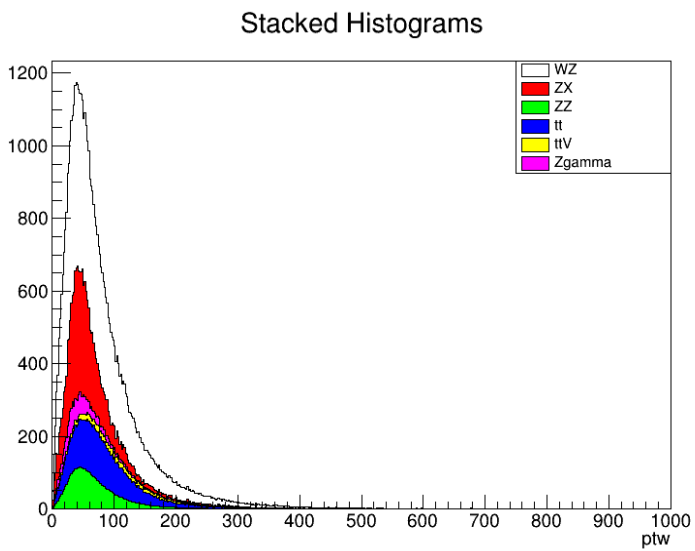
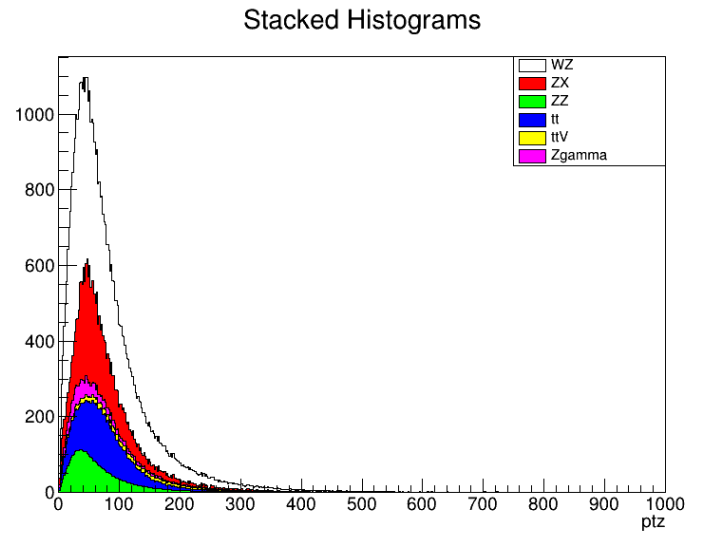
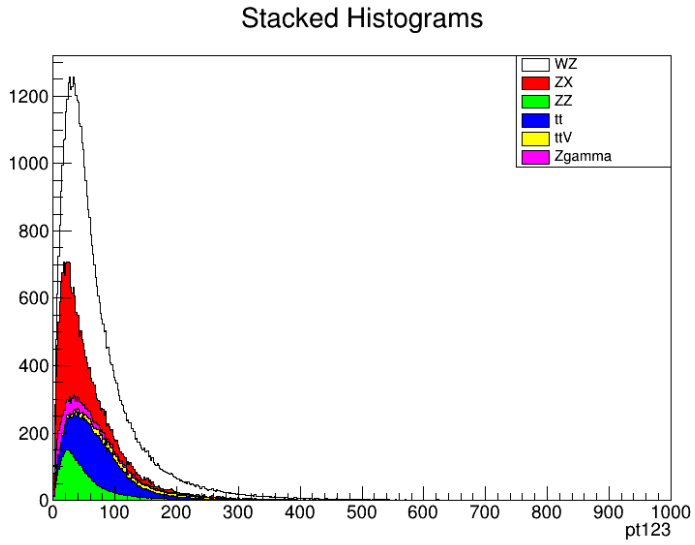
φυσικής με πιο κατανοητό τρόπο. Λαμβάνοντας υπόψη μας τα 6 κανάλια φυσικής προκύπτουν τα ιστογράμματα:





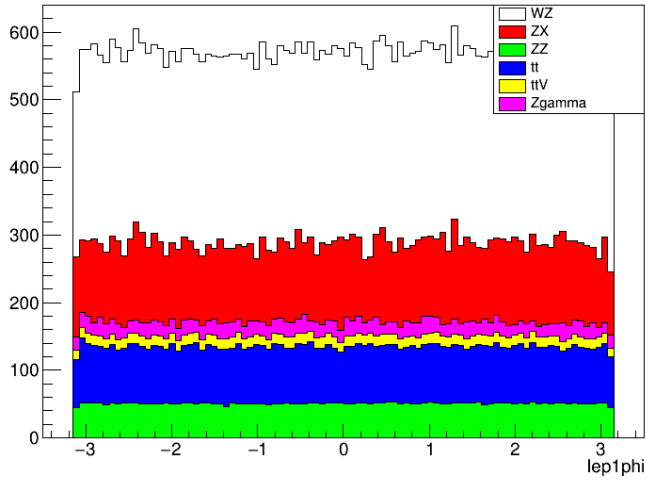
Εικόνα 5.7: Ιστογράμματα μεταβλητών που αφορούν τις μάζες.



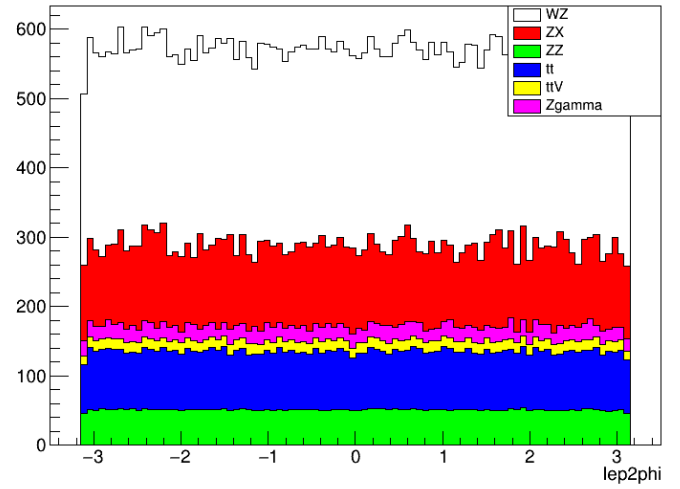


Εικόνα 5.8: Ιστογράμματα μεταβλητών που αφορούν τις ορμές.

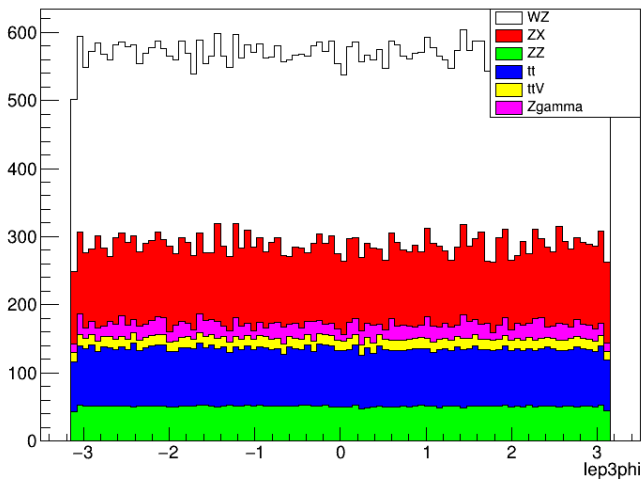
Stacked Histograms



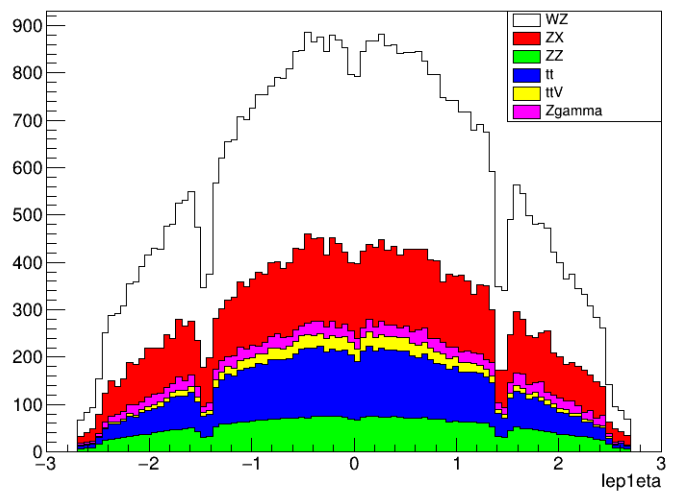
Stacked Histograms



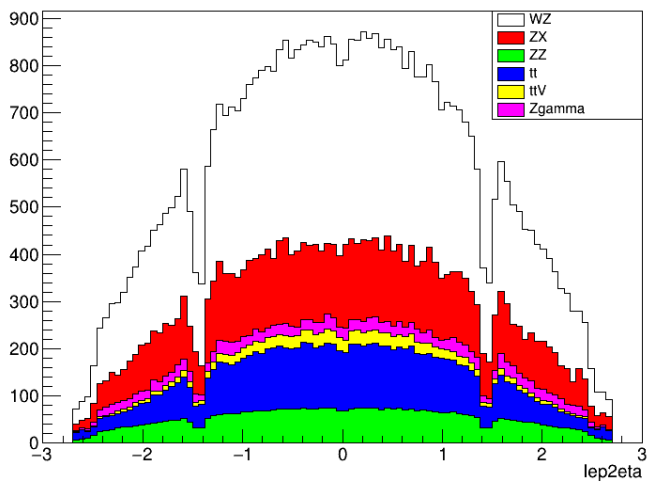
Stacked Histograms



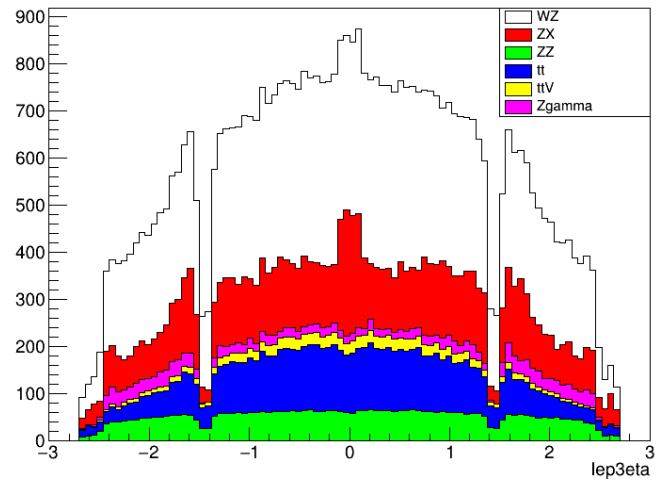
Stacked Histograms

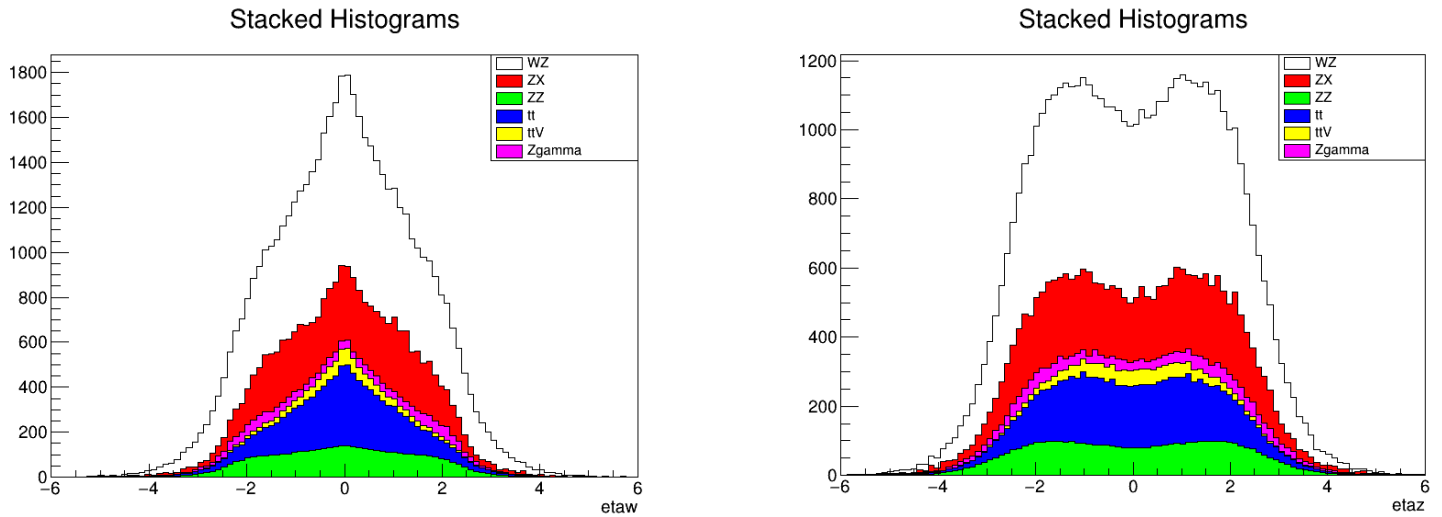


Stacked Histograms

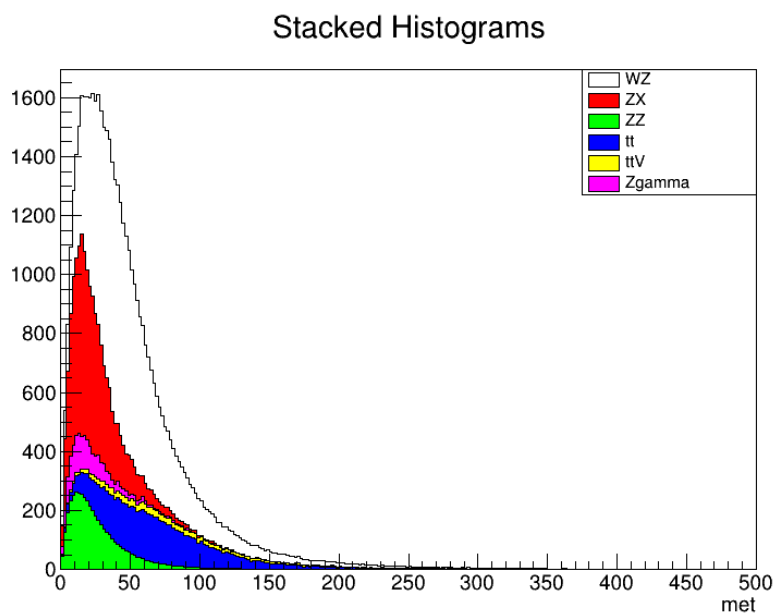


Stacked Histograms

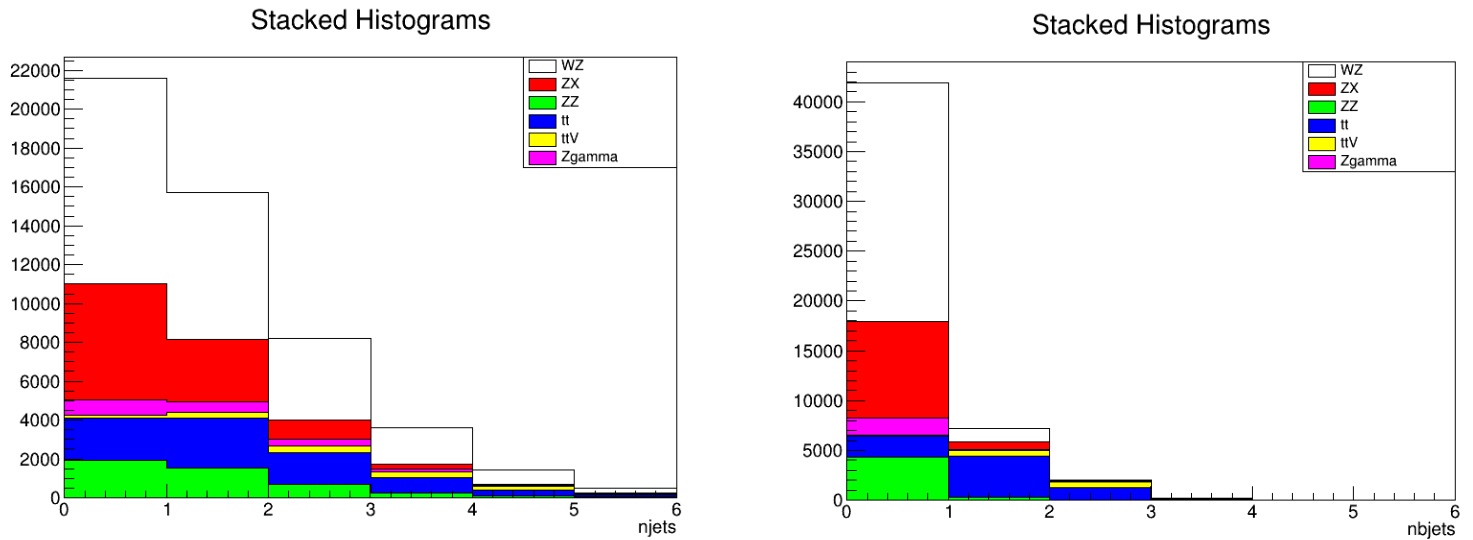




Εικόνα 5.9: Ιστογράμματα με μεταβλητές που αφορούν την κατεύθυνση.



Εικόνα 5.10: Ιστόγραμμα με τη μεταβλητή της ελλείπουσας εγκάρσιας ενέργειας.



Εικόνα 5.11: Ιστογράμματα με μεταβλητές που αφορούν τους πίδακες.

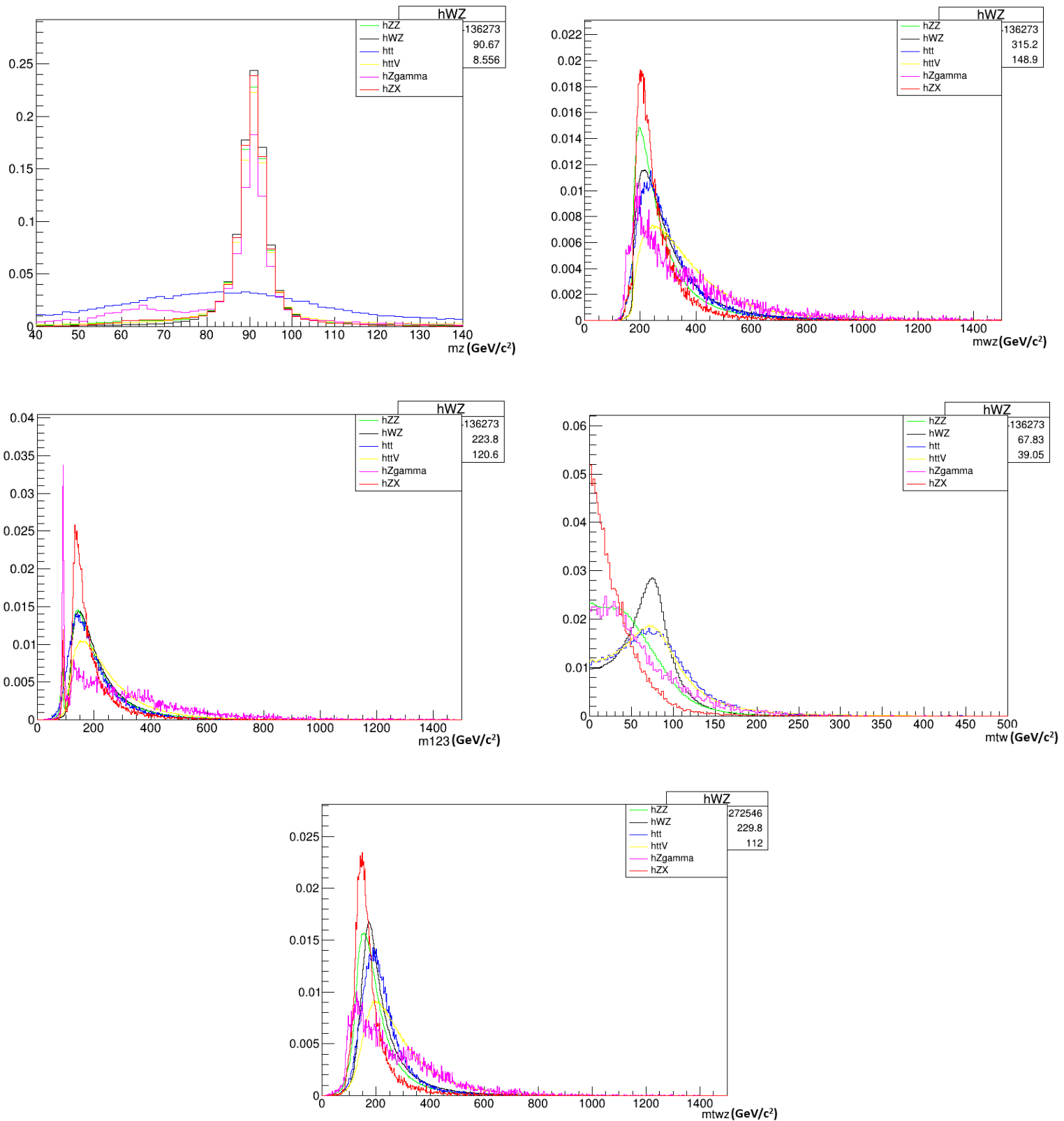
5.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ

Τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα είναι ένα κρίσιμο εργαλείο στην ανάλυσή μας, παρέχοντας έναν τυποποιημένο τρόπο σύγκρισης του σχήματος των κατανομών μεταβλητών. Χρησιμοποιούμε κανονικοποιημένα διαγράμματα στη μονάδα επιφάνειας, προκειμένου να εξασφαλίζουμε ότι κάθε bin αντιπροσωπεύει το κλάσμα των συμβάντων και όχι τις απόλυτες μετρήσεις. Ο όρος bin αναφέρεται σε ένα από τα διαστήματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ιστογραμμάτων. Στο πλαίσιο της δημιουργίας ιστογραμμάτων, τα δεδομένα οργανώνονται σε διαφορετικά διαστήματα ή bins, και κάθε bin αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών της μεταβλητής. Κατά τη δημιουργία του ιστογράμματος, ο αριθμός των εμφανίσεων ή των συμβάντων σε κάθε bin καταμετράται και η συχνότητα αυτή αναπαριστά τη συχνότητα εμφάνισης των τιμών εκείνου του εύρους στα δεδομένα. Αυτή η κανονικοποίηση μας επιτρέπει να εστιάσουμε στο σχήμα της κατανομής και όχι στο συνολικό της μέγεθος, διευκολύνοντας τον εντοπισμό μοτίβων και τάσεων.

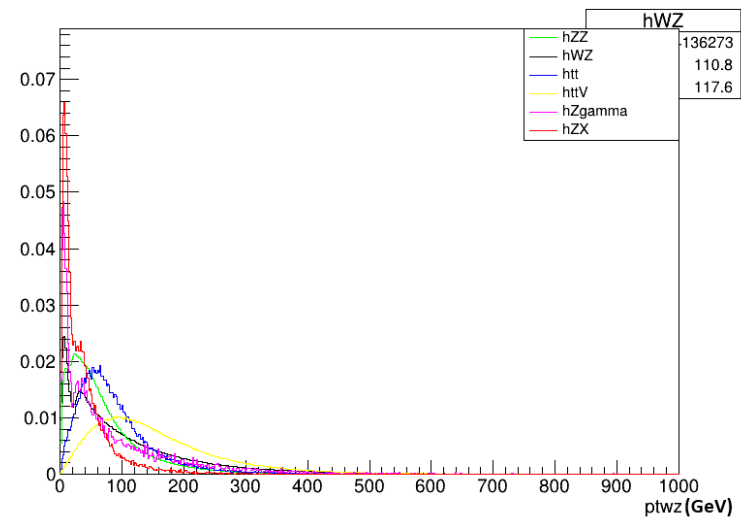
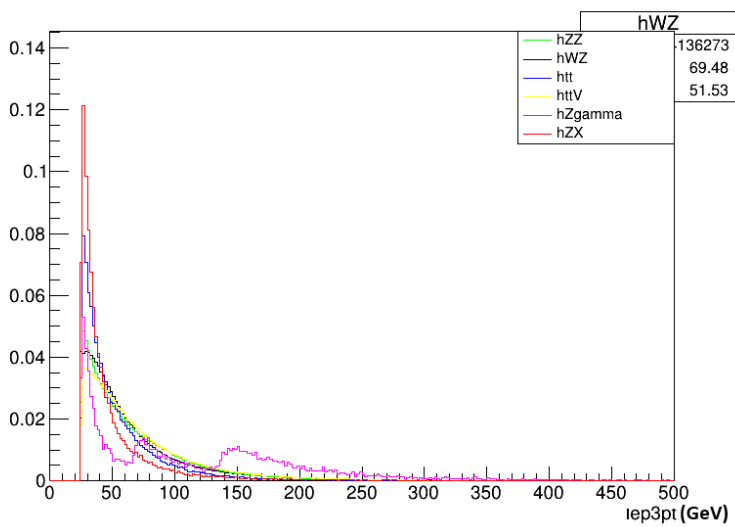
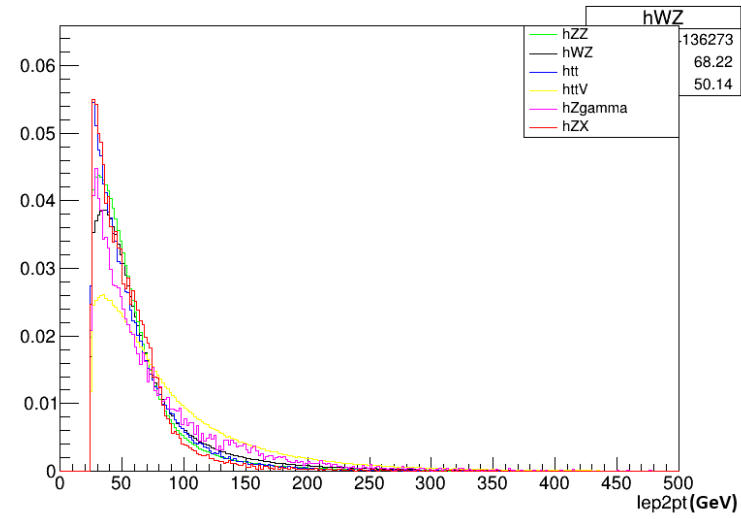
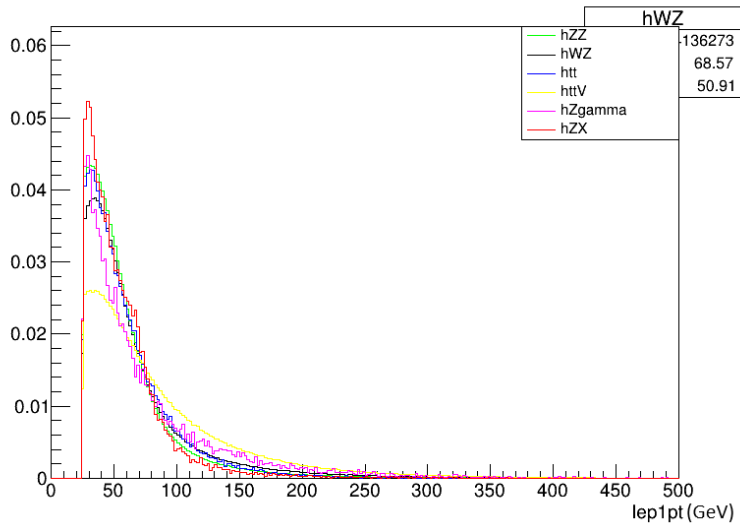
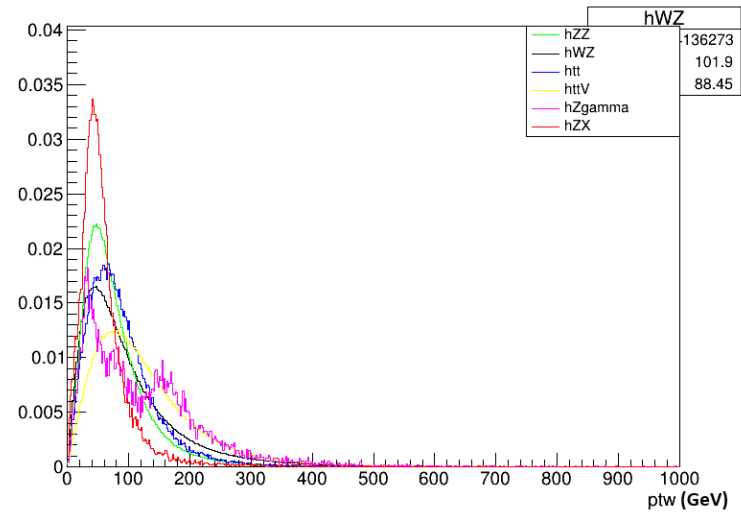
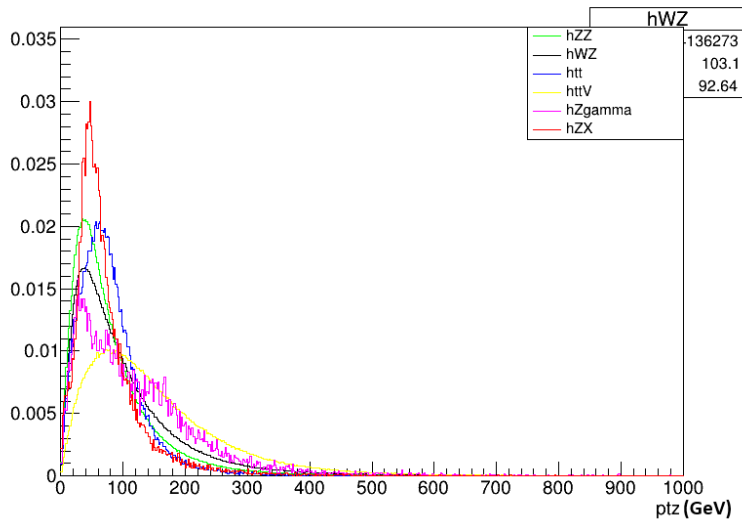
Στο πλαίσιο της ανάλυσής μας, τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα στη μοναδιαία περιοχή είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την οπτικοποίηση της κατανομής των μεταβλητών μετά την εφαρμογή των κριτηρίων επιλογής. Αυτά τα ιστογράμματα παρέχουν εικόνα για το πώς τα κριτήρια επιλογής επηρεάζουν την κατανομή των συμβάντων, βοηθώντας μας να εντοπίσουμε περιοχές ενδιαφέροντος και να βελτιώσουμε τα κριτήρια επιλογής μας.

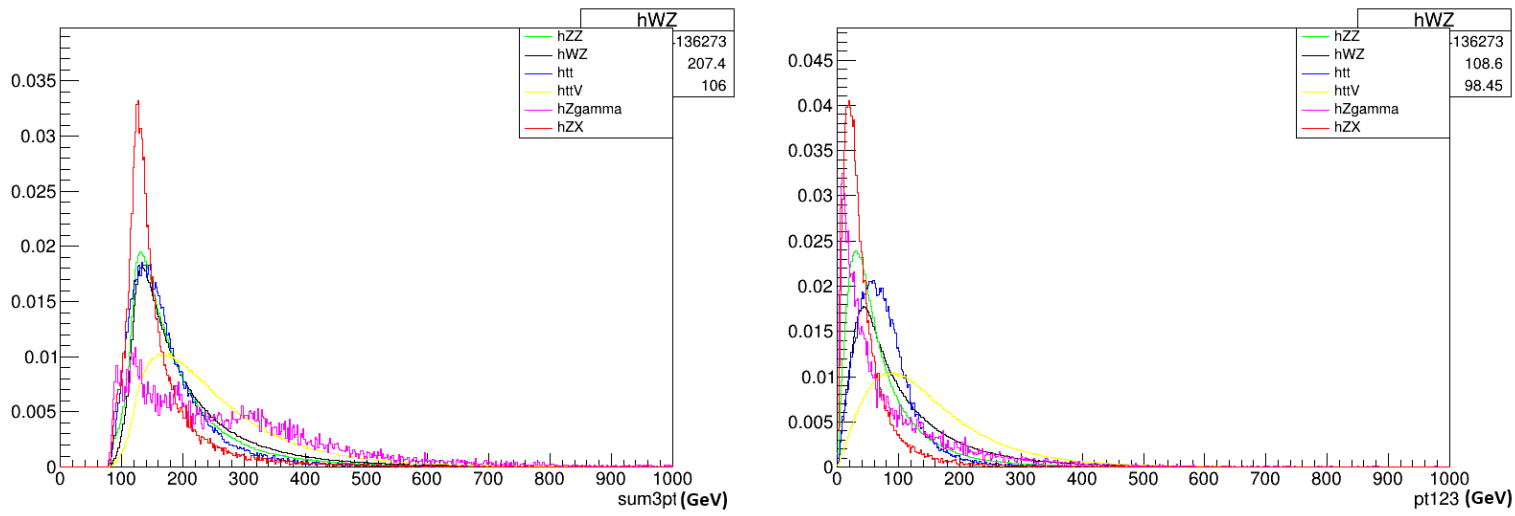
Συνολικά, τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα χρησιμεύουν ως ένα ισχυρό οπτικό βοήθημα στην ανάλυσή μας, βοηθώντας στην ερμηνεία των κατανομών των δεδομένων και καθοδηγώντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά την εφαρμογή των κριτηρίων επιλογής και τη βελτίωση των στρατηγικών ανάλυσης.

Έτσι λοιπόν, προκύπτουν τα ιστογράμματα (με την ίδια σειρά):

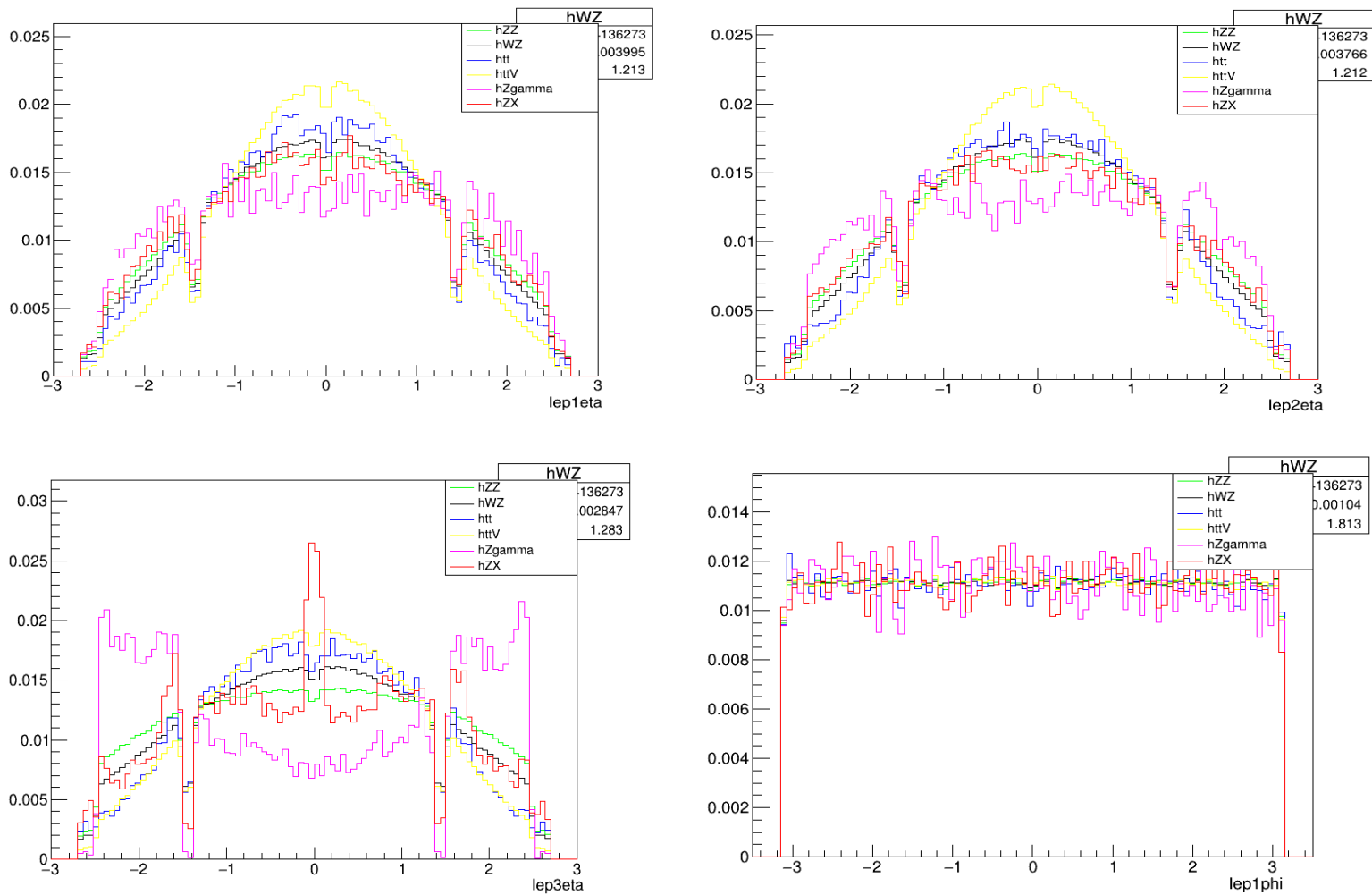


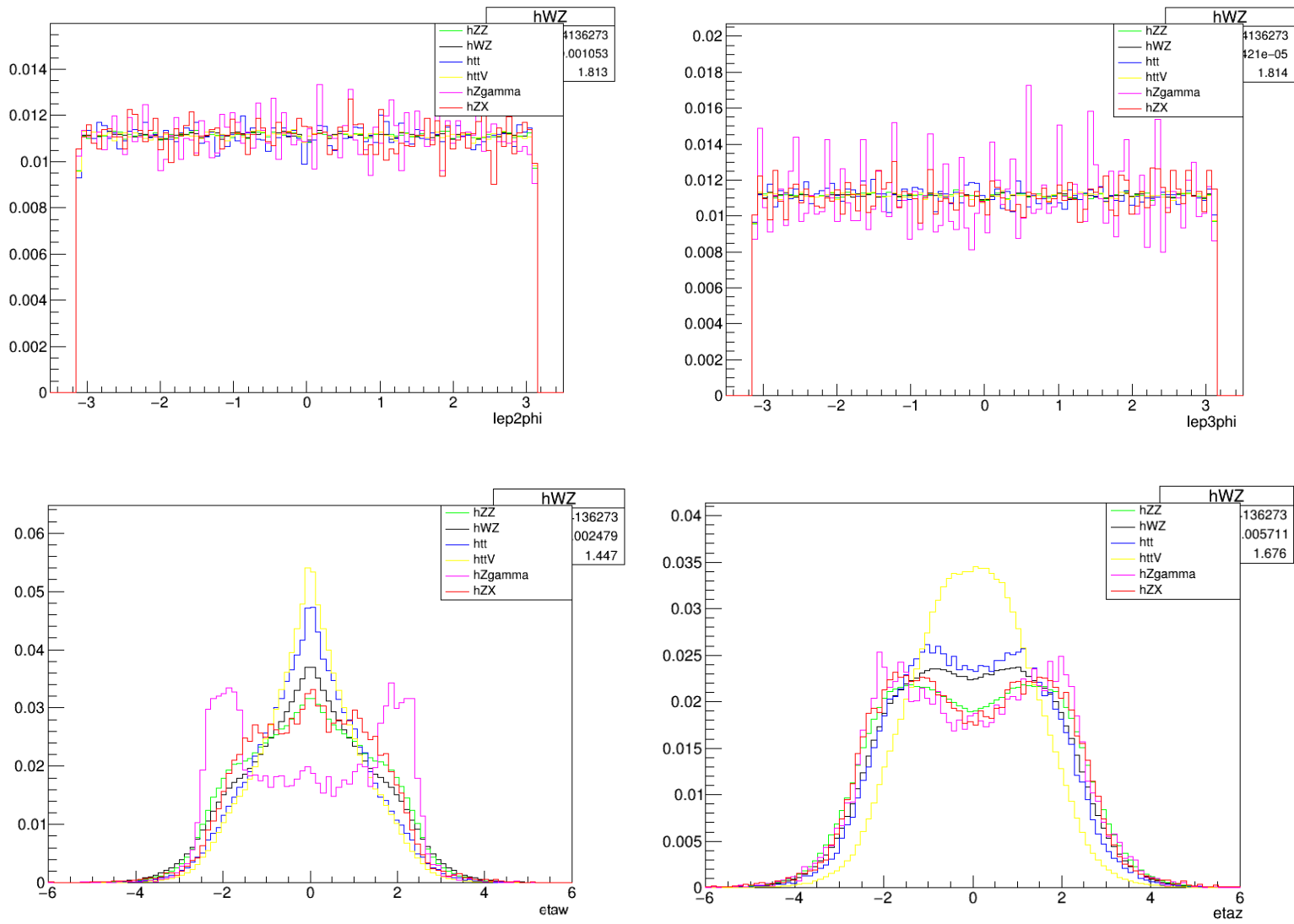
Εικόνα 5.12: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τη μάζα.



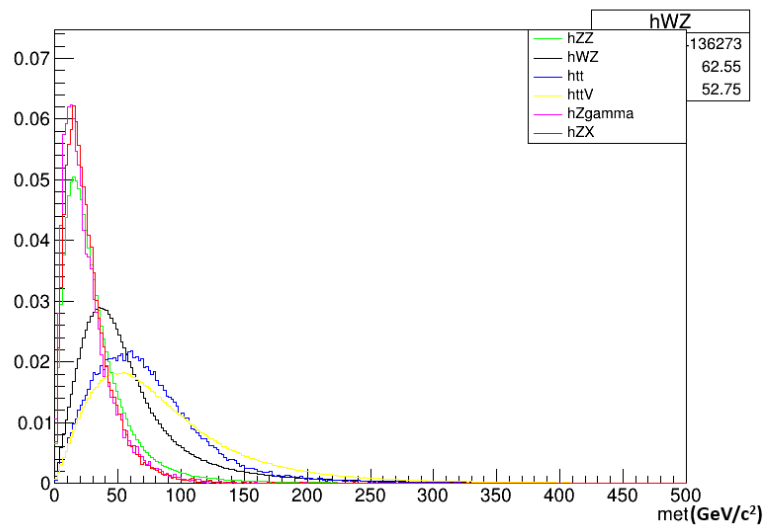


Εικόνα 5.13: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τις ορμές.

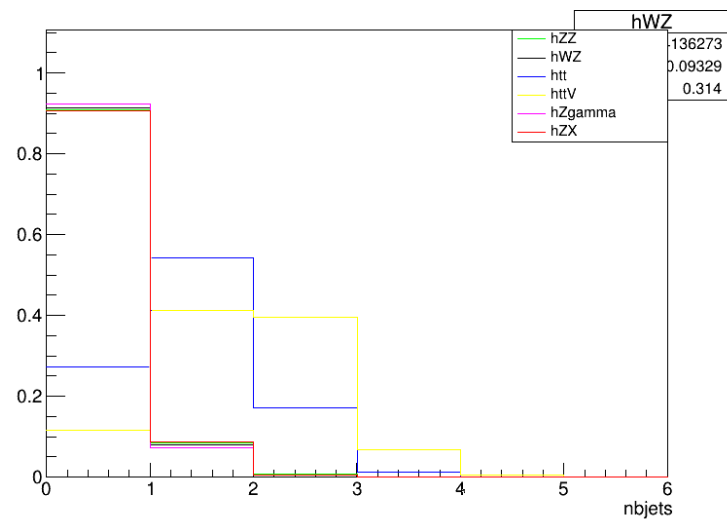
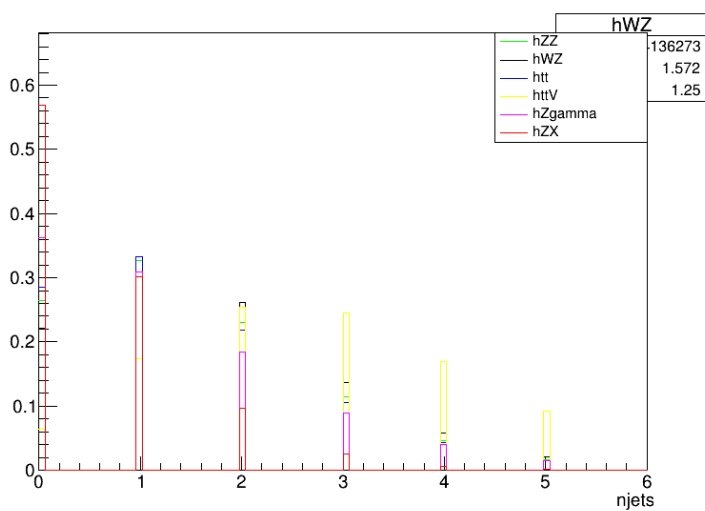




Εικόνα 5.14: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα που αφορούν μεταβλητές κατεύνησης.



5.15: Ιστόγραμμα κανονικοποιημένο στη μονάδα με την ελλείπουσα εγκάρσια ενέργεια



Εικόνα 5.16: Ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα με μεταβλητές που αφορούν τους πίδακες.

Παρατηρώντας τα stacked ιστογράμματα και τα ιστογράμματα κανονικοποιημένα στη μονάδα, μπορούμε να διακρίνουμε τη συνεισφορά κάθε καναλιού και να εφαρμόσουμε κριτήρια επιλογής με στόχο την αύξηση του λόγου σήματος προς υπόβαθρο. Έτσι, επιδιώκουμε να αφαιρέσουμε όσο το δυνατόν περισσότερα γεγονότα υποβάθρου, διατηρώντας παράλληλα τα γεγονότα σήματος.

Για παράδειγμα, εξετάζοντας τη μεταβλητή m_Z στις εικόνες 5.7 και 5.12, εφαρμόσαμε κριτήρια επιλογής για να συγκλίνουμε προς την πραγματική τιμή της μάζας του μποζονίου Z . Αρχικά, αφαιρέσαμε γεγονότα με τιμές πριν από 42 GeV και μετά από 138 GeV, προσαρμόζοντας αυτές τις τιμές για να βελτιστοποιήσουμε το λόγο σήμα/υπόβαθρο. Συνεχίζοντας, αποκλείσαμε γεγονότα πριν από 79 GeV και μετά από 105 GeV.

Στη μεταβλητή m_{tw} , όπως παρατηρήθηκε οπτικά στις ίδιες εικόνες, ξεκινήσαμε να αφαιρούμε γεγονότα με τιμές πριν από 5 GeV και συνεχίσαμε με βήμα 5 GeV μέχρι την τιμή 50 GeV. Για τη μεταβλητή m_{123} , επίσης βάσει των εικόνων 5.7 και 5.12, αφαιρέσαμε γεγονότα από 50 GeV και πριν, προχωρώντας με βήμα 10 GeV έως την τιμή 150 GeV.

Επιπλέον, στη μεταβλητή m_{wz} , εφαρμόσαμε κριτήρια επιλογής αφαιρώντας γεγονότα από 150 GeV και πριν, με βήμα 10 GeV έως την τιμή 170 GeV. Τέλος, στη μεταβλητή n_{bjets} , από τις εικόνες 5.11 και 5.16, αφαιρέσαμε γεγονότα από την τιμή 2 και μετά, και σε δεύτερο βήμα, από την τιμή 1 και μετά.

Συνοψίζοντας, μελετήσαμε οπτικά τα ιστογράμματα, τόσο τα stacked όσο και τα κανονικοποιημένα, για να διακρίνουμε τις κατανομές και να αξιολογήσουμε τη συνεισφορά κάθε καναλιού. Εφαρμόζοντας διάφορα κριτήρια επιλογής, καταλήξαμε σε αυτά που μεγιστοποιούν τον λόγο σήμα/υπόβαθρο, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη απομόνωση του σήματος.

5.4 Λόγος του σήματος προς υπόβαθρο

Στην ανάλυσή μας, καθώς εφαρμόζουμε διαδοχικά κριτήρια επιλογής στα δεδομένα μας, καθίσταται απαραίτητη η αξιολόγηση του λόγου σήματος προς υπόβαθρο (S/B) σε κάθε στάδιο. Αυτός ο λόγος παρέχει πολύτιμη εικόνα για την αποτελεσματικότητα των κριτηρίων

επιλογής μας όσον αφορά την απομόνωση του σήματος ενδιαφέροντος με παράλληλη ελαχιστοποίηση του υποβάθρου.

Για να απεικονίσουμε την επίδραση αυτών των κριτηρίων επιλογής στον λόγο S/B , κατασκευάζουμε ένα διάγραμμα του S/B σε σχέση με την τιμή του κριτηρίου επιλογής. Αυτή η γραφική αναπαράσταση μας επιτρέπει να παρακολουθούμε πώς εξελίσσεται ο λόγος S/B καθώς επιβάλλουμε όλο και πιο αυστηρά κριτήρια επιλογής.

5.4.1 ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ

Για να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματά μας σχετικά με την καθαρότητα του σήματος συντάξαμε έναν πίνακα που συνοψίζει τον αριθμό των γεγονότων που ανιχνεύθηκαν σε διάφορα κανάλια χωρίς την εφαρμογή κανενός κριτηρίου επιλογής. Αυτός ο πίνακας παρέχει μια σαφή κατανομή τόσο των συμβάντων σήματος όσο και του υποβάθρου, μαζί με βασικές μετρήσεις που αναδεικνύουν την ποιότητα και τη σημασία των δεδομένων μας.

Μάζα Z μποζονίου (M_Z)	
Κανάλι	Αριθμός Γεγονότων (Χωρίς Κριτήρια Επιλογής)
WZ (Signal)	25379.4 ± 39.9
ZX	10518.8 ± 99.4
ZZ	4578.29 ± 8.34
ttV	1377.02 ± 2.89
ttbar	7594.13 ± 32.14
Zγ	1870.96 ± 31.44
Total Background	25939.2 ± 109.5
S/B	0.9464 ± 0.0014
$S/\sqrt{S+B}$	109.259 ± 1.045

Πίνακας 5.1: Πίνακας με δεδομένα από διάφορα κανάλια και ο αριθμός των γεγονότων χωρίς περικοπές.

Ο πίνακας παρουσιάζει δεδομένα από διάφορα κανάλια και δείχνει τον αριθμό των γεγονότων χωρίς περικοπές. Το κανάλι "WZ (Signal)" έχει 24550 συμβάντα, υποδεικνύοντας τον αριθμό των συμβάντων σήματος που ανιχνεύθηκαν. Τα κανάλια υποβάθρου περιλαμβάνουν τα κανάλια "ZX" με 10519 γεγονότα, "ZZ" με 4578 γεγονότα, "ttV" με 1377 γεγονότα, "ttbar" με 7594 γεγονότα και "Zγ" με 1871 γεγονότα. Ο συνολικός αριθμός των γεγονότων υποβάθρου ανέρχεται σε 51319. Ο λόγος σήματος προς υπόβαθρο (S/B) είναι

0.9464, ο οποίος παρέχει ένα μέτρο της καθαρότητας του σήματος σε σύγκριση με το θόρυβο υποβάθρου. Επιπλέον, η σημαντικότητα, που αντιπροσωπεύεται από το $S/\sqrt{S+B}$, είναι 109.259. Αυτή η υψηλή τιμή σημαντικότητας υποδηλώνει ισχυρή ικανότητα διάκρισης του σήματος από το υπόβαθρο, καθιστώντας την ανάλυση ισχυρή και αξιόπιστη. Αυτός ο πίνακας είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόδοσης της διαδικασίας ανίχνευσης και της σαφήνειας με την οποία μπορεί να αναγνωριστεί το σήμα μέσα στο θόρυβο υποβάθρου.

Καθώς προχωράμε στην εφαρμογή διαφορετικών τιμών των κριτηρίων επιλογής παρατηρούμε διακυμάνσεις στον λόγο S/B , που αντικατοπτρίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της διατήρησης του σήματος και της καταστολής του υποβάθρου.

Με τη γραφική παράσταση του S/B σε σχέση με την τιμή των κριτηρίων επιλογής, αποκτούμε μια ολοκληρωμένη κατανόηση των συμβιβασμών που εμπλέκονται στην επιλογή των βέλτιστων ορίων κριτηρίων επιλογής. Αυτή η οπτική αναπαράσταση μας δίνει τη δυνατότητα να λαμβάνουμε τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποιες τιμές να δώσουμε προτεραιότητα και πώς να επιτύχουμε τη σωστή ισορροπία μεταξύ της καθαρότητας του σήματος και της στατιστικής σημαντικότητας.

Εν τέλει, το διάγραμμα S/B σε σχέση με το κριτήριο επιλογής χρησιμεύει ως οδικός χάρτης για τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής ανάλυσης, καθοδηγώντας μας προς τα κριτήρια επιλογής που μεγιστοποιούν τη σημαντικότητα του σήματος μας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τη μόλυνση υποβάθρου. Ενσαρκώνει την επαναληπτική φύση της ανάλυσης δεδομένων, όπου η συνεχής αξιολόγηση και η βελτίωση είναι το κλειδί για να ξεκλειδώσουμε σημαντικές πληροφορίες από το σύνολο δεδομένων μας.

Στην ολοκληρωμένη ανάλυσή μας, δημιουργήσαμε πέντε διαφορετικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία απεικονίζει τον λόγο σήματος προς το υπόβαθρο (S/B) ως συνάρτηση συγκεκριμένων κριτηρίων επιλογής. Αυτά τα διαγράμματα χρησιμεύουν ως ανεκτίμητα εργαλεία για την αξιολόγηση της επίδρασης των διαφόρων κριτηρίων επιλογής στην καθαρότητα του σήματος μας. Είναι σημαντικό να υπολογίσουμε και το σφάλμα σε κάθε μία

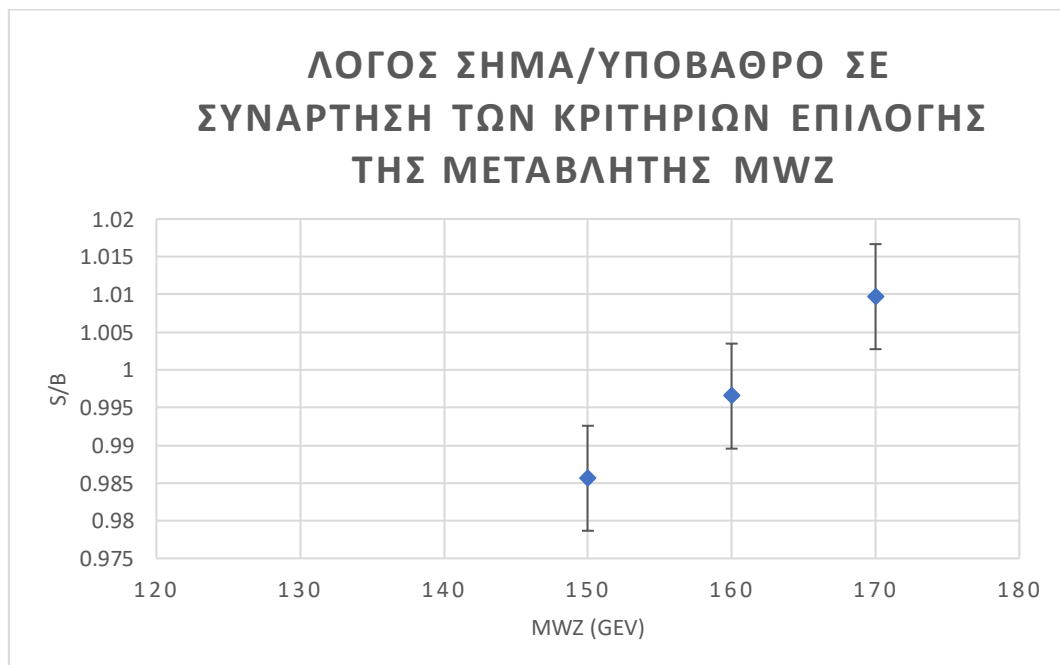
περίπτωση, το οποίο υπολογίζεται μέσω του τύπου (ορίζοντας τον λόγο S/B ως συνάρτηση f):

$$f = \frac{S}{B}$$

Άρα το σφάλμα υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\text{σφάλμα} = \sqrt{(\text{σφάλμα σήματος} * \frac{\partial f}{\partial S})^2 + (\text{σφάλμα υποβάθρου} * \frac{\partial f}{\partial B})^2}$$

Το πρώτο διάγραμμα εξετάζει τον λόγο S/B ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής για την αναλλοίωτη μάζα του συστήματος WZ .

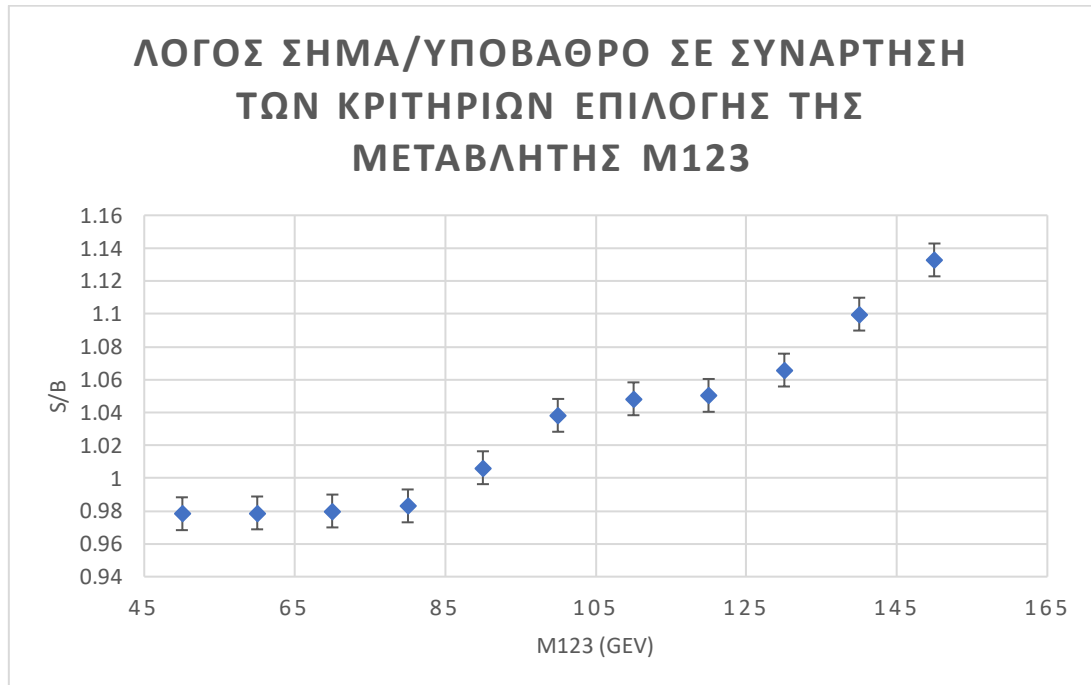


Εικόνα 5.17: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής mwz μετρημένη σε GeV.

Εδώ, παρατηρούμε πώς μεταβάλλοντας το κατώφλι για την αναλλοίωτη μάζα του WZ επηρεάζει την ισορροπία μεταξύ γεγονότων σήματος και υποβάθρου. Ρυθμίζοντας αυτό το κριτήριο επιλογής, μπορούμε να ενισχύσουμε αποτελεσματικά την καθαρότητα του σήματος, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τη μόλυνση υποβάθρου.

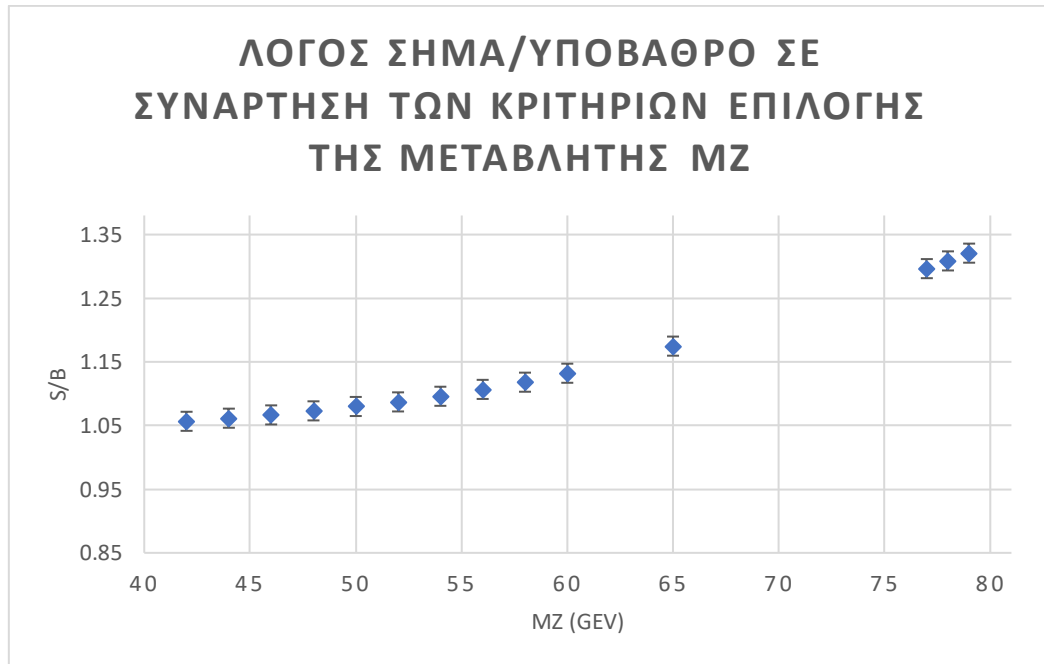
Συνεχίζοντας, το δεύτερο διάγραμμα διερευνά τη σχέση μεταξύ του λόγου S/B και του m_{123} . Αυτή η μεταβλητή αντιπροσωπεύει την αναλλοίωτη μάζα του συστήματος που

αποτελείται από τρία λεπτόνια. Η ανάλυση του λόγου S/B ως συνάρτηση αυτού του κριτηρίου επιλογής μας επιτρέπει να βελτιστοποιήσουμε τα κριτήρια επιλογής μας για την απομόνωση των γεγονότων ενδιαφέροντος.



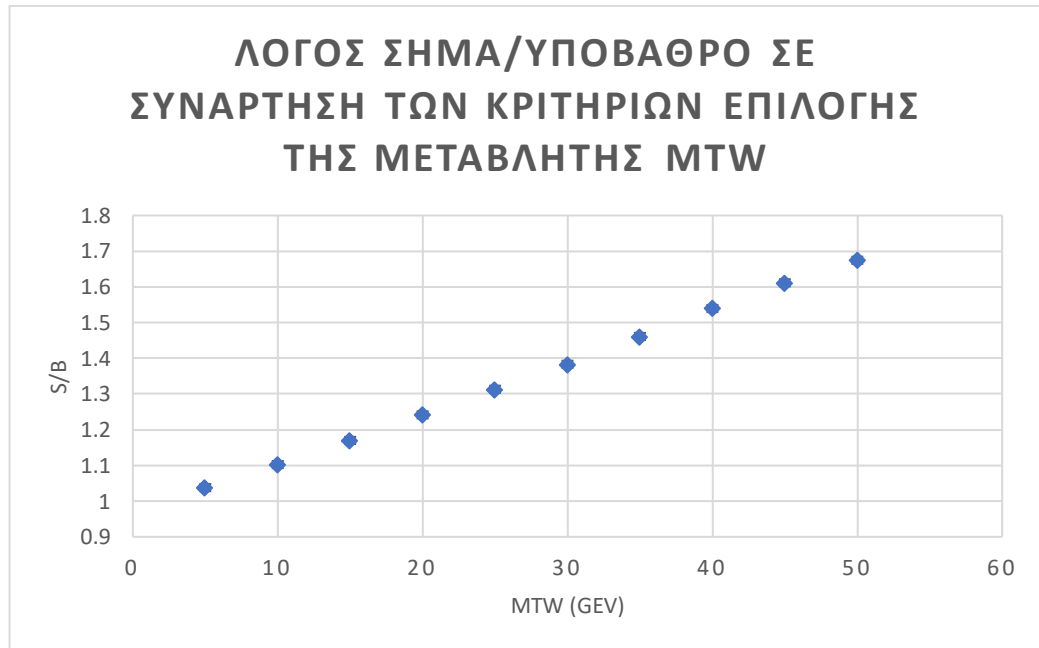
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής m_{123} μετρημένη σε GeV.

Στη συνέχεια, εμβαθύνουμε στην επίδραση των κριτηρίων επιλογής για τη μεταβλητή m_Z . Αυτή η μεταβλητή αντιστοιχεί στην αναλλοίωτη μάζα του Z και η βελτιστοποίησή της είναι κρίσιμη για την ενίσχυση της καθαρότητας του ZZ , μειώνοντας παράλληλα τις συνεισφορές υποβάθρου.



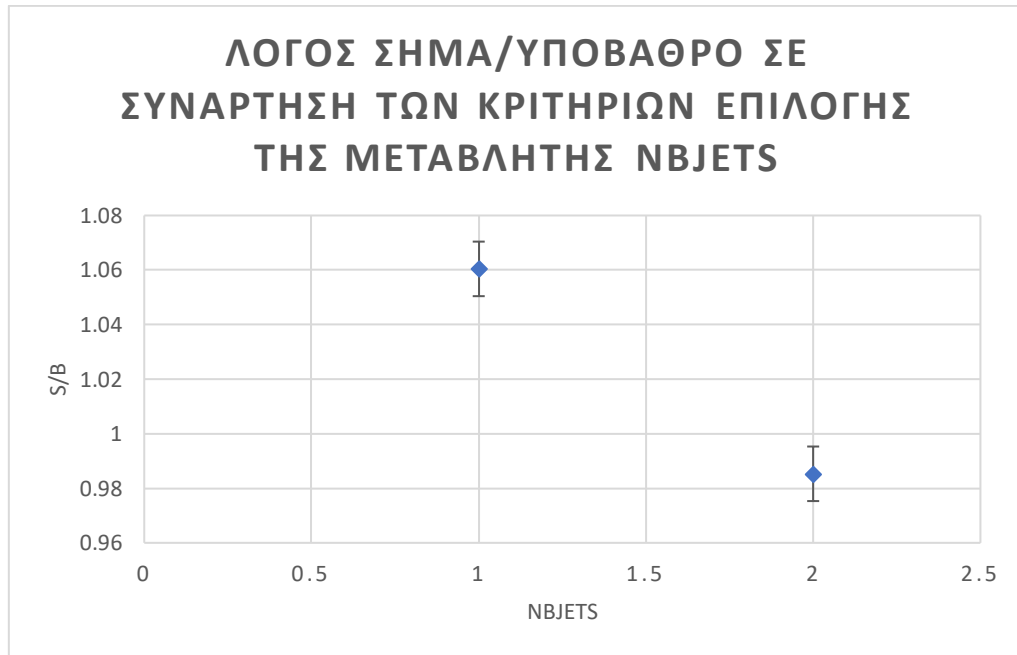
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής m_Z μετρημένη σε GeV.

Στο τέταρτο διάγραμμα, διερευνούμε πώς μεταβάλλεται ο λόγος S/B με το m_{TW} κριτήριο επιλογής. Αυτή η μεταβλητή αντιπροσωπεύει την αναλλοίωτη μάζα του W και παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάκριση των συμβάντων σήματος από το θόρυβο υποβάθρου.



Εικόνα 5.20: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής mtw.

Τέλος, αξιολογούμε την επίδραση του αριθμού των πιδάκων που προκύπτουν από b quark (nbjets) στον λόγο S/B. Αντί να βελτιώσουμε την καθαρότητα του σήματος μας, παρατηρούμε ότι η μείωση του αριθμού των πιδάκων σε αυτό το κριτήριο επιλογής οδηγεί σε πτώση του λόγου S/B, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



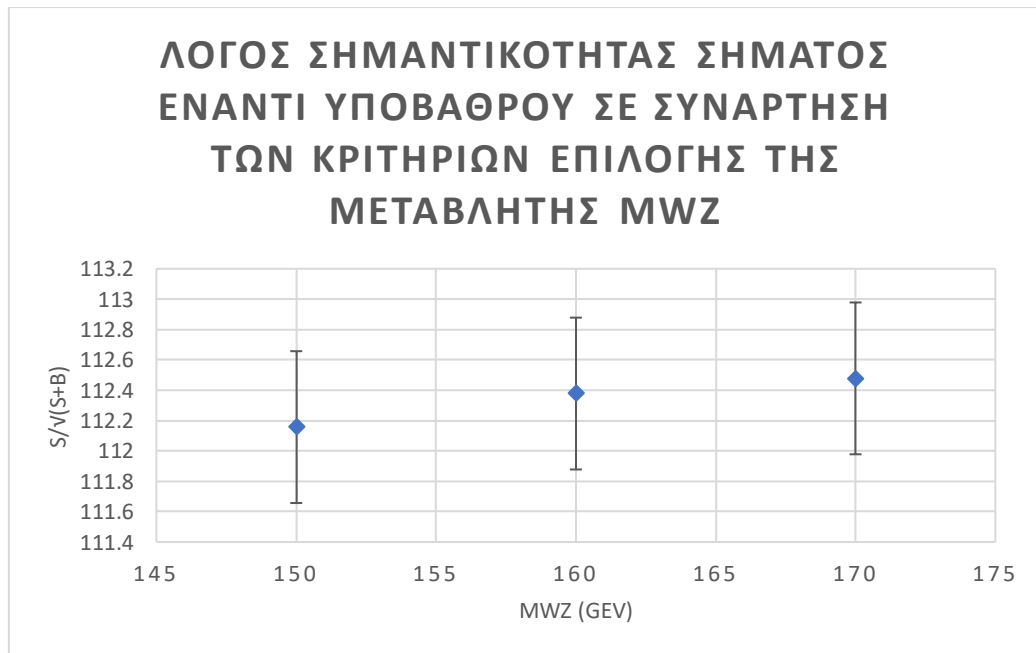
Εικόνα 5.21: Διάγραμμα του λόγου S/B σε συνάρτηση με τα κριτήρια επιλογής της μεταβλητής nbjets.

Μαζί, αυτά τα διαγράμματα προσφέρουν μια ολοκληρωμένη άποψη για το πώς διαφορετικά κριτήρια επιλογής επηρεάζουν την καθαρότητα του σήματος μας σε σχέση με τη μόλυνση υποβάθρου. Αναλύοντας αυτές τις σχέσεις, μπορούμε να βελτιώσουμε τα κριτήρια επιλογής μας για να μεγιστοποιήσουμε τη σημασία των αποτελεσμάτων μας.

Στην ανάλυσή μας, δημιουργήσαμε πέντε διαγράμματα που δείχνουν $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ έναντι διαφορετικών μεταβλητών αποκοπής: m_Z , m_{TW} , m_{123} , m_{WZ} και nbjets. Αυτά τα διαγράμματα είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της σημασίας του σήματος μας σε σχέση με το υπόβαθρο σε διάφορα κριτήρια επιλογής. Η σημαντικότητα $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ αντιπροσωπεύει πόσο καλά μπορούμε να διακρίνουμε τα γεγονότα σήμα μας (S) από το υπόβαθρο (B) σε κάθε σενάριο. Με την απεικόνιση αυτής της μετρικής σε σχέση με διάφορες μεταβλητές αποκοπής, μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς αλλάζει η σημασία του σήματος καθώς εφαρμόζουμε διαφορετικά κριτήρια επιλογής.

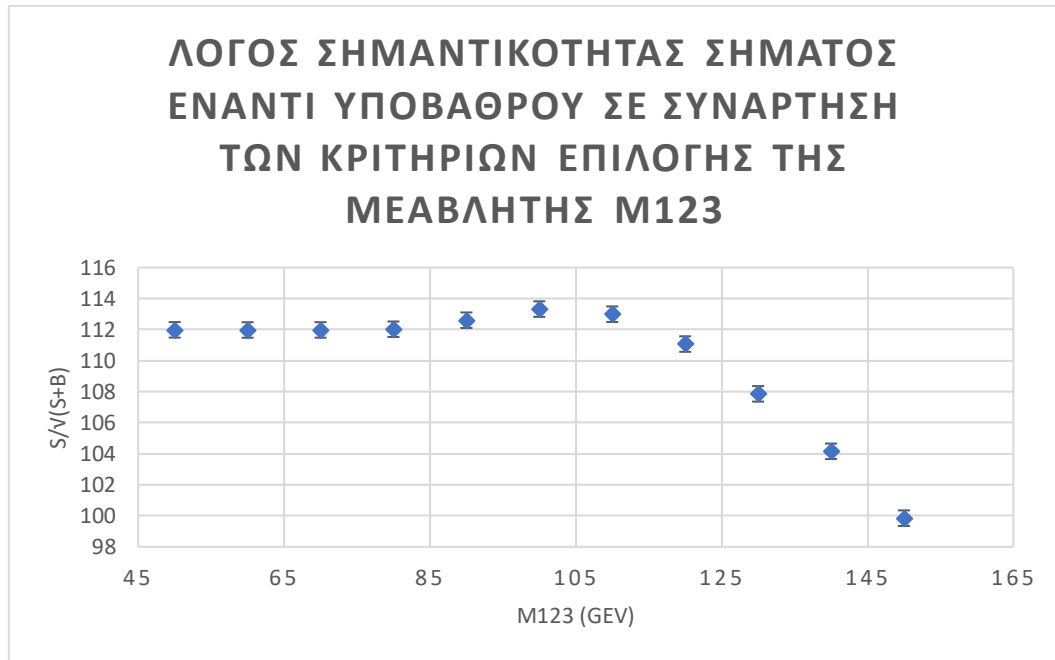
Η ανάλυση αυτών των διαγραμμάτων παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα κάθε μεταβλητής αποκοπής στην ενίσχυση του λόγου σήματος προς υπόβαθρο.

Το πρώτο διάγραμμα εξετάζει τον λόγο $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής για το mwz



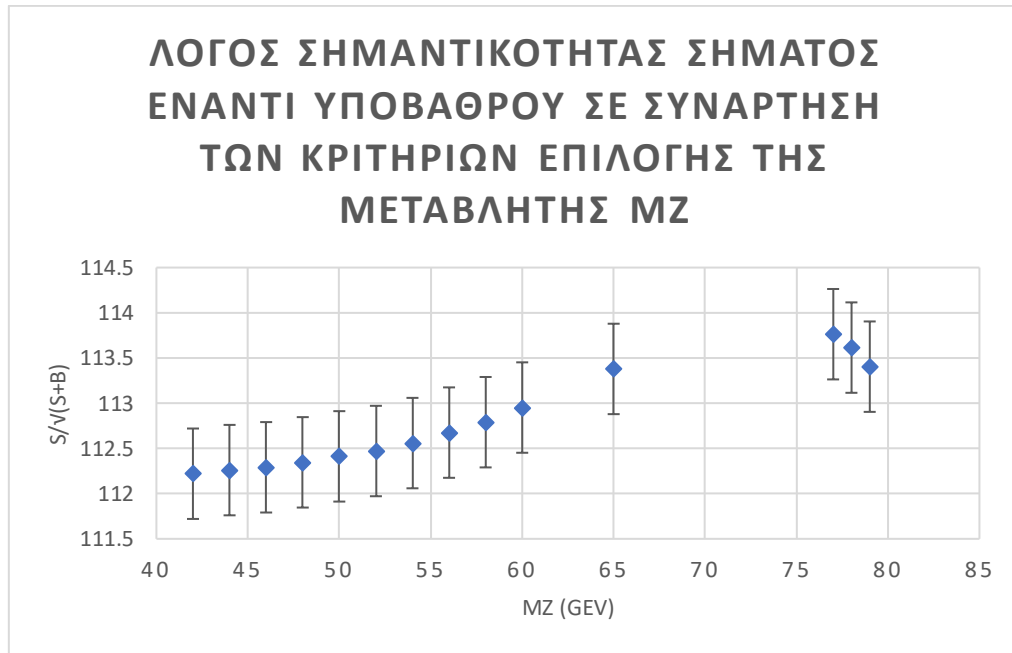
Εικόνα 5.22: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής mwz μετρημένη σε GeV.

Συνεχίζοντας, το δεύτερο διάγραμμα διερευνά τη σχέση μεταξύ του λόγου $\frac{S}{\sqrt{(S+B)}}$ και του m123.



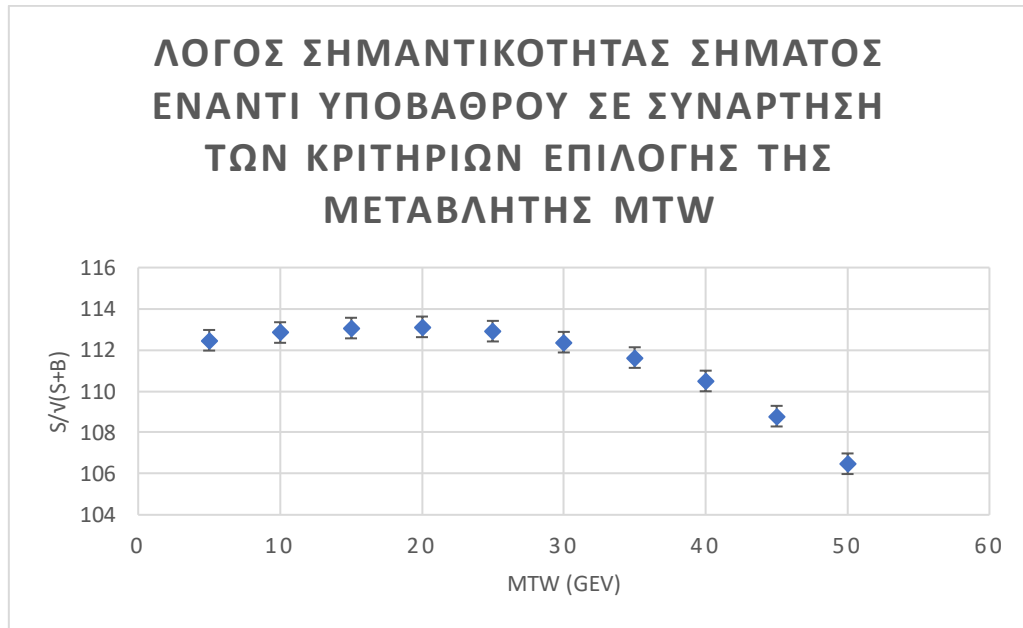
Εικόνα 5.23: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_{123} μετρημένη σε GeV.

Στη συνέχεια, εμβαθύνουμε στην επίδραση των κριτηρίων επιλογής για τη μεταβλητή m_z .



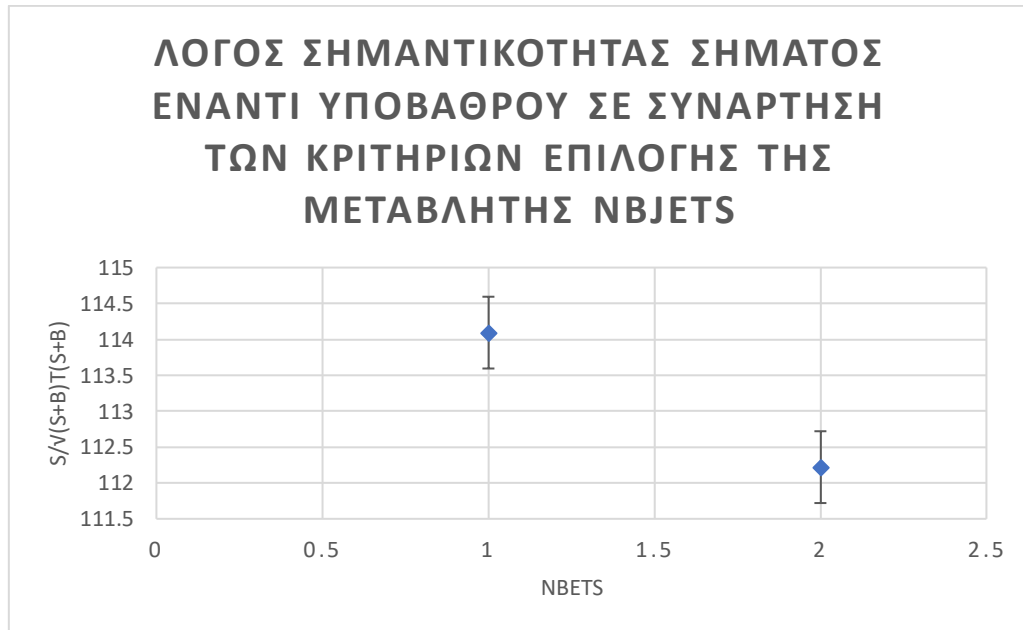
Εικόνα 5.24: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής m_Z μετρούμενη σε GeV.

Στο τέταρτο διάγραμμα, διερευνούμε πώς μεταβάλλεται ο λόγος $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ με το $m_{\tau\tau}$ κριτήριο επιλογής.



Εικόνα 5.25: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής mtw μετρημένη σε GeV.

Τέλος, αξιολογούμε την επίδραση του αριθμού των πιδάκων που προκύπτουν από b quark (nbjets) κριτήριο επιλογής του λόγου $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$.



Εικόνα 5.26: Διάγραμμα του λόγου $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ ως συνάρτηση των κριτηρίων επιλογής της μεταβλητής nbjets.

Συνολικά, αυτά τα διαγράμματα βοηθούν στην καθοδήγηση της επιλογής των βέλτιστων τιμών αποκοπής, επιτρέποντάς μας να μεγιστοποιήσουμε τη σημασία του σήματος και να ενισχύσουμε την ευαισθησία της ανάλυσής μας στα φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν.

Η παρατηρούμενη τάση στον λόγο σήματος προς υπόβαθρο (S/B) και στη σημαντικότητα $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ ως συνάρτηση των εφαρμοζόμενων κριτηρίων επιλογής υπογραμμίζει τον στρατηγικό ρόλο αυτών των κριτηρίων επιλογής στην ενίσχυση της ευαισθησίας της ανάλυσης. Καθώς επιβάλλεται κάθε κριτήριο επιλογής, ο λόγος S/B αυξάνεται σταθερά, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη καθαρότητα των συμβάντων σήματος σε σχέση με το υπόβαθρο. Αυτό υποδηλώνει ότι τα επιλεγμένα κριτήρια επιλογής διακρίνουν αποτελεσματικά τα συμβάντα υποβάθρου, επιτρέποντας στο σήμα να ξεχωρίζει πιο έντονα.

Επιπλέον, η αύξηση της σημαντικότητας $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$ με κάθε εφαρμοζόμενο κριτήριο επιλογής σηματοδοτεί βελτίωση της ευαισθησίας της ανάλυσης στο σήμα σε σχέση με τη στατιστική αβεβαιότητα που προκύπτει τόσο από τη συνεισφορά του σήματος όσο και από τη συνεισφορά του υποβάθρου. Αυτή η ενίσχυση της σημαντικότητας υποδηλώνει ότι τα επιλεγμένα κριτήρια επιλογής όχι μόνο ενισχύουν την καθαρότητα του σήματος αλλά και

μειώνουν αποτελεσματικά την επίδραση των στατιστικών διακυμάνσεων, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική ανιχνευσιμότητα του σήματος μέσα στο θόρυβο υποβάθρου.

Συνοπτικά, τα παρατηρούμενα μοτίβα αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των επιλεγμένων κριτηρίων επιλογής στην απομόνωση των συμβάντων σήματος από το υπόβαθρο και στη βελτίωση της ευαισθησίας της ανάλυσης, διευκολύνοντας έτσι την εξαγωγή ουσιαστικών αποτελεσμάτων από τα δεδομένα.

Ως παράδειγμα αποτελεσμάτων, ο παρακάτω πίνακας κατασκευάστηκε για να καταδείξει τη μεταβολή των τιμών που αφορούν τη μάζα του μποζονίου Z (M_Z), η οποία χρησιμεύει ως κριτήριο στην ανάλυση της διάσπασης του σήματος WZ σε τρία λεπτόνια και ένα νεutrino. Τα παρεχόμενα δεδομένα περιλαμβάνουν τις μετρήσεις συμβάντων σήματος και υποβάθρου, καθώς και τις αναλογίες και τη σημαντικότητά τους, σε διάφορα εύρη του κριτηρίου M_Z . Η κατασκευή αυτού του πίνακα έχει ως κίνητρο την ανάγκη να παρουσιαστεί η εξάρτηση διαφόρων παραμέτρων από τη μάζα του μποζονίου Z (M_Z), ειδικά όσον αφορά την ανάλυση της διάσπασης του σήματος WZ σε τρία λεπτόνια και ένα νεutrino.

Παρατηρώντας τις τάσεις σε διαφορετικά εύρη κριτηρίου M_Z , είναι προφανές ότι καθώς το εύρος στενεύει, τόσο ο αριθμός των συμβάντων σήματος όσο και ο αριθμός των συμβάντων υποβάθρου μειώνονται. Αυτή η μείωση του αριθμού των συμβάντων οδηγεί σε υψηλότερους λόγους S/B και σημαντικότητες σήματος, υποδεικνύοντας βελτιωμένη ευαισθησία στο σήμα WZ εντός στενότερων περιοχών M_Z . Το φαινόμενο αυτό υπογραμμίζει τη σημασία των ακριβών κριτηρίων επιλογής M_Z για την αποτελεσματική απομόνωση του σήματος WZ από το θόρυβο υποβάθρου.

Μάζα Z μιονίου (MZ)				
Τιμή Κριτηρίου (GeV)	Αριθμός Γεγονότων σήματος (Signal)	Αριθμός Γεγονότων υποβάθρου (Background)	S/B	$S/\sqrt{S+B}$
42 έως 138	24511.5 ± 39.2	23197.6 ± 106.7	1.0566 ± 0.004	112.22 ± 0.08
44 έως 136	24474 ± 39	23055.2 ± 106.6	1.061 ± 0.004	112.26 ± 0.08
46 έως 134	24430.5 ± 39.2	22903.4 ± 106.4	1.066 ± 0.004	112.291 ± 0.090
48 έως 132	24384.2 ± 39.1	22724.7 ± 106.2	1.073 ± 0.004	112.346 ± 0.090
50 έως 130	24337.8 ± 39.1	22536.71 ± 106.08	1.079 ± 0.004	112.412 ± 0.090
52 έως 128	24285.7 ± 39.1	22339.8 ± 105.8	1.087 ± 0.005	112.471 ± 0.090
54 έως 126	24229.9 ± 39.1	22108.6 ± 105.5	1.095 ± 0.005	112.559 ± 0.090
56 έως 124	24166.52 ± 39.07	21835 ± 105	1.106 ± 0.005	112.675 ± 0.091
58 έως 122	24099.33 ± 39.04	21553.6 ± 104.8	1.118 ± 0.005	112.79 ± 0.091
60 έως 120	24026.84 ± 39.01	21221.9 ± 104.3	1.132 ± 0.005	112.952 ± 0.091
65 έως 115	23797.5 ± 38.8	20257.6 ± 102.5	1.174 ± 0.005	113.379 ± 0.092
77 έως 107	22924.4 ± 38.4	17682 ± 98	1.296 ± 0.005	113.763 ± 0.095
78 έως 106	22772.5 ± 38.3	17401.9 ± 97.5	1.308 ± 0.005	113.615 ± 0.095
79 έως 105	22597.2 ± 38.2	17108.6 ± 97.1	1.321 ± 0.005	113.404 ± 0.095

Πίνακας 5.2: Απόδοση Διαφόρων Κριτηρίων Επιλογής για τη Μάζα του Z Μιονίου (MZ) σε Όρους Αριθμού Γεγονότων Σήματος, Υποβάθρου, S/B, και $S/\sqrt{S+B}$.

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το baseline, δηλαδή η αναφορά του λόγου S/B (σήμα προς υπόβαθρο) χωρίς την εφαρμογή οποιουδήποτε κριτηρίου επιλογής, είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επιλογών που εφαρμόζουμε στις μεταβλητές. Για παράδειγμα, ο λόγος S/B χωρίς κανένα κριτήριο επιλογής είναι ίσος με 0.946 ο λόγος S/B με εφαρμογή κριτηρίου στη μεταβλητή m_{WZ} (κρατάμε μόνο δεδομένα με τιμές κάτω από 150 GeV) είναι ίσος με 0.986 υπολογίζουμε:

$$\frac{0.986 - 0.946}{0.946} * 100\% = 4.138\%$$

Ανφέροντας αυτή τη σχετική αύξηση αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα των κριτηρίων επιλογής στη βελτίωση του λόγου S/B και στην ενίσχυση της διακριτικής ικανότητας του σήματος προς το υπόβαθρο. Αυτή η πληροφορία είναι σημαντική γιατί τεκμηριώνει την επιτυχία των εφαρμοζόμενων επιλογών στη βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Η αναφορά αυτής της βελτίωσης όχι μόνο ενισχύει την αξιοπιστία της ανάλυσης, αλλά και επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα των μεταβλητών, έτσι λοιπόν φτιάχνουμε έναν πίνακα όπου γίνονται αυτές οι πράξεις:

$$\frac{\frac{S}{b} \text{ κριτηρίου επιλογής} - \frac{S}{b} \text{ χωρίς κανένα κριτήριο επιλογής}}{\frac{S}{b} \text{ χωρίς κανένα κριτήριο επιλογής}} * 100\%$$

Κριτήρια επιλογής για τη μεταβλητή m_{WZ} :

$m_{WZ} > 150$ GeV	4%
$m_{WZ} > 160$ GeV	5%
$m_{WZ} > 170$ GeV	7%

Πίνακας 5.3: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή m_{WZ}

Κριτήρια επιλογής για τη μεταβλητή m_{123} :

$m_{123} > 50$ GeV	3%
$m_{123} > 60$ GeV	3%
$m_{123} > 70$ GeV	4%
$m_{123} > 80$ GeV	4%
$m_{123} > 90$ GeV	6%

$m_{123} > 100 \text{ GeV}$	10%
$m_{123} > 110 \text{ GeV}$	11%
$m_{123} > 120 \text{ GeV}$	11%
$m_{123} > 130 \text{ GeV}$	13%
$m_{123} > 140 \text{ GeV}$	16%
$m_{123} > 150 \text{ GeV}$	20%

Πίνακας 5.4: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή m_{123} .

Κριτήρια επιλογής για τη μεταβλητή m_z :

$42 \text{ GeV} < m_z < 138 \text{ GeV}$	12%
$44 \text{ GeV} < m_z < 136 \text{ GeV}$	12%
$46 \text{ GeV} < m_z < 134 \text{ GeV}$	13%
$48 \text{ GeV} < m_z < 132 \text{ GeV}$	13%
$50 \text{ GeV} < m_z < 130 \text{ GeV}$	14%
$52 \text{ GeV} < m_z < 128 \text{ GeV}$	15%
$54 \text{ GeV} < m_z < 126 \text{ GeV}$	16%
$56 \text{ GeV} < m_z < 124 \text{ GeV}$	17%
$58 \text{ GeV} < m_z < 122 \text{ GeV}$	18%
$60 \text{ GeV} < m_z < 120 \text{ GeV}$	20%
$65 \text{ GeV} < m_z < 115 \text{ GeV}$	24%
$77 \text{ GeV} < m_z < 107 \text{ GeV}$	37%
$78 \text{ GeV} < m_z < 106 \text{ GeV}$	38%
$79 \text{ GeV} < m_z < 105 \text{ GeV}$	40%

Πίνακας 5.5: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή m_z .

Κριτήρια επιλογής για τη μεταβλητή m_{tw} :

$m_{tw} > 5$	10%
$m_{tw} > 10$	16%
$m_{tw} > 15$	24%
$m_{tw} > 20$	31%
$m_{tw} > 25$	39%
$m_{tw} > 30$	46%
$m_{tw} > 35$	54%
$m_{tw} > 40$	63%
$m_{tw} > 45$	70%
$m_{tw} > 50$	77%

Πίνακας 5.6: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή m_{tw} .

Κριτήρια επιλογής για τη μεταβλητή n_{bjets} :

$n_{bjets} < 1$	12%
-----------------	-----

$n_{bjets} < 2$	4%
-----------------	----

Πίνακας 5.7: Ποσοτική Αύξηση του Λόγου S/B για τη Μεταβλητή

Η ανάλυση των δεδομένων και η σύγκριση των λόγων S/B με και χωρίς την εφαρμογή κριτηρίων επιλογής ανέδειξαν τη σημαντική βελτίωση στη διακριτική ικανότητα του σήματος από το υπόβαθρο. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή των κριτηρίων επιλογής στις μεταβλητές m_{WZ} , m_{123} , m_Z , m_{TW} , και n_{bjets} έδειξε σχετική αύξηση του S/B, που κυμαίνεται από 3% έως 77%. Για παράδειγμα, η εφαρμογή του κριτηρίου $m_{WZ} > 150 \text{ GeV}$ οδήγησε σε αύξηση 4%, ενώ το κριτήριο $m_{TW} > 50$ οδήγησε σε αύξηση 77%. Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων κριτηρίων επιλογής στη βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Η αναφορά αυτών των βελτιώσεων όχι μόνο ενισχύει την αξιοπιστία της ανάλυσης αλλά και επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα των μεταβλητών στη βελτιστοποίηση των ερευνητικών μεθόδων.

Συμπερασματικά, η παρούσα μελέτη παρείχε μια ολοκληρωμένη ανάλυση της παραγωγής της διμποζονικής κατάστασης WZ στο πλαίσιο των πειραμάτων σωματιδιακής φυσικής, εστιάζοντας στον πλήρη λεπτονικό τρόπο διάσπασής του που περιλαμβάνει τρία λεπτόνια και ένα νετρίνο. Με την εξέταση των αναλογιών σήματος προς υπόβαθρο και τη σημασία σε διαφορετικές περιοχές κριτηρίων αποκτήθηκαν γνώσεις σχετικά με την πειραματική ευαισθησία στο σήμα WZ. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία των ακριβών κριτηρίων επιλογής δεδομένων και των αυστηρών τεχνικών ανάλυσης για την ενίσχυση της ικανότητας του πειράματος να διακρίνει σπάνιες διεργασίες μέσα στο θόρυβο υποβάθρου. Επιπλέον, τα ευρήματα συμβάλλουν στην ευρύτερη κατανόηση των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων και ιδιοτήτων των σωματιδίων, προωθώντας τους στόχους της έρευνας της σωματιδιακής φυσικής στον LHC και συγκεκριμένα στο πλαίσιο του πειράματος ATLAS. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να βασιστούν σε αυτά τα ευρήματα για να βελτιώσουν τις πειραματικές μεθοδολογίες και να εμβαθύνουν στη διερεύνηση των φαινομένων της σωματιδιακής φυσικής.

Βιβλιογραφία

- [1] Thomson (2013), Particle Physics,
- [2] Weinberg (1967), A model of leptons, Rev. Phys. Lett. 19
- [3] Mary K., Gaillard, Paul D. Grannis, and Frank J. Sciulli (1999), The Standard Model of Particle Physics, Rev. Mod. Phys. 71, S96
- [4] Cambridge University Press (2007), An Introduction to the Standard Model of Particle Physics,
- [5] Glashow S.L. (1961), Nuclear Physics,
- [6] Epelbaum (2009), Modern Theory of nuclear forces, Rev. Mod. Phys. 81.1773
- [7] <https://home.cern/science/physics/standard-model>
- [8] Griffiths, D. Introduction to Elementary Particles.
- [9] Wilczek, Frank, 2005, "Asymptotic freedom: From paradox to paradigm." *Reviews of Modern Physics*, vol. 77, no. 3.
- [10] https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=XI5hDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=w+and+z+bosons&ots=3vxzw9cSfd&sig=PNHEPgGd3g9hVH-IRVhmjKeAqwl&redir_esc=y#v=onepage&q=w%20and%20z%20bosons&f=false
- [11] <https://home.cern/science/physics/z-boson>
- [12] <https://home.cern/news/press-release/physics/improved-atlas-result-weighs-w-boson>
- [13] <https://atlas.cern/updates/briefing/mesons-and-bosons>
- [14] [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Radically_Modern_Introductory_Physics_Text_II_\(Raymond\)/20%3A_The_Standard_Model/20.03%3A_The_Electroweak_Theory](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Radically_Modern_Introductory_Physics_Text_II_(Raymond)/20%3A_The_Standard_Model/20.03%3A_The_Electroweak_Theory)
- [15] Michael E. Peskin and Schroeder V. (1995), An Introduction to Quantum Field Theory

- [16] ATLAS Collaboration (2016), Search for resonant $WZ \rightarrow l\nu l l$ production using $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$ pp collisions with ATLAS
- [17] Campbell J.M., Ellis R.K., and Williams C., (2011), Vector boson Pair Production at the LHC, JHEP 1107
- [18] Khachatryan, V. et al, (2016), Measurement of the WZ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV and search for anomalous triple gauge couplings at $\sqrt{s}=8$ TeV, arXiv:1609.05721CMS-SMP-14-014CERN-EP-2016-205
- [19] ATLAS Collaboration (2018), LHC prospects for diboson resonance searches and electroweak vector boson scattering in the $WW/WZ \rightarrow l\nu qq$ final state
- [20] <https://www.osti.gov/servlets/purl/1602990>
- [21] <https://cds.cern.ch/record/2809109/files/CERN-Brochure-2021-004-Eng.pdf>
- [22] <https://home.cern/science/accelerators/high-luminosity-lhc>
- [23] Particle Data Group (2022). Review of Particle Physics.
- [24] Wiedemann, H. (2015). Particle Accelerator Physics. Springer.
- [25] Ellis, J., & Wells, J.D. (2018). The Discovery of the Higgs Boson.
- [26] CERN. (n.d.). The Large Hadron Collider.
- [27] ATLAS Collaboration (2016), Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$ using the ATLAS detector at the LHC, Eur. Phys. J.C 76: 653
- [28] C. Moller, K. Danske Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd., 23, 1 (1945).
- [29]
- [30] Media and Press Relations (Press release). CERN. 30 November 2009.
- [31] The Hindu. (2010) Associated Press.
- [32] Media and Press Relations (Press release). CERN. 8 November 2010.
- [33] Media and Press Relations (Press release). CERN. 13 February 2012.
- [34] Media and Press Relations (Press release). CERN. 17 December 2012.
- [35] cern.ch. Retrieved 28 August 2015.

- [36] "LHC 2015 – latest news". cern.ch. Retrieved 19 January 2016.
- [37] "Restarting the LHC: Why 13 TeV?". CERN. Retrieved 28 August 2015.
- [38] "LHC Report: end of 2016 proton–proton operation". 31 October 2016. Retrieved 27 January 2017.
- [39] Keane, Sean (22 April 2022). "CERN's Large Hadron Collider Restarts After Three-Year Upgrade"
- [40] <https://home.cern/science/experiments/atlas>
- [41] Wolfgang S., and Fras M. (2023), Digital Readout of the ATLAS Muon Spectrometer
- [42] Zeppenfeld D., (2018), Unitarization Models for vector boson scattering at the LHC.
- [43] ATLAS Collaboration (2016), Measurements of WZ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings
- [44] Hallsjo Sven-Patrik, (2014), Search for Dark Matter in the upgraded High Luminosity LHC at CERN, DOI:10.13140/RG.2.1.2837.4481
- [45] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>
- [46] <https://home.cern/science/experiments/atlas>
- [47] Wolfgang S., and Fras M. (2023), Digital Readout of the ATLAS Muon Spectrometer
- [48] Zeppenfeld D., (2018), Unitarization Models for vector boson scattering at the LHC.
- [49] ATLAS Collaboration (2016), Measurements of WZ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings
- [50]
- [51] Hallsjo Sven-Patrik, (2014), Search for Dark Matter in the upgraded High Luminosity LHC at CERN, DOI:10.13140/RG.2.1.2837.4481
- [52] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>
- [53] ATLAS Collaboration (2008), The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3.

- [54] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Calorimeter>
- [55] ATLAS Collaboration (1999), ATLAS: Detector and physics performance technical design report
- [56] https://indico.cern.ch/event/897634/contributions/3943446/attachments/2075809/3485586/WarwickWeek2020_Calorimeters.pdf
- [57] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Muon-Spectrometer>
- [58] ATLAS Collaboration (1997), ATLAS muon spectrometer: Technical Design Report
- [59] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Trigger-DAQ>
- [60] https://indico.cern.ch/event/897634/contributions/3943446/attachments/2075809/3485586/WarwickWeek2020_Calorimeters.pdf
- [61] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Muon-Spectrometer>
- [62] ATLAS Collaboration (1997), ATLAS muon spectrometer: Technical Design Report
- [63] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Trigger-DAQ>
- [64] <https://atlas.cern/Discover/Detector/Magnet-System>
- [65] ATLAS Collaboration (2011), Charged-particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC, New J. Phys. 13
- [66] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam, Gregory Soyez (2008), The anti-k_t jet clustering algorithm
- [67] Matheus Martines, O. J. P. Éboli, M. C. Gonzalez-Garcia, 2023, Bounds on Quartic Gauge Couplings in HEFT from Electroweak Gauge Boson Pair Production at the LHC
- [68] <https://root.cern.ch/>
- [69] Geant4 - A Simulation Toolkit, S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-30

