



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Φυσικής

Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων

## Πτυχιακή Εργασία

Μελέτη του αλγορίθμου ανακατασκευής μιονικών τροχιών στο κεντρικό τμήμα  
του ανιχνευτή CMS και της αποτελεσματικότητάς του στην εύρεση ζευγών  
τροχιών μεγάλης εγγύτητας

Παναγιώτης Εγγλέζος  
Α.Μ. 1110201500050

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Βελλίδης [Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.]

Αθήνα, 2020

# Περίληψη

Ο Σκανδαλιστής Πρώτου Επιπέδου του πειράματος CMS στο Μεγάλο Συγκρουστή Αδρονίων (LHC) του CERN χρειάζεται αναβάθμιση για να καλύψει τις αυξημένες απαιτήσεις της Φάσης 2 του πειράματος, η οποία θα ξεκινήσει το 2027. Ο Σκανδαλιστής Μιονίων στην κεντρική περιοχή του CMS περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα αναβάθμισης. Αν και ο αλγόριθμος σκανδαλισμού μιονίων ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά το Run 2 (2015 - 2018) (BMTF) ήταν πολύ αποτελεσματικός, έχει προταθεί η αναβάθμισή του. Η αναβάθμισή του περιέχει το Kalman Filter και, για αυτό, ονομάζεται K-BMTF ή, απλώς, KMTF. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τις ομοιότητες και διαφορές του BMTF και KMTF. Επίσης, υπολογίζονται και συγκρίνονται οι αποδόσεις των δύο αλγορίθμων στην ανακατασκευή ζευγών μιονικών τροχιών, τα οποία προέρχονται από διασπάσεις σωματιδίων  $J/\psi$ . Τα δεδομένα παράχθηκαν από την προσομοίωση με μεθόδους Monte Carlo του πειράματος CMS. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα Pythia 8.1 και GEANT 4. Η σύγκριση των αποδόσεων, η οποία πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον της ROOT του CERN, δείχνει πως ο KMTF είναι πιο επιτυχημένος αλγόριθμος.

## Abstract

The Level-1 Trigger of the CMS experiment at Large Hadron Collider (LHC) of CERN needs update in order to meet the increased requirements of Phase-2 of the experiment, which will begin in 2027. The Muon Trigger in the CMS' central region is included in the upgrade program. Although the muon trigger algorithm used in Run 2 (2015 – 2018) (BMTF) was very efficient, its update has been proposed. Its update contains the Kalman Filter and this is why it is called K-BMTF or simply KMTF. This work presents the similarities and differences between BMTF and KMTF. In addition, the efficiencies of these two algorithms in the reconstruction of muon pairs coming from decays of  $J/\psi$  particles are calculated and compared. The data were generated from a simulation of the CMS experiment with Monte Carlo methods. The programs that were used are Pythia 8.1 and GEANT 4. The comparison of the efficiencies, which was done using the analysis and graphical package ROOT from CERN, shows that KMTF is a more successful algorithm.

Στους γονείς μου,  
για την αγάπη και την στήριξή τους  
στις εύκολες, αλλά κυρίως στις δύσκολες στιγμές

# Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	iv
Κατάλογος Πινάκων	vi
<b>1 Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model)</b>	<b>1</b>
1.1 Λεπτόνια . . . . .	1
1.2 Κουάρκς . . . . .	2
1.3 Φορείς των Αλληλεπιδράσεων . . . . .	3
1.4 Φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο . . . . .	4
<b>2 Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Πυρηνική Έρευνα (CERN)</b>	<b>7</b>
2.1 Large Hadron Collider . . . . .	9
<b>3 Compact Muon Solenoid</b>	<b>13</b>
3.1 Ανιχνευτές Πυριτίου (Silicon Trackers) . . . . .	13
3.2 Καλορίμετρα (Calorimeters) . . . . .	14
3.3 Υπεραγωγίμο Σωληνοειδές Πηνίο (Superconducting Solenoid Coil) . . . . .	15
3.4 Θάλαμοι Μιονίων (Muon Chambers) . . . . .	16
<b>4 Σκανδαλιστής του CMS</b>	<b>19</b>
4.1 Level-1 Trigger . . . . .	19
4.2 High-Level Trigger . . . . .	21
<b>5 Αλγόριθμοι ανακατασκευής μιονικών τροχιών του Level-1 Trigger στο Βαρέλι</b>	<b>24</b>
5.1 Barrel Muon Track Finder . . . . .	24
5.1.1 $\phi$ Track Finder . . . . .	25
5.1.2 $\eta$ Track Finder . . . . .	27
5.1.3 Wedge Sorter . . . . .	27
5.2 Kalman Muon Track Finder . . . . .	27
<b>6 Συγκριτική μελέτη των επιδόσεων των αλγορίθμων ανακατασκευής ζευγών μιονίων από διασπάσεις σωματιδίων <math>J/\psi</math> στο Βαρέλι</b>	<b>30</b>
6.1 Ορισμός διμιονικής απόδοσης . . . . .	30
6.2 Περιγραφή αλγορίθμου υπολογισμού διμιονικής απόδοσης . . . . .	31
6.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα . . . . .	34
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>40</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Συγκριτικό διάγραμμα των μαζών των θεμελιωδών φερμιονίων του Καθιερωμένου Προτύπου.	3
1.2	Θεμελιώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου.	5
1.3	Ενέργειες στις οποίες πιστεύεται ότι ενοποιούνται οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις.	6
1.4	Υπερσύντροφοι των θεμελιωδών σωματιδίων του Καθιερωμένου Προτύπου.	6
2.1	Χώρες που συμμετέχουν σε προγράμματα του CERN.	7
2.2	Δίκτυο επιταχυντών των δεσμών πρωτονίων στο εργαστήριο του CERN.	8
2.3	Δίκτυο επιταχυντών των δεσμών βαρέων ιόντων στο εργαστήριο του CERN.	9
2.4	Κύριοι επιταχυντές του CERN και τα τέσσερα βασικότερα πειράματά του.	11
2.5	Τιμές του $\eta$ για διάφορες γωνίες $\theta$ .	12
3.1	Γραφική αναπαράσταση της δομής του CMS.	13
3.2	Γραφική απεικόνιση των ανακατασκευασμένων από τους ανιχνευτές πυριτίου τροχιών των σωματιδίων που παράχθηκαν σε BX με PU 78. Οι κίτρινες κουκκίδες είναι τα primary vertices.	14
3.3	Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων vertices σε ένα BX. Οι σφαίρες αποτελούνται από τα πρωτόνια τα οποία δεν συγκρούστηκαν.	14
3.4	Γραφική αναπαράσταση καταιονισμού μέσα σε καλορίμετρο.	15
3.5	Γραφική αναπαράσταση ενός superlayer. Κάθε ορθογώνιο παραλληλόγραμμο είναι ένα DT και η κόκκινη κουκκίδα στο κέντρο του είναι ένα θετικά φορτισμένο σύρμα. Το κόκκινο βέλος είναι η τροχιά του διερχομένου μιονίου. Τα μπλε βέλη δείχνουν την κίνηση των ηλεκτρονίων που αποβάλλονται από τα άτομα του αερίου κατά την σκέδαση τους με το διερχόμενο μόνιο.	16
3.6	Διαμήκης τομή του πρώτου τεταρτημορίου του CMS. Οι αλγόριθμοι Barrel MTF, Overlap MTF και Endcap MTF θα αναπτυχθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.	18
3.7	Εγκάρσια τομή του CMS και οι τροχιές των σωματιδίων μέσα σε αυτή.	18
4.1	Δομή του Level-1 Trigger του CMS, καθώς και οι ηλεκτρονικές μονάδες που χρησιμοποιούνται σε κάθε μέρος του.	22
4.2	Τμήματα του Trigger στο CMS.	23
5.1	Διαχωρισμός των μιονικών ανιχνευτών του Βαρελιού του CMS σε wedges και sectors. Τα πράσινα βέλη αναπαριστούν track segments.	24
5.2	Διαμήκης τομή του πρώτου τεταρτημορίου του Βαρελιού του CMS και οι ονομασίες των θαλάμων μιονίων.	24
5.3	Πηγή των δεδομένων που δέχεται η TwinMux στη wedge $n$ και οι BMTFs που λαμβάνουν τα αποτελέσματά της.	25
5.4	Αλγόριθμος υπολογισμού της ορμής της μιονικής τροχιάς από την Assignment.	27
5.5	Διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος KMTF για την ανακατασκευή μιονικής τροχιάς.	29
6.1	Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του ενός από τα δύο generated μόνια (τα οποία προέρχονται από διάσπαση $J/\psi$ ) και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο BMTF.	32
6.2	Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του άλλου generated μιονίου του ζεύγους και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο BMTF.	32
6.3	Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του ενός από τα δύο generated μόνια (τα οποία προέρχονται από διάσπαση $J/\psi$ ) και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο KMTF.	33
6.4	Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του άλλου generated μιονίου του ζεύγους και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο KMTF.	33
6.5	Σφαίρα ακτίνας $r = 0.35$ , στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ένα generated μόνιο. Μέσα στην σφαίρα, περιέχονται όλα τα potentially matched L1 μόνια ως προς αυτό το generated μόνιο. Το μπλε μόνιο έχει τη μικρότερη γωνιακή απόσταση ως προς το generated μόνιο. Όμως, το κόκκινο μόνιο είναι το κατάλληλο για μέλος του ζεύγους L1 μιονίων, ώστε να αναπαραχθεί επιτυχώς το $J/\psi$ .	34
6.6	Διμιονική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά $\Delta\phi$ των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου $J/\psi$ .	34

6.7	Διμιοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά $\Delta\eta$ των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ. . . . .	35
6.8	Διμιοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά $\Delta R$ των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ. Βασιζόμενοι στην σχέση μεταξύ $\Delta R_{gen}$ και $p_{T_{J/\psi}}$ , συμπεραίνουμε πως το όριο $\Delta R_{gen} = 0.51$ προέρχεται από το κάτω όριο της $p_{T_{J/\psi}}$ (8 GeV/c). . . . .	35
6.9	Μεγέθυνση του διαγράμματος απόδοσης του Σχήματος 6.4. Ο λόγος που κόβεται το τμήμα της διμιοιικής απόδοσης για $\Delta R_{gen} < 0.08$ (υψηλές $p_{T_{J/\psi}}$ ) είναι ότι, σε αυτή την περιοχή, η ενεργός διατομή παραγωγής J/ψ μικραίνει πάρα πολύ γρήγορα. Με άλλα λόγια, το πλήθος δεδομένων είναι μικρό, το οποίο φαίνεται από τα υψηλά σφάλματα που συνοδεύουν τη διμιοιική απόδοση. . . . .	36
6.10	Απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους. Παρατηρείται πως στο cut της ορμής των L1 μιονίων στα 5 GeV/c, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή. Ο λόγος είναι η περιορισμένη διακριτική ικανότητα του L1T στον υπολογισμό της ορμής της μιονικής τροχιάς. . . . .	37
6.11	Απόδοση του αλγορίθμου BMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Παρατηρείται πως, σε κάθε περίπτωση, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή. . . . .	37
6.12	Απόδοση του αλγορίθμου KMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Παρατηρείται πως, σε κάθε περίπτωση, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή. . . . .	38
6.13	Διμιοιική απόδοση του αλγορίθμου BMTF ως προς την διαφορά $\Delta R$ των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ, σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. . . . .	38
6.14	Διμιοιική απόδοση του αλγορίθμου KMTF ως προς την διαφορά $\Delta R$ των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ, σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. . . . .	39

## Κατάλογος Πινάκων

1.1	Λεπτόνια του Καθιερωμένου Προτύπου με το αντίστοιχο ηλεκτρικό τους φορτίο. . . . .	1
1.2	Κβαντικοί λεπτονικοί αριθμοί των λεπτονίων. . . . .	1
1.3	Κουάρκς του Καθιερωμένου Προτύπου. . . . .	2
1.4	Κβαντικοί αριθμοί των κουάρκς. . . . .	2
1.5	Φορείς των τριών θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων της φύσης. . . . .	3
2.1	Ενέργειες στις οποίες επιταχύνονται οι δέσμες πρωτονίων από τους επιταχυντές που προηγούνται του LHC. . . . .	8
2.2	Ενέργειες στις οποίες επιταχύνονται οι δέσμες ιόντων μολύβδου από τους επιταχυντές που προηγούνται του LHC. . . . .	8
2.3	Πειράματα που έχουν τοποθετηθεί στα σημεία σύγκρουσης των δεσμών σωματιδίων στον LHC. . . . .	11

# 1 Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model)

Το Καθιερωμένο Πρότυπο (Κ.Π.) [1, 2] αποτελεί την πλέον αποδεκτή θεωρία της Σωματιδιακής Φυσικής για την περιγραφή της δομής των υποατομικών σωματιδίων και των τριών από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις. Σύμφωνα με αυτό, όλη η ύλη αποτελείται από δύο είδη θεμελιωδών σωματιδίων, τα οποία είναι τα λεπτόνια (leptons) και τα κουάρκς (quarks). Αυτά τα δύο είδη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας θεμελιώδη σωματάρια, τα οποία ονομάζονται φορείς αλληλεπιδράσεων. Τα λεπτόνια και τα κουάρκς έχουν σπιν 1/2, δηλαδή είναι φερμιόνια, ενώ οι φορείς των αλληλεπιδράσεων έχουν σπιν 1, δηλαδή είναι μποζόνια. Ιστορικά, αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1960 με την ενοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής (electromagnetic interaction) και της ασθενούς πυρηνικής αλληλεπιδράσης (weak nuclear interaction) από τους S. Glashow, A. Salam και S. Weinberg. Η τελική του μορφή ήρθε στη δεκαετία του 1970 με την ενσωμάτωση της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπιδράσης (strong nuclear interaction) και της πειραματικής επιβεβαίωσης της ύπαρξης των κουάρκς.

## 1.1 Λεπτόνια

Το Κ.Π. προβλέπει έξι λεπτόνια<sup>1</sup>, τα οποία αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Λεπτόνιο	Συμβολισμός	Ηλεκτρικό Φορτίο ( $Q(e)$ )
Νετρίνιο του ηλεκτρονίου	$\nu_e$	0
Ηλεκτρόνιο	$e^-$	-1
Νετρίνιο του μιονίου	$\nu_\mu$	0
Μιόνιο	$\mu^-$	-1
Νετρίνιο του ταυ	$\nu_\tau$	0
Ταυ	$\tau^-$	-1

**Πίνακας 1.1:** Λεπτόνια του Καθιερωμένου Προτύπου με το αντίστοιχο ηλεκτρικό τους φορτίο.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Ο λόγος που τα λεπτόνια έχουν τοποθετηθεί σε ζεύγη είναι γιατί κάθε παρένθεση ορίζει μία γενιά. Οι παρενθέσεις στοιχίζονται με βάση τον αριθμό της γενιάς, με την αριστερότερη να αποτελεί την πρώτη. Όσο μετατοπιζόμαστε προς τα δεξιά, τόσο αυξάνει η μάζα των φορτισμένων σωματιδίων και μειώνεται ο χρόνος ζωής τους. Τα νετρίνα έχουν μηδενική μάζα και, έτσι, δεν διασπώνται. Κάθε ζεύγος διαθέτει τον δικό του λεπτονικό κβαντικό αριθμό, οι οποίοι είναι ο ηλεκτρονικός αριθμός  $L_e$ , ο μιονικός αριθμός  $L_\mu$  και ο ταυικός αριθμός  $L_\tau$ . Οι τιμές των κβαντικών λεπτονικών αριθμών για κάθε λεπτόνιο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Λεπτόνιο	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$\nu_e$	1	0	0
$e^-$	1	0	0
$\nu_\mu$	0	1	0
$\mu^-$	0	1	0
$\nu_\tau$	0	0	1
$\tau^-$	0	0	1

**Πίνακας 1.2:** Κβαντικοί λεπτονικοί αριθμοί των λεπτονίων.

<sup>1</sup>Σε κάθε λεπτόνιο αντιστοιχεί ένα αντισωματάρτιο, το οποίο ονομάζεται αντιλεπτόνιο. Το ίδιο ισχύει και για τα κουάρκς, όπου τα αντισωματάρτια ονομάζονται αντικουάρκς. Η ύπαρξη των αντισωματιδίων σε 1-1 αντιστοιχία με τα σωματάρια εξυπακούεται από τη σχετικιστική αναλλοiotήτα και δεν είναι ξεχωριστή απαίτηση του Κ.Π..



## 1.2 Κουάρκς

Υπάρχουν συνολικά έξι κουάρκς<sup>2</sup>, τα οποία αποκαλούνται και γεύσεις. Χωρίζονται και αυτά σε τρεις γενιές, με τις γεύσεις της επόμενης να έχουν μεγαλύτερη μάζα και μικρότερο χρόνο ζωής από της προηγούμενης.

Γεύση	Αγγλική Ορολογία	Συμβολισμός
πάνω	up	u
κάτω	down	d
γοητευτικό	charm	c
παράξενο	strange	s
κορυφαίο	top	t
πυθμενικό	bottom	b

Πίνακας 1.3: Κουάρκς του Καθιερωμένου Προτύπου.

Ακολουθώντας την ίδια διάταξη με αυτή των λεπτονίων, θα έχουμε:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Η φυσική σημασία των κουάρκς είναι ότι αποτελούν τα συστατικά των σύνθετων σωματιδίων (αδρόνια)<sup>3</sup>. Οι δυνατοί συνδυασμοί τους είναι τρία κουάρκς (βαρυόνια) και κουάρκ-αντικουάρκ (μεσόνια). Για παράδειγμα, στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν τα γνωστά μας πρωτόνιο ( $uud$ ) και νετρόνιο ( $udd$ ) και στην δεύτερη, το  $J/\psi$  ( $c\bar{c}$ ) με το οποίο θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία. Προκειμένου να επιτευχθεί το ακέραιο ηλεκτρικό φορτίο των βαρυονίων, θα πρέπει τα κουάρκς να έχουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο. Ειδικότερα, τα σωματίδια της πάνω γραμμής της διάταξης έχουν φορτίο  $+2/3e$  και της κάτω έχουν  $-1/3e$ . Επιπλέον, διαθέτουν και βαρυονικό κβαντικό αριθμό, με μοναδική τιμή  $+1/3$  και, ανάλογα τη γεύση, ένα συγκεκριμένο κβαντικό αριθμό. Όλοι οι κβαντικοί αριθμοί που αναφέρονται σε αυτή την παράγραφο, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα<sup>4</sup>.

Γεύση	Q(e)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Charm (C)	Strangeness (S)	Topness (T)	Bottomness ( $\bar{B}$ )
u	+2/3	+1/3	0	0	0	0
d	-1/3	+1/3	0	0	0	0
c	+2/3	+1/3	1	0	0	0
s	-1/3	+1/3	0	-1	0	0
t	+2/3	+1/3	0	0	1	0
b	-1/3	+1/3	0	0	0	-1

Πίνακας 1.4: Κβαντικοί αριθμοί των κουάρκς.

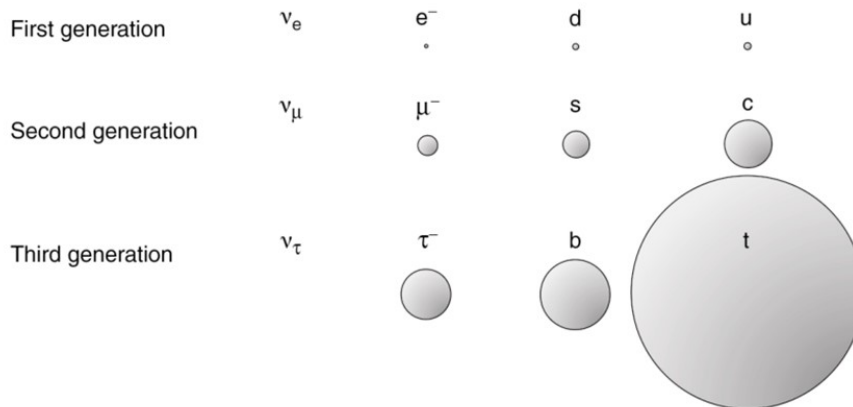
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις θεμελιώδεις φερμιονικές οικογένειες, όσο μεγαλύτερη είναι η γενιά των φορτισμένων σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μάζα τους. Το λογικό ερώτημα που δημιουργείται είναι πως συγκρίνονται οι μάζες των σωματιδίων ίδιας γενιάς. Στους πίνακες 1.1 και 1.3, δεν αναγράφονται οι τιμές των μαζών, προκειμένου να μην κουραστεί ο αναγνώστης με τις αριθμητικές συγκρίσεις. Αντ' αυτού, παρατίθεται ένα συγκριτικό διάγραμμα (βλέπε Σχήμα 1.1). Παρατηρούμε πως, για όλες τις γενιές, τα κουάρκς έχουν μεγαλύτερη μάζα από το αντίστοιχο ηλεκτρικά φορτισμένο λεπτόνιο. Επίσης, οι μάζες των θετικά φορτισμένων γεύσεων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των αρνητικά

<sup>2</sup>Βλέπε υποσημείωση 1

<sup>3</sup>Η μόνη εξαίρεση είναι το top κουάρκ. Ο λόγος είναι ότι ο μέσος χρόνος ζωής του είναι μικρότερος από το χρόνο που χρειάζεται για να συζευχτεί με άλλα κουάρκς και να παραχθούν αδρόνια.

<sup>4</sup>Στον Πίνακα 1.4, δεν συμπεριλαμβάνονται οι μοναδικοί κβαντικοί αριθμοί της πρώτης γενιάς (upness και downness), γιατί χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια.

φορτισμένων γεύσεων. Εξαιρέση αποτελούν τα κουάρκ της πρώτης γενιάς, των οποίων οι μάζες είναι περίπου ίσες. Τέλος, το top κουάρκ έχει τη μεγαλύτερη μάζα, η οποία είναι και ο λόγος που ανακαλύφθηκε τελευταίο από τα ηλεκτρικά φορτισμένα φερμιόνια.



**Σχήμα 1.1:** Συγκριτικό διάγραμμα των μαζών των θεμελιωδών φερμιονίων του Καθιερωμένου Προτύπου.

Η ισότητα των μαζών των γεύσεων u και d έχει ως λογικό επακόλουθο πως το πρωτόνιο και το νετρόνιο έχουν περίπου ίσες μάζες, το οποίο επαληθεύεται και πειραματικά. Αυτή η παρατήρηση, καθώς και ότι η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση (βλέπε παρακάτω) δρα με τον ίδιο τρόπο και στα δύο σωματίδια, οδηγεί στο συμπέρασμα πως τα δύο νουκλεόνια είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Η μόνη διαφορά τους είναι το ηλεκτρικό τους φορτίο. Για αυτό το λόγο, επινοήθηκε ένας νέος κβαντικός αριθμός, ο οποίος ονομάζεται ισοσπίν και συμβολίζεται με το αγγλικό γράμμα I. Το ισοσπίν περιγράφεται από την ίδια ομάδα συμμετρίας που περιγράφει το σπιν<sup>5</sup> και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I = (I_z)_{max}$$

όπου  $I_z$  είναι η προβολή του ισοσπίν στον άξονα z, η οποία ισούται με:

$$I_z = Q(e) - \frac{B+S+C+\tilde{B}+T}{2}$$

Η συμμετρία του ισοσπίν "σπάει" όταν ληφθεί υπόψιν το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων.

### 1.3 Φορείς των Αλληλεπιδράσεων

Οι τρεις<sup>6</sup> θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις και οι αντίστοιχοι φορείς τους είναι:

Θεμελιώδης Αλληλεπίδραση	Φορέας	Q(e)	Μάζα <sup>7</sup> (GeV/c <sup>2</sup> )	Σπιν(ħ)
Ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση	Γλουόνιο (g)	0	0	1
Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση	Φωτόνιο (γ)	0	0	1
Ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση	$W^\pm$ $Z^0$	$\pm 1$ 0	80.4    91.2	1    1

**Πίνακας 1.5:** Φορείς των τριών θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων της φύσης.

<sup>5</sup> Αυτός είναι ο λόγος που φέρουν παρόμοιο σχεδόν όνομα, παρόλο που δρουν σε διαφορετικούς χώρους Hilbert. Το ισοσπίν δρα στο χώρο των γεύσεων, ενώ το σπιν στο συνήθη γεωμετρικό χώρο.

<sup>6</sup> Η βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων είναι τόσο μικρή, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Για αυτό το λόγο, δεν θα αναλυθεί.

<sup>7</sup> Από τη θεωρία Yukawa, προκύπτει πως η εμβέλεια της αλληλεπίδρασης είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας του φορέα της.

- **Ηλεκτρομαγνητική (H/M) αλληλεπίδραση:** Στην κλασσική φυσική, θεωρούμε πως η H/M αλληλεπίδραση περιγράφεται από συνεχή (κλασσικά) πεδία στο χώρο και στο χρόνο, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό. Όμως, στη Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων, επειδή ασχολούμαστε με πάρα πολύ μικρές αποστάσεις, η περιγραφή γίνεται με την κβαντική φυσική. Αυτό σημαίνει πως η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται μέσω της ανταλλαγής κβάντων, τα οποία ονομάζονται φωτόνια. Τα θεμελιώδη σωματίδια που αλληλεπιδρούν μέσω αυτής είναι όλα τα φορτισμένα φερμιόνια. Η θεωρία που την περιγράφει ονομάζεται Κβαντική Ηλεκτροδυναμική (Quantum Electrodynamics / QED), η οποία αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση αβελιανής θεωρίας βαθμίδας.
- **Ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση:** Ο φορέας της είναι τα γλουόνια. Μαζί με τα κουάρκς, αποτελούν τα μόνα θεμελιώδη σωματίδια που συμμετέχουν σε αυτή. Ο λόγος είναι ότι η ισχυρή αλληλεπίδραση πραγματοποιείται μόνο μεταξύ των σωματιδίων που φέρουν ένα συγκεκριμένο κβαντικό αριθμό, ο οποίος ονομάζεται "χρώμα". Οι δυνατές τιμές του χρώματος είναι τρεις: κόκκινο, μπλε και πράσινο. Κάθε κουάρκ φέρει μία από αυτές, ενώ κάθε γλουόνιο, ένα γραμμικά ανεξάρτητο συνδυασμό μεταξύ χρώματος και αντιχρώματος. Οπότε, συνολικά, υπάρχουν δεκαοκτώ (18) κουάρκς και οκτώ (8) γλουόνια. Πειραματικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε μόνο άχρωμα (λευκά) σωματίδια<sup>8</sup>, το οποίο προκύπτει με την σύζευξη των τριών χρωμάτων ή ζεύγους χρώματος και αντίστοιχου αντιχρώματος. Η θεωρία που περιγράφει αυτή την αλληλεπίδραση ονομάζεται Κβαντική Χρωμοδυναμική (Quantum Chromodynamics / QCD) και είναι μία μη αβελιανή θεωρία βαθμίδας.
- **Ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση:** Οι φορείς της είναι τα μποζόνια  $W^\pm$  και  $Z^0$ , τα οποία έχουν πολύ μεγάλη μάζα. Αυτός είναι ο λόγος που η αλληλεπίδραση έχει πολύ μικρή εμβέλεια (τάξης  $10^{-18}$  μέτρα). Τα θεμελιώδη σωματίδια που συμμετέχουν σε αυτή είναι όλα τα φερμιόνια.

Αξίζει να αναφερθεί πως ο βαρυονικός και οι τρεις λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται και στις τρεις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις. Οι κβαντικοί αριθμοί  $C, S, T, \tilde{B}$  διατηρούνται στις H/M και ισχυρή πυρηνική αλληλεπιδράσεις, αλλά όχι στην ασθενή πυρηνική.

Το τελευταίο μποζόνιο που προβλέπεται από το Κ.Π. είναι το μποζόνιο Χιγς (Higgs), με σπιν 0. Έχει μάζα  $125 \text{ GeV}/c^2$ , μηδενικό σπιν και μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο. Η ύπαρξή του προβλέφθηκε το 1964 από τους R. Brout, F. Englert και P. Higgs και επιβεβαιώθηκε πειραματικά με την ανακάλυψή του από τα πειράματα CMS και ATLAS στον LHC το 2012. Αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της θεωρίας, καθώς εισάγει τον μηχανισμό μέσω του οποίου όλα τα σωματίδια αποκτούν μάζα.

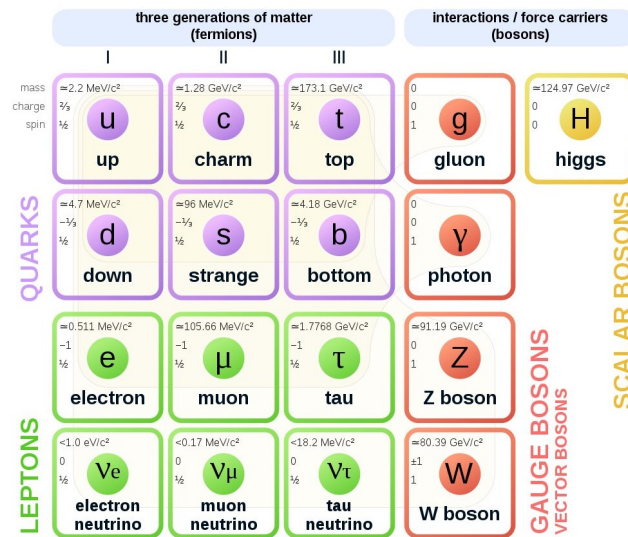
Τα σωματίδια τα οποία αναλύθηκαν σε αυτό το υποκεφάλαιο, συνοψίζονται στο Σχήμα 1.2, μαζί με τις φυσικές τους ιδιότητες.

## 1.4 Φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο

Η εγκυρότητά του Κ.Π. βασίζεται στην επιτυχία του να εξηγήει σχεδόν όλα τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και στην πρόβλεψη σωματιδίων, τα οποία, στη συνέχεια, ανιχνεύθηκαν. Ήδη ένα παράδειγμα, το οποίο αναλύσαμε και παραπάνω, είναι το μποζόνιο Higgs. Άλλα παραδείγματα αποτελούν το top κουάρκ και το νετρίνο του ταυ, τα οποία ανακαλύφθηκαν το 1995 και το 2000 αντίστοιχα. Όμως, η θεωρία δεν είναι πλήρης. Αδυνατεί να εξηγήσει θεμελιώδη ερωτήματα, καθώς και πολλά παρατηρούμενα φαινόμενα:

- **Απουσία μιας κβαντικής θεωρίας βαρύτητας:** Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το Κ.Π. δεν περιλαμβάνει την βαρύτητα, όπως αυτή εξηγείται σύμφωνα με την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.

<sup>8</sup>Βασιζόμενοι στην υποσημείωση 7, θα συμπεραίναμε πως η ισχυρή αλληλεπίδραση έχει άπειρη εμβέλεια. Όμως, στην πραγματικότητα, έχει εύρος μόνο μέχρι τάξης  $10^{-15} \text{ m}$ . Αυτό συμβαίνει, γιατί το δυναμικό της ισχυρής αλληλεπίδρασης, μετά από πεπερασμένη απόσταση μεταξύ των σωματιδίων που εφαρμόζεται, αυξάνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση αυτή. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός αύξησης του δυναμικού είναι περίπου  $1 \text{ GeV}$  ανά  $\text{fm}(!)$  και η προαναφερθείσα πεπερασμένη απόσταση είναι περίπου όσο το μέγεθος ενός αδρονίου. Καταλαβαίνουμε, δηλαδή, πως, όταν τα σωματίδια βρίσκονται εκτός των αδρονίων, αναπτύσσεται μια πολύ ισχυρή έλξη μεταξύ τους, η οποία τα εμποδίζει να γίνουν ελεύθερα. Το ερώτημα που δημιουργείται είναι αν, παρέχοντας κατάλληλα ποσά ενέργειας στο ζεύγος, μπορούμε να απομονώσουμε τα σωματίδια του. Δυστυχώς, η απάντηση είναι αρνητική. Ο λόγος είναι πως, πολύ πριν καταφέρουμε να τα παρατηρήσουμε, η ενέργεια που θα έχουμε δαπανήσει, θα έχει δημιουργήσει ζεύγη σωματιδίων (γλουονίων ή κουάρκς). Με τη σειρά τους, τα ζεύγη αυτά θα συζευχτούν με τα αρχικά σωματίδια. Καταλήγουμε, λοιπόν, πως δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε ελεύθερα γλουόνια και κουάρκς. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εγκλεισμός (confinement).



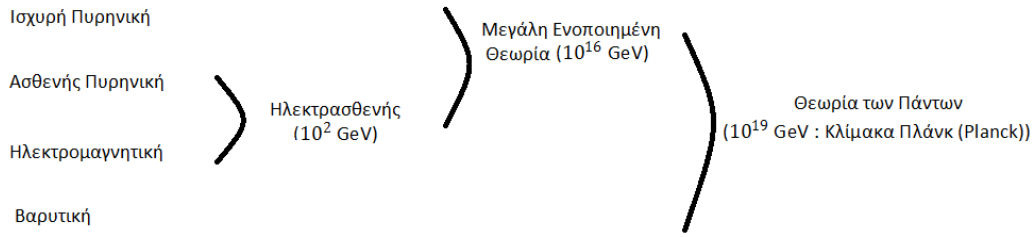
Σχήμα 1.2: Θεμελιώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου.

- **Ταλαντώσεις νετρίνων:** Το 1998, το πείραμα Σούπερ-Καμιοκάντε (Super-Kamiokande) στην Ιαπωνία, απέδειξε πως τα νετρίνα ταλαντώνονται. Στο ίδιο αποτέλεσμα κατέληξε και το Παρατηρητήριο Νετρίνων στο Σάντμπερι (Sudbury Neutrino Observatory) στον Καναδά το 2001. Οι ταλαντώσεις των νετρίνων έχουν ως συνέπεια ότι η μάζα τους είναι μη μηδενική.
- **Πρόβλημα της ιεραρχίας:** Το ΚΠ, περιλαμβάνοντας χβαντικές διορθώσεις από βρόχους εικονικών σωματιδίων σε όλες τις ανώτερες τάξεις κατά τη διάδοση του μποζονίου Higgs, προβλέπει ότι η μάζα του μποζονίου Higgs πρέπει να είναι της τάξης της κλίμακας Πλάνκ (Planck) ( $10^{19} \text{ GeV}$ ). Όμως, η πειραματική τιμή της μάζας του είναι 17(!) τάξεις μεγέθους μικρότερη από την θεωρητική τιμή της.
- **Ασυμμετρία ύλης-αντιύλης:** Στο Σύμπαν, σήμερα, παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ύλης από ότι αντιύλης. Όμως, σύμφωνα με το Κ.Π., κατά την Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang), η παραγωγή ύλης και αντιύλης έγινε με τον ίδιο ρυθμό. Με άλλα λόγια, η θεωρία δεν περιέχει κάποιο μηχανισμό ο οποίος να εξηγεί ικανοποιητικά αυτή την ασυμμετρία.
- **Σκοτεινή ύλη:** Οι αστροφυσικοί, μελετώντας τις καμπύλες περιστροφής των σπειροειδών Γαλαξιών, έλαβαν μετρήσεις οι οποίες δεν εξηγούνται από την φωτεινή ύλη<sup>9</sup>. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένα άλλο είδος ύλης, την οποία δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε και, για αυτό, ονομάζουμε "σκοτεινή". Η σκοτεινή ύλη δεν αλληλεπιδρά με καμία από τις τρεις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις, παρά μόνο με την βαρυτική και η δομή της δεν μπορεί να εξηγηθεί από το Κ.Π.. Σύμφωνα με τους κοσμολόγους, η σκοτεινή ύλη καλύπτει το 26% όλου του Σύμπαντος, ενώ η φωτεινή ύλη μόνο το 5%<sup>10</sup>.
- **Μεγάλη ενοποιημένη θεωρία:** Με την φράση "ενοποίηση αλληλεπιδράσεων", εννοούμε ότι οι παράμετροι σύζευξης<sup>11</sup> των αλληλεπιδράσεων γίνονται ίσες. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παράμετροι σύζευξης μεταβάλλονται, καθώς αυξάνει η ενεργειακή κλίμακα. Το πιο γνωστό παράδειγμα ενοποίησης αποτελεί η ηλεκτρασθενής αλληλεπίδραση, η οποία συμβαίνει σε ενέργειες  $10^2 \text{ GeV}$ . Λογικό επακόλουθο είναι να ενοποιούνται και οι τρεις αλληλεπιδράσεις σε μεγαλύτερη ενέργεια (βλέπε Σχήμα 1.3), το οποίο, όμως, δεν προβλέπεται από το Κ.Π..

<sup>9</sup>Ως φωτεινή ορίζεται η ύλη η οποία αλληλεπιδρά H/M.

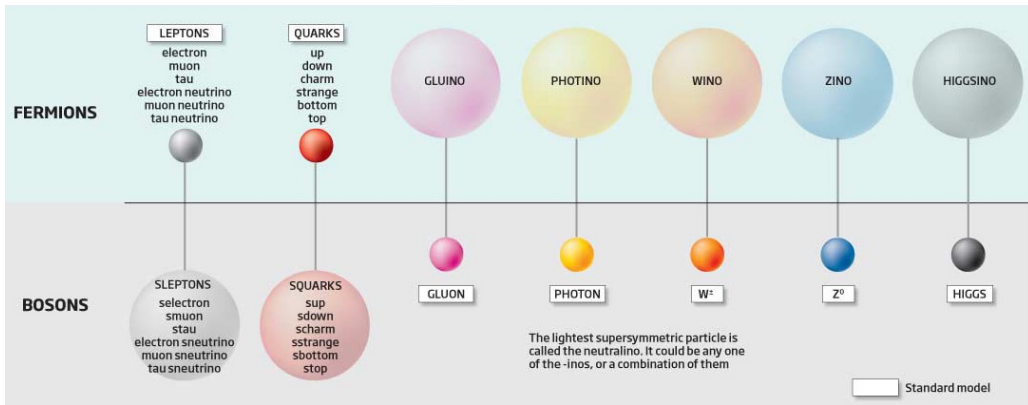
<sup>10</sup>Το υπόλοιπο 69% του Σύμπαντος καλύπτεται από την σκοτεινή ενέργεια. Ειδικότερα, η επιστημονική κοινότητα πίστευε πως το Σύμπαν διαστέλλεται με επιβραδυντικό ρυθμό. Όμως, το 1998, πειραματικές παρατηρήσεις έδειξαν πως ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος είναι, στην πραγματικότητα, επιταχυνόμενος. Το φαινόμενο αυτό δεν μπορούσε να εξηγηθεί από τους Κοσμολόγους και για αυτό προτάθηκε η ύπαρξη "σκοτεινής ενέργειας". Η αδυναμία εξήγησης της σκοτεινής ενέργειας αφορά τη θεωρία βαρύτητας και το Καθιερωμένο Κοσμολογικό Μοντέλο. Με άλλα λόγια, δεν αποτελεί πρόβλημα του Κ.Π. και για αυτό δεν αναλύεται σε ξεχωριστή κουκκίδα.

<sup>11</sup>Ως παράμετρος σύζευξης μιας αλληλεπίδρασης ορίζεται η πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης του φορέα της από τα σωματίδια. Με σειρά από μεγαλύτερη προς μικρότερη τιμή παραμέτρου σύζευξης, έχουμε ισχυρή πυρηνική, ασθενής πυρηνική, H/M και βαρυτική.



**Σχήμα 1.3:** Ενέργειες στις οποίες πιστεύεται ότι ενοποιούνται οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις.

Πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί οι οποίες λύνουν τα παραπάνω προβλήματα, με την πιο διαδεδομένη να είναι η Υπερσυμμετρία (Supersymmetry). Σύμφωνα με αυτή, κάθε θεμελιώδες σωματίδιο συνοδεύεται από έναν υπερσύντροφο (superpartner), ο οποίος έχει, σχεδόν, τις ίδιες ιδιότητες με αυτό. Η μόνη τους διαφορά έγκειται στο σπιν. Συγκεκριμένα, τα φερμιόνια έχουν υπερσυντρόφους μποζόνια με σπιν 0 και τα μποζόνια υπερσυντρόφους φερμιόνια με σπιν 1/2. Παρακάτω, παρατίθεται το Σχήμα 1.4, το οποίο περιέχει όλα τα θεμελιώδη σωματίδια του Κ.Π. με τους αντίστοιχους υπερσυντρόφους τους.



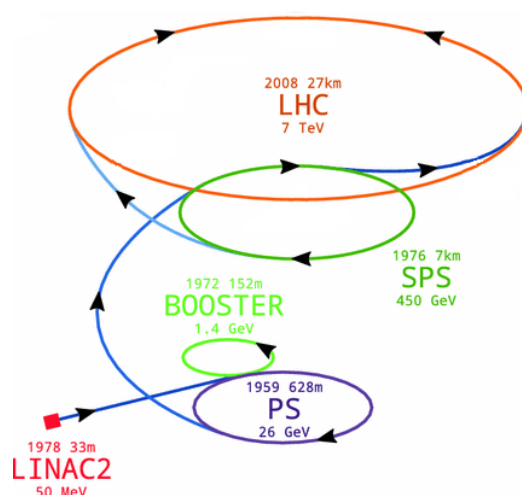
**Σχήμα 1.4:** Υπερσύντροφοι των θεμελιωδών σωματιδίων του Καθιερωμένου Προτύπου.

Η Υπερσυμμετρία δίνει λύση στα προβλήματα της Ιεραρχίας και της δομής της σκοτεινής ύλης και ενοποιεί τις τρεις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις. Γεννιέται, όμως, το ερώτημα: Αφού τα υπερσυμμετρικά σωματίδια έχουν ίδια μάζα με τα αντίστοιχα σωματίδια, γιατί δεν έχουν παρατηρηθεί ακόμα; Οι θεωρητικοί υποστηρίζουν πως η συμμετρία αυτή έχει "σπάσει", με αποτέλεσμα, τα υπερσυμμετρικά σωματίδια να έχουν πάρα πολύ μεγάλη μάζα.



Όνομα Επιταχυντή	Συντομογραφία	Ενέργεια στην οποία επιταχύνεται η δέσμη πρωτονίων (GeV)
Γραμμικός Επιταχυντής 2 <sup>15</sup> (LINear ACcelerator 2)	LINAC 2	0.050
Πρωθητής Σύγχροτρον Πρωτονίων (Proton Synchrotron Booster)	Booster	1.4
Σύγχροτρον Πρωτονίων (Proton Synchrotron)	PS	26
Υπέρ-Σύγχροτρον Πρωτονίων (Super Proton Synchrotron)	SPS	450

**Πίνακας 2.1:** Ενέργειες στις οποίες επιταχύνονται οι δέσμες πρωτονίων από τους επιταχυντές που προηγούνται του LHC.



**Σχήμα 2.2:** Δίκτυο επιταχυντών των δεσμών πρωτονίων στο εργαστήριο του CERN.

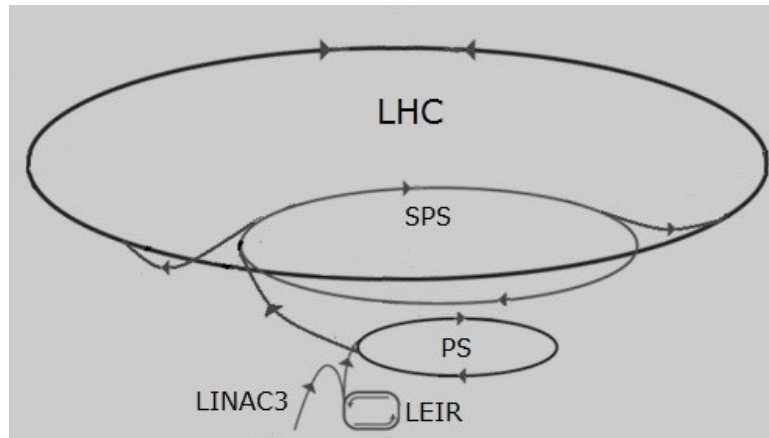
Όνομα Επιταχυντή	Συντομογραφία	Ενέργεια στην οποία επιταχύνεται η δέσμη ιόντων μολύβδου (GeV ανά νουκλεόνιο)
Γραμμικός Επιταχυντής 3 (LINear ACcelerator 3)	LINAC 3	0.045
Δακτυλίδι Ιόντος Χαμηλής Ενέργειας (Low Energy Ion Ring)	LEIR	0.072
Σύγχροτρον Πρωτονίων (Proton Synchrotron)	PS	5.9
Υπέρ-Σύγχροτρον Πρωτονίων (Super Proton Synchrotron)	SPS	177

**Πίνακας 2.2:** Ενέργειες στις οποίες επιταχύνονται οι δέσμες ιόντων μολύβδου από τους επιταχυντές που προηγούνται του LHC.

Πέρα από τις σπουδαίες ανακαλύψεις στη Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων, όπως τα μποζόνια  $W^\pm$ ,  $Z^0$  και Higgs, το εργαστήριο του CERN έχει συνεισφέρει σημαντικά και σε άλλους κλάδους [4]. Εκτενέστερα, οι πειραματικές του διατάξεις απαιτούν την συνεχή ανάπτυξη τεχνολογικών καινοτομιών,

<sup>15</sup> Στην επικείμενη αναβάθμιση του LHC, η οποία θα ολοκληρωθεί το 2021, ο LINAC 2 θα αντικατασταθεί από τον LINAC 4. Ο ρόλος του θα είναι να επιταχύνει ανιόντα υδρογόνου σε ενέργειες ως 0.16 GeV.





**Σχήμα 2.3:** Δίκτυο επιταχυντών των δεσμών βαρέων ιόντων στο εργαστήριο του CERN.

προκειμένου να επιτευχθούν περισσότερες και ακριβέστερες μετρήσεις. Αυτές οι καινοτομίες δημοσιοποιούνται στο κοινό και αξιοποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες του. Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web / WWW), ο οποίος δημιουργήθηκε από τους T. Berners - Lee και R. Cailliau το 1989. Επιπλέον, σε κοινωνικό επίπεδο, συνδέει επιστήμονες από όλο το κόσμο (βλέπε Σχήμα 2.1), ο καθένας με τη δικιά του κουλτούρα, αλλά με μία κοινή αγάπη, τη φυσική. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η συνεργασία μεταξύ των ομάδων της Αμερικής και της Σοβιετικής Ένωσης, κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου.

Για το υπόλοιπο της εργασίας, όταν θα αναφέρεται ο όρος "δέσμες σωματιδίων", θα εννοούνται οι δέσμες πρωτονίων. Επίσης, όταν θα χρησιμοποιείται ο όρος CERN, θα εννοείται το εργαστήριό του.

## 2.1 Large Hadron Collider

Ο LHC αποτελεί τον μεγαλύτερο επιταχυντή, όχι μόνο στο δίκτυο επιταχυντών του CERN, αλλά και παγκοσμίως. Έχει μήκος 27 χιλιομέτρων και βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από το έδαφος. Ο λόγος που βρίσκεται στο υπέδαφος είναι γιατί χρησιμοποιείται το ίδιο τούνελ που στέγαζε τον προηγούμενο επιταχυντή "Μεγάλος συγκρουστής Ηλεκτρονίου - Ποζιτρονίου"<sup>16</sup> (Large Electron-Positron collider / LEP), ο οποίος τέθηκε εκτός λειτουργίας το 2000. Αυτή η επιλογή είναι σαφώς φθηνότερη από την αγορά γης πάνω στην επιφάνεια. Επίσης, ο φλοιός της Γης αποτελεί πολύ καλή ασπίδα εναντίον της ακτινοβολίας σύγχροτρον, η οποία παράγεται εξαιτίας των κυκλικών κινήσεων των σωματιδίων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι δέσμες σωματιδίων κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις και συγκρούονται μετωπικά. Αυτό πραγματοποιείται μέσα στον LHC, μέσω της χρήσης δύο παράλληλων σωλήνων και χιλίων διακοσίων τριανταδύο (1232) υπεραγωγίμων διπολικών μαγνητών. Οι διπολικοί μαγνήτες στρίβουν τα πρωτόνια, ώστε να κινούνται σε κυκλική τροχιά.

Οι συγκρούσεις πακέτων σωματιδίων συμβαίνουν κάθε 25 ns. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διασταύρωση δεσμίδων (bunch crossing) και συμβολίζεται με τους αγγλικούς χαρακτήρες BX. Το αξιοσημείωτο είναι ότι, παρόλο τον πολύ μεγάλο αριθμό πρωτονίων που περιέχει κάθε bunch, σε κάθε BX, συγκρούονται<sup>17</sup> μόνο τα 50 περίπου από αυτά. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια πάρα πολύ μικρή πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των πρωτονίων, η οποία είναι άμεσα συσχετισμένη με το πόσο εστιασμένες είναι οι δέσμες. Αυτός είναι ο λόγος που έχουν τοποθετηθεί και τετραπολικοί μαγνήτες (392 στο σύνολο). Η πιθανότητα σύγκρουσης είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθος της φωτεινότητας<sup>18</sup>.

Τα BXs πραγματοποιούνται σε τέσσερα σημεία, εκεί όπου οι δύο δέσμες του LHC συναντιούνται. Τα σημεία αυτά ονομάζονται Σημεία Αλληλεπίδρασης (ΣΑ) και, γύρω από αυτά, είναι τοποθετημένοι ανιχνευτές (βλέπε Πίνακα 2.3):

<sup>16</sup>Το ποζιτρόνιο είναι το αντιλεπτόνιο του ηλεκτρονίου και συμβολίζεται ως  $e^+$ .

<sup>17</sup>Το πλήθος των αλληλεπιδράσεων πρωτονίου - πρωτονίου σε ένα BX ονομάζεται στοιβία (pile-up / PU).

<sup>18</sup>Η φωτεινότητα στη φυσική των επιταχυντών δεν συμπίπτει με την φωτεινότητα της κλασικής φυσικής. Η πρώτη υπολογίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των γεγονότων που ανιχνεύθηκαν σε ένα συγκεκριμένο χρόνο προς την ενεργό διατομή της αλληλεπίδρασης που αναπτύχθηκε. Για παράδειγμα, ο LHC, το 2018 (πριν το Long Shutdown 2), είχε φωτεινότητα  $2.1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Εκτιμάται ότι, μετά την αναβάθμιση του σε LHC Υψηλής Φωτεινότητας (High Luminosity LHC) (2027) [5], θα πετύχει πενταπλάσια φωτεινότητα από αυτή του 2018.



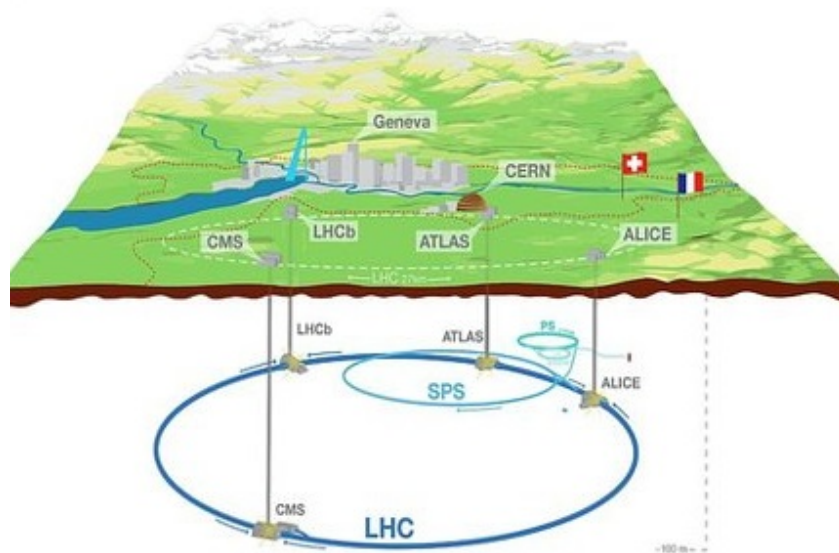
- Σημείο Αλληλεπίδρασης 1:** Γύρω από αυτό, βρίσκονται οι ανιχνευτές ATLAS [6] και LHC-f [7]. Το ATLAS είναι πείραμα γενικού σκοπού, δηλαδή μελετά ένα μεγάλο εύρος της φυσικής, όπως την ύπαρξη υπερσυμμετρικών σωματιδίων και επιπλέον διαστάσεων και το μποζόνιο Higgs. Το δεύτερο πείραμα μελετά σωματίδια τα οποία, κατά τη τομή των δεσμών, δεν συγκρούονται μετωπικά αλλά περιφερειακά μεταξύ τους, χωρίς συνεπώς να αποκλίνουν σημαντικά από την αρχική τους κατεύθυνση. Αυτά τα σωματίδια ονομάζονται "εμπρόσθια" (forward). Σκοπός του πειράματος είναι η προσομοίωση κοσμικής ακτινοβολίας<sup>19</sup> σε συνθήκες εργαστηρίου, ώστε να εξηγηθεί η πηγή της κοσμικής ακτινοβολίας υπερ-υψηλής ενέργειας (0.5 TeV-1 EeV).
- Σημείο Αλληλεπίδρασης 2:** Γύρω από αυτό, έχει κατασκευαστεί ο ανιχνευτής ALICE [8]. Το πείραμα μελετά συγκρούσεις ιόντων μολύβδου, οι οποίες παράγουν τόσο υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και θερμοκρασία, ώστε να παράγεται πλάσμα κουάρκ-γλουονίου<sup>20</sup>. Το ALICE μελετά την πυρηνική ύλη με βάση τους θεμελιώδεις βαθμούς ελευθερίας της QCD (κουάρκ και γλουόνια), αντί των ενεργών βαθμών ελευθερίας της κατάλοιπης πυρηνικής αλληλεπίδρασης (νουκλεόνια και ελαφρά μεσόνια). Αυτό το εγχείρημα ήταν ένα ανοιχτό ερώτημα από την εποχή της θεμελίωσης της QCD: πώς οι πολύ καλά γνωστοί από δεκαετίες πριν, σε φαινομενολογικό επίπεδο (με νουκλεόνια και φαινομενολογικά δυναμικά παραγόμενα από μοντέλα ανταλλαγής ελαφρών μεσονίων), ατομικοί πυρήνες θα μπορούσαν να περιγραφτούν με τους βαθμούς ελευθερίας που ξέραμε πια ότι είναι οι θεμελιώδεις, δηλαδή τα κουάρκ και τα γλουόνια. Αυτό είναι ένα πολύ δύσκολο ερώτημα, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά, γιατί απαιτεί εκτεταμένη χρήση της μη διαταρακτικής QCD "πλέγματος" για την περιγραφή όλων των δέσμιων καταστάσεων που εμπλέκονται στο πρόβλημα, και των νουκλεονίων και των μεσονίων και του συνολικού πυρήνα. Κατά συνέπεια, το ALICE και ο LHC γενικότερα "φέρνουν" επανάσταση στην Πυρηνική Φυσική.
- Σημείο Αλληλεπίδρασης 5:** Γύρω από αυτό, βρίσκονται οι ανιχνευτές CMS [9] και TOTEM [10]. Το CMS είναι και αυτό πείραμα γενικού σκοπού και έχει κοινούς ερευνητικούς σκοπούς με το πείραμα ATLAS. Ένας από τους λόγους είναι η επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το πιο γνωστό παράδειγμα είναι η ανακάλυψη του μποζονίου Higgs από τους ανιχνευτές CMS και ATLAS το 2012. Το πείραμα TOTEM ερευνά και αυτό τα "εμπρόσθια" σωματίδια. Κύριοι σκοποί του είναι η ακριβής μέτρηση της ενεργού διατομής της αλληλεπίδρασης πρωτονίου – πρωτονίου και η μελέτη της δομής του πρωτονίου.
- Σημείο Αλληλεπίδρασης 8:** Γύρω από αυτό, έχουν τοποθετηθεί οι ανιχνευτές LHC-b [11] και MoEDAL [12]. Το πείραμα LHC-b είναι πείραμα εξειδικευμένο στη φυσική βαρέων γεύσεων (flavor physics), αλλά έχει και πολύ καλές δυνατότητες μελέτης της ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης. Ένας από τους κύριους σκοπούς του είναι η εξήγηση της ασυμμετρίας ύλης-αντιύλης του Σύμπαντος. Το πείραμα MoEDAL διερευνά την ύπαρξη μαγνητικών μονοπόλων.

<sup>19</sup> Ως κοσμική ακτινοβολία ορίζουμε τα σωματίδια πολύ υψηλών ενεργειών (από  $10^6$  έως  $10^{21}$  eV) που προέρχονται από εξωγήινες πηγές εντός ή εκτός του Γαλαξία μας. Αυτά τα σωματίδια μπορεί να είναι κυρίως πρωτόνια (90 %), σωματίδια α (9 %) και, σε πολύ μικρό ποσοστό, βαρύτεροι πυρήνες (1 %). Τα σωματίδια αυτά προσκρούουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ανιχνεύσιμα αποτελέσματα. Οι τρεις συνιστώσες στις οποίες χωρίζονται είναι: η νουκλεονική (η πιο σταθερή), η μεσονική (ή αλλιώς, σκληρή) και η ηλεκτρομαγνητική (ή αλλιώς, μαλακή)

<sup>20</sup> Το πλάσμα κουάρκ-γλουονίου είναι μια κατάσταση της ύλης όπου τα κουάρκ και τα γλουόνια που περιέχονται, είναι ελεύθερα.

Σημείο Αλληλεπίδρασης	Όνομα Πειράματος	Αγγλική Ορολογία	Συντομογραφία
ΣΑ 1	Ένας Σπειροειδής Εξοπλισμός του LHC	A Toroidal LHC ApparatuS	ATLAS
	LHC-μπροστά	LHC-forward	LHC-f
ΣΑ 2	Ένα Πείραμα Συγκρουστή Μεγάλων Ιόντων	A Large Ion Collider Experiment	ALICE
ΣΑ 5	Συμπαγές Μιονικό Σωληνοειδές	Compact Muon Solenoid	CMS
	Μέτρηση ΟΛΙΚής ενεργού διατομής Ελαστικής σκέδασης και διαχωρισμού περίθλασης στον LHC	TOTAL cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC	TOTEM
ΣΑ 8	LHC-γοητεία	LHC-beauty	LHC-b
	Ανιχνευτής Μονόπολων και Εξωτικών Στον LHC	Monopole and Exotics Detector At the LHC	MoEDAL

**Πίνακας 2.3:** Πειράματα που έχουν τοποθετηθεί στα σημεία σύγκρουσης των δεσμών σωματιδίων στον LHC.



**Σχήμα 2.4:** Κύριοι επιταχυντές του CERN και τα τέσσερα βασικότερα πειράματά του.

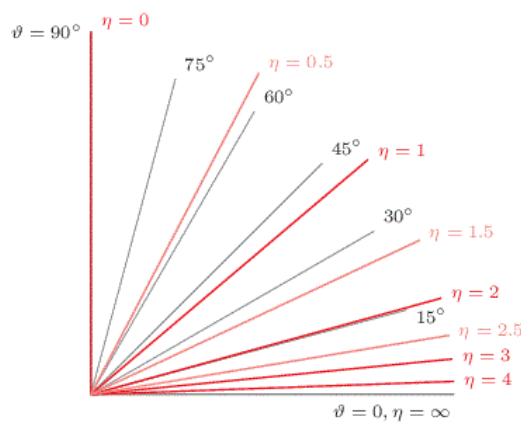
Στο επόμενο κεφάλαιο, από όλα τα παραπάνω πειράματα, θα αναλυθεί ο ανιχνευτής CMS, γιατί τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προήλθαν από αυτόν. Όμως, πρώτα, πρέπει να οριστεί ένα μέγεθος, το οποίο είναι πολύ βασικό στη φυσική των επιταχυντών. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται ψευδο-ωκύτητα (pseudorapidity) και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα "η". Η ψευδο-ωκύτητα είναι συνάρτηση της γωνίας μεταξύ του σωματιδίου και της διεύθυνσης της δέσμης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta = - \ln[\tan(\theta/2)]$$

όπου  $\theta$  η γωνία μεταξύ της τριορμής του σωματιδίου και της θετικής κατεύθυνσης της διεύθυνσης της δέσμης<sup>21</sup>. Για παράδειγμα, τα "εμπρόσθια" σωματρία που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχουν  $|\eta| \geq 3$ . Το Σχήμα 2.5 περιέχει ενδεικτικές τιμές της  $|\eta|$  σε σχέση με τη γωνία  $\theta$ .

Η ψευδο-ωκύτητα μπορεί να συνδυαστεί με την αζιμουθιακή γωνία  $\phi$ , ώστε να υπολογιστεί η γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων. Ο τύπος της γωνιακής απόστασης είναι:

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



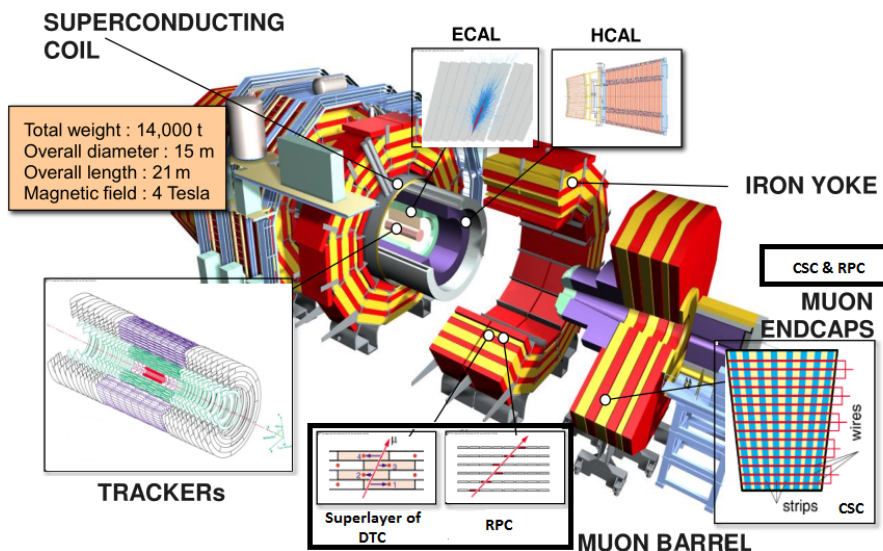
Σχήμα 2.5: Τιμές του  $\eta$  για διάφορες γωνίες  $\theta$ .

<sup>21</sup> Συνήθως, όταν μελετάμε τα προϊόντα ενός BX, θεωρούμε πως η αρχή των αξόνων είναι το σημείο όπου πραγματοποιήθηκε το BX. Επίσης, θεωρούμε πως η διεύθυνση z είναι η αρχική διεύθυνση της δέσμης. Προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση ενός σωματιδίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα συστήματα συντεταγμένων (για παράδειγμα σφαιρικό ή κυλινδρικό). Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο, είναι αυτό που περιέχει τα εξής μεγέθη: την ακτινική απόσταση από την αρχή των αξόνων ( $r$ ), την ψευδο-ωκύτητα ( $\eta$ ) και την αζιμουθιακή γωνία ( $\phi$ ). Ο λόγος που προτιμάται αυτό το σύστημα συντεταγμένων είναι γιατί η ποσότητα  $\Delta\eta$  μεταξύ δύο σωματιδίων είναι αναλλοίωτη σε μετασχηματισμούς Lorentz στη διεύθυνση της δέσμης.

### 3 Compact Muon Solenoid

Ο ανιχνευτής CMS έχει κυλινδρικό σχήμα και χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτος μέρος είναι το καμπύλο τμήμα του κυλίνδρου, το οποίο ονομάζεται "Βαρέλι" (Barrel). Τα άλλα δύο είναι οι δύο βάσεις του, οι οποίες ονομάζονται "Καπάκια" (Endcaps). Το CMS έχει μήκος 21 μέτρα, ύψος 15 μέτρα και η συνολική του μάζα ανέρχεται στους 14000 τόνους.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά το ΒΧ, η ενέργεια κέντρου μάζας του συστήματος πρωτονίου – πρωτονίου είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα να παράγονται σωματίδια μεγάλης μάζας. Αυτά τα σωματίδια έχουν πολύ μικρό μέσο χρόνο ζωής και, έτσι, διασπώνται πριν φτάσουν στον ανιχνευτή. Οπότε, σκοπός του CMS είναι να παρατηρήσει τα προϊόντα των διασπάσεων και να διαπιστώσει από ποιες συγκρούσεις πρωτονίων προήλθαν. Αυτός ο στόχος είναι πολύ δύσκολος, αν αναλογιστούμε το πλήθος των προϊόντων και του μικρού χρονικού διαστήματος μεταξύ των ΒΧs. Παρά τις απαιτήσεις αυτές, ο ανιχνευτής ανταποκρίνεται με μεγάλη αποδοτικότητα. Παρακάτω, θα αναλυθεί εκτενώς η δομή του CMS [9, 13] (Σχήμα 3.1), από το εσωτερικό του προς το εξωτερικό του μέρος. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται το σημείο όπου πραγματοποιείται το ΒΧ και ως άξονας z θεωρείται η αρχική διεύθυνση της δέσμης.



Σχήμα 3.1: Γραφική αναπαράσταση της δομής του CMS.

#### 3.1 Ανιχνευτές Πυριτίου (Silicon Trackers)

Ο πλησιέστερος στη δέσμη ανιχνευτής έχει ως σκοπό να βρίσκει τα σημεία στο χώρο όπου πραγματοποιήθηκαν οι συγκρούσεις πρωτονίων. Κάθε τέτοιο σημείο ονομάζεται "κύρια κορυφή" (primary vertex). Για αυτό, ο πλησιέστερος στη δέσμη ανιχνευτής πρέπει να έχει υψηλή γεωμετρική ανάλυση τροχιών και, έτσι, επιλέγεται να είναι ημιαγωγικός. Επιπλέον, πρέπει να προστατεύεται από την ακτινοβολία και να είναι κατασκευασμένος από υλικό με σχετικά μικρό ατομικό αριθμό. Ο λόγος της τελευταίας απαίτησης είναι πως τα σωματίδια που διέρχονται από τον ανιχνευτή, δεν πρέπει να επιβραδύνονται ή να απορροφώνται. Οπότε, από τους διάφορους ημιαγωγούς, χρησιμοποιείται το πυρίτιο.

Τα φορτισμένα σωματίδια που διέρχονται από τους ανιχνευτές πυριτίου, αντιδρούν H/M με το πυρίτιο και παράγουν ηλεκτρικά σήματα (hits). Τα hits ενώνονται μεταξύ τους και ανακατασκευάζουν τις τροχιές των σωματιδίων (βλέπε Σχήμα 3.2). Με αυτό τον τρόπο, βρίσκονται τα primary vertices. Οι καθυστερημένες διασπάσεις που συμβαίνουν μετά τις συγκρούσεις, εμφανίζουν "δευτερεύουσες κορυφές" (secondary vertices). Μια σχηματική αναπαράσταση των όρων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

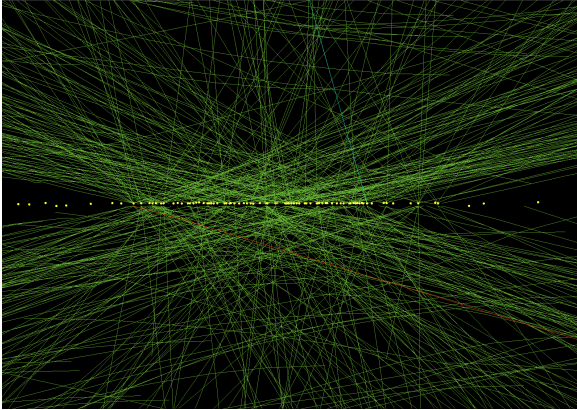
Η μελέτη της τροχιάς κάθε σωματιδίου μπορεί να δώσει πληροφορίες τόσο για το πρόσημο του φορτίου του, όσο και για την ορμή του. Συγκεκριμένα, το μαγνητικό πεδίο B που παράγεται από το υπεραγωγίμο σωληνοειδές πηνίο (βλέπε παρακάτω) έχει προβολή μόνο στον άξονα της δέσμης. Οπότε, η ορμή<sup>22</sup> p του

<sup>22</sup>Το 1968, το Κέντρο Γραμμικού Επιταχυντή στο Στάνφορντ (Stanford Linear Accelerator Center / SLAC), μέσω βαθιών ανελαστικών σχεδιάσεων (deep inelastic scattering), έδειξε πως τα πρωτόνια δεν είναι στοιχειώδη, αλλά αποτελούνται από σημειακά σωματίδια. Ο R. Feynman ονόμασε τα συστατικά ως "παρτόνια" (partons), τα οποία, όπως ήδη

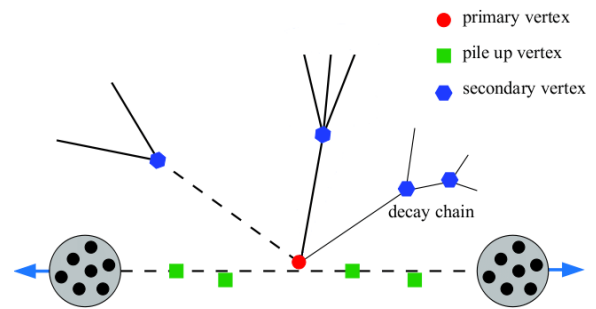
σωματιδίου θα είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο και, έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της κεντρομόλου δύναμης:

$$p = (Bq)\rho$$

όπου  $q$  το φορτίο του σωματιδίου και  $\rho$  η ακτίνα της καμπυλότητας της τροχιάς του. Μελετώντας τον παραπάνω τύπο, παρατηρούμε πως το πρόσημο του φορτίου καθορίζει το πρόσημο του διανύσματος της ορμής και, άρα, και τη διεύθυνση κίνησής του. Επίσης, προκύπτει εύκολα πως η ορμή είναι αντιστρόφως ανάλογη της καμπυλότητας της τροχιάς του.



**Σχήμα 3.2:** Γραφική απεικόνιση των ανακατασκευασμένων από τους ανιχνευτές πυριτίου τροχιών των σωματιδίων που παράχθηκαν σε BX με PU 78. Οι κίτρινες κουκκίδες είναι τα primary vertices.



**Σχήμα 3.3:** Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων vertices σε ένα BX. Οι σφαίρες αποτελούνται από τα πρωτόνια τα οποία δεν συγκρούστηκαν.

Ο λόγος που, στο Σχήμα 3.2, επιλέχθηκε BX με τόσο μεγάλο PU, είναι, ώστε να δειχθεί πόσο απαιτητικός είναι ο ρόλος των ανιχνευτών πυριτίου. Συγκεκριμένα, τα hits αυξάνονται γραμμικά με το PU, αλλά οι δυνατοί συνδυασμοί τους πολλαπλασιάζονται παραγοντικά. Το μεγάλο πλήθος δυνατών συνδυασμών καθιστά τη διαδικασία ανακατασκευής των τροχιών των σωματιδίων πολύ περίπλοκη. Ταυτόχρονα, όμως, φαίνεται και πόσο αποτελεσματικοί είναι οι ανιχνευτές στον σκοπό τους, ακόμα και σε BX με τόσο υψηλή φωτεινότητα, αφού, όχι μόνο ανιχνεύουν σωστά όλα τα σωματίδια, αλλά και καταγράφουν την θέση τους με ακρίβεια 10  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Καλορίμετρα (Calorimeters)

Αν και οι ανιχνευτές πυριτίου βρίσκουν κάποια στοιχεία των σωματιδίων, αυτά δεν είναι αρκετά ώστε να καταφέρουμε να ορίσουμε πλήρως τα σωματίδια. Επίσης, οι ανιχνευτές πυριτίου δεν έχουν τη δυνατότητα να καταγράψουν ουδέτερα φορτισμένα σωματίδια, τα οποία αποτελούν σημαντική πληροφορία για το ποιες αλληλεπιδράσεις αναπτύχθηκαν κατά το BX. Η λύση δίνεται από τα καλορίμετρα, τα οποία είναι όργανα μέτρησης ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα καλορίμετρα είναι φτιαγμένα από κατάλληλο υλικό το οποίο

γνωρίζουμε από το πρώτο κεφάλαιο, είναι, στην ουσία, κουάρκς και γλουόνια. Σύμφωνα με το μοντέλο που τα περιγράφει ("παρτονικό μοντέλο"), τα παρτόνια φέρουν κλασματική ορμή, με κατεύθυνση παράλληλη προς την ορμή του πρωτονίου, δηλαδή  $\vec{p}_{\text{παρτονίου}} = k\vec{p}_{\text{πρωτονίου}}$ , όπου  $k \in (0,1)$ . Ο αριθμός  $k$  είναι τυχαίος για κάθε παρτόνιο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά τις συγκρούσεις πρωτονίων στον LHC, να είναι αδύνατο να γνωρίζουμε την ορμή στην διεύθυνση της δέσμης. Ο λόγος είναι ότι τα πρωτόνια επιταχύνονται σε τόσο μεγάλες ενέργειες, ώστε, κατά την αλληλεπίδρασή τους, να συγκρούονται στην πραγματικότητα τα παρτόνια. Για αυτό, μελετάται μόνο η εγκάρσια (transverse) ορμή των σωματιδίων (επίπεδο  $\eta = 0$ ). Ειδικότερα, το διανυσματικό άθροισμα των εγκάρσιων ορμών όλων των σωματιδίων είναι μηδέν πριν και μετά το BX. Οπότε, για το υπόλοιπο της εργασίας, έκτος αν δηλωθεί διαφορετικά, όταν θα αναφέρεται η ορμή, θα εννοείται η εγκάρσια. Αυτό, φυσικά, επεκτείνεται και στα μεγέθη τα οποία σχετίζονται με αυτή, όπως, για παράδειγμα, η ενέργεια. Ο συμβολισμός αυτών των μεγεθών φέρει ένα δείκτη  $T$ , ο οποίος προκύπτει από το "transverse". Για παράδειγμα, η (εγκάρσια) ορμή συμβολίζεται ως  $p_T$ .



αναγκάζει τα σωματίδια να παράγουν καταιονισμούς (particle shower)<sup>23</sup> [βλέπε Σχήμα 3.4] και μετρούν την ενέργειά τους. Υπάρχουν δύο είδη καταιονισμών, τα οποία χωρίζονται με βάση το είδος της αλληλεπίδρασης που αναπτύσσεται μεταξύ των σωματιδίων και του υλικού. Για αυτά τα δύο είδη καταιονισμών, υπάρχουν και τα αντίστοιχα καλορίμετρα.

#### • Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο (Electromagnetic CALorimeter / ECAL)

Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο μετρά την ενέργεια των σωματιδίων τα οποία αλληλεπιδρούν με την ύλη, κυρίως, ηλεκτρομαγνητικά, τα οποία είναι τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια. Τα μίονια, παρόλο που και αυτά αλληλεπιδρούν κυρίως ηλεκτρομαγνητικά με την ύλη, δεν σταματάνε στο ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο. Η εξήγηση είναι ότι τα σωματίδια που επιβραδύνονται, ακτινοβολούν ενέργεια, η οποία ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης (γερμανικά: Bremsstrahlung). Μέσα στην ύλη, η Bremsstrahlung εξαρτάται από το αντίστροφο του τετραγώνου της μάζας τους. Έτσι, επειδή η μάζα του μιονίου είναι περίπου 207 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου, το ηλεκτρόνιο θα ακτινοβολεί με ισχύ περίπου 40,000 φορές μεγαλύτερη από ότι το μίονιο στις ίδιες ενέργειες. Αυτό σημαίνει πως το μίονιο χάνει πολύ μικρότερη ενέργεια ανά δευτερόλεπτο όσο κινείται μέσα στην ύλη, με αποτέλεσμα να καταφέρνει να διαπερνά το καλορίμετρο.

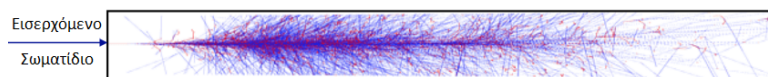
Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο αποτελείται από 76832 κρυστάλλους οι οποίοι είναι φτιαγμένοι από οξειδίο μολύβδου-βολφραμίου ( $PbWO_4$ ). Καλύπτει συνολικά γωνίες με  $|\eta| < 3$  και ζυγίζει περισσότερο από 100 τόνους.

#### • Αδρονικό Καλορίμετρο (Hadronic CALorimeter / HCAL)

Το αδρονικό καλορίμετρο έχει σχεδιαστεί ώστε να μετρά την ενέργεια των σωματιδίων που αλληλεπιδρούν με την ύλη, κυρίως, μέσω της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Αυτά τα σωματίδια είναι τα νουκλεόνια, πόνια και κάρνια. Η ισχυρή αλληλεπίδραση αναπτύσσεται μεταξύ των σωματιδίων και των πυρήνων των ατόμων της ύλης. Όμως, οι πυρήνες καταλαμβάνουν πολύ μικρό χώρο μέσα στα άτομα και η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση έχει πολύ μικρή εμβέλεια. Αυτό συνεπάγεται πως τα σωματίδια μπορούν να διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις μέσα στην ύλη, χωρίς να αλληλεπιδράσουν. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε ως υλικό ο ορείχαλκος, ο οποίος διαθέτει πολύ πυκνή δομή.

Η τοποθεσία του αδρονικού καλορίμετρου είναι γύρω από το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο. Ο λόγος που προηγείται το τελευταίο είναι γιατί το αδρονικό καλορίμετρο έχει τη δυνατότητα να μετρήσει και ηλεκτρόνια και φωτόνια. Αυτό συμβαίνει γιατί τα άτομα ορείχαλκου διαθέτουν πολλά ηλεκτρόνια τα οποία καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του εσωτερικού τους χώρου. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι η H/M αλληλεπίδραση έχει άπειρη εμβέλεια. Ως αποτέλεσμα, αν προηγούταν το αδρονικό καλορίμετρο, θα αχρηστευόταν πλήρως το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο, καθώς όλα τα σωματίδια θα απορροφώνταν από το αδρονικό καλορίμετρο. Επίσης, λόγω του μεγάλου πλήθους των απορροφημένων σωματιδίων, θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να αναγνωριστούν.

Το αδρονικό καλορίμετρο καλύπτει γωνίες που φτάνουν έως και  $|\eta| < 5.2$  και ζυγίζει περίπου 1000 τόνους.



Σχήμα 3.4: Γραφική αναπαράσταση καταιονισμού μέσα σε καλορίμετρο.

### 3.3 Υπεραγωγίμο Σωληνοειδές Πηνίο (Superconducting Solenoid Coil)

Μετά το αδρονικό καλορίμετρο, συναντάμε το υπεραγωγίμο σωληνοειδές πηνίο. Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης 13000 Ampère, δημιουργώντας, έτσι, ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο έντασης 4 Tesla. Το μαγνητικό πεδίο πρέπει να περιοριστεί στον όγκο του CMS και, για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται σιδερένιοι ζυγοί (iron yokes), οι οποίοι παρεμβάλλονται μεταξύ των θαλάμων μιονίων (βλέπε παρακάτω). Όλο το σύστημα, δηλαδή ο μαγνήτης και οι iron yokes, ζυγίζουν συνολικά 12500 τόνους!

<sup>23</sup> Σωματίδια υψηλής ενέργειας, όταν διεισδύουν σε πυκνή ύλη, αλληλεπιδρούν μαζί της και παράγουν σωματίδια με μικρότερη από την δικιά τους ενέργεια. Αυτά, με τη σειρά τους, παράγουν σωματίδια με ακόμα μικρότερη ενέργεια. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να παραχθούν σωματίδια τόσο χαμηλής ενέργειας, ώστε να απορροφηθούν από το υλικό. Το πλήθος των σωματιδίων που παράγονται ονομάζεται καταιονισμός.

Αξίζει να αναφερθεί πως, βασιζόμενοι στη δεύτερη εξίσωση Maxwell, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι κλειστές. Αυτό σημαίνει πως οι δυναμικές γραμμές διαπερνούν τους iron yokes και τους θαλάμους μιονίων με φορά αντίθετη από αυτή με την οποία διαπερνούν τους υπόλοιπους ανιχνευτές. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, όπου η καμπυλότητα της τροχιάς του μιονίου μέσα στους θαλάμους μιονίων είναι αντίθετη από αυτή μέσα στους ανιχνευτές πυριτίου και στα καλορίμετρα. Αυτή η αλλαγή της φοράς των δυναμικών γραμμών έχει και ως αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να είναι μη ομογενές στα Καπάκια.

### 3.4 Θάλαμοι Μιονίων (Muon Chambers)

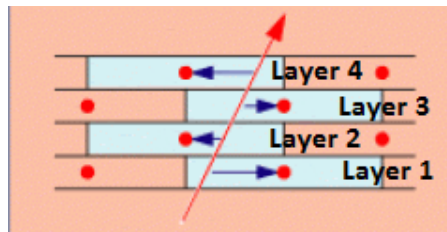
Όπως ήδη αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2, τα μίονια περνούν τα καλορίμετρα χωρίς να απορροφηθούν. Για αυτό, χρησιμοποιούνται θάλαμοι μιονίων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην καταγραφή των ιονισμών του αερίου που περιέχουν, ο οποίος προκαλείται από τα διερχόμενα σωματίδια. Οι θάλαμοι έχουν τοποθετηθεί μετά τα καλορίμετρα και τον υπεραγωγίμο μαγνήτη, ώστε, όπως φαίνεται και στο όνομά τους, να ανιχνεύουν μόνο μίονια. Οι μιονικοί θάλαμοι χωρίζονται σε τρία είδη, τα οποία είναι οι Σωλήνες Ολίσθησης (Drift Tubes / DTs), οι Θάλαμοι Καθοδικών Λωρίδων (Cathode Strip Chambers / CSCs) και οι Θάλαμοι Πλακών Αντίστασης (Resistive Plate Chambers / RPCs). Παρακάτω, θα αναλυθούν εκτενώς αυτές οι τρεις κατηγορίες θαλάμων μιονίων.

#### • Drift Tubes:

Βρίσκονται στο Βαρέλι και καλύπτουν την περιοχή  $|\eta| < 1.2$ . Έχουν πλάτος 4 εκατοστά και ο συνολικός τους αριθμός ανέρχεται στα 172,200. Οι DTs περιέχουν αέριο και ένα θετικά φορτισμένο σύρμα στο κέντρο τους. Τα μίονια, καθώς διέρχονται στο εσωτερικό των DTs, σκεδάζονται με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του αερίου. Ως αποτέλεσμα, ένα πλήθος ηλεκτρονίων αποβάλλεται από τα άτομα και έλκεται από το σύρμα. Αυτό παράγει hits στα σημεία του σύρματος όπου τα ηλεκτρόνια απορροφήθηκαν και, έτσι, γνωρίζουμε έμμεσα τη θέση του μιονίου.

Οι DTs στοιβάζονται ανά τέσσερα στρώματα(layers), δημιουργώντας ένα υπερστρώμα (superlayer). Ο λόγος που στοιβάζονται είναι, συνδυάζοντας τα hits από κάθε DT που διέρχεται το μίονιο, να σχεδιάζεται ένα κομμάτι της τροχιάς του (track segment<sup>24</sup>). Από το track segment, ανάλογα με το πως έχει τοποθετηθεί το superlayer, μπορεί να υπολογιστεί μία από τις συνιστώσες της θέσης του μιονίου. Συγκεκριμένα, αν είναι τοποθετημένο όπως στο Σχήμα 3.5, μπορεί να βρεθεί η θέση του μιονίου κάθετα στην διεύθυνση της δέσμης, δηλαδή η συντεταγμένη  $\phi$ . Στρέφοντάς το superlayer κατά 90° οριζόντια, μπορεί να μετρηθεί η θέση του κατά τη διεύθυνση της δέσμης, δηλαδή η συντεταγμένη  $\eta$ .

Τα superlayers τοποθετούνται ανά τρία μέσα σε θαλάμους, οι οποίοι ονομάζονται Drift Tube Chambers / DTCs. Τα δύο ακριανά superlayers μετρούν τη γωνία  $\phi$  και το μεσαίο τη συντεταγμένη  $\eta$ . Εξαιρέση αποτελούν οι εξωτερικότεροι DTCs. Σε αυτούς, δεν υπάρχει το κεντρικό superlayer, δηλαδή υπολογίζεται μόνο η γωνία  $\phi$  του μιονίου. Οι διαστάσεις των DTCs είναι 2 m x 2.5 m και ο ανιχνευτής CMS περιέχει περίπου 250 από αυτούς.



**Σχήμα 3.5:** Γραφική αναπαράσταση ενός superlayer. Κάθε ορθογώνιο παραλληλόγραμμο είναι ένα DT και η κόκκινη κουκκίδα στο κέντρο του είναι ένα θετικά φορτισμένο σύρμα. Το κόκκινο βέλος είναι η τροχιά του διερχόμενου μιονίου. Τα μπλε βέλη δείχνουν την κίνηση των ηλεκτρονίων που αποβάλλονται από τα άτομα του αερίου κατά την σκέδαση τους με το διερχόμενο μίονιο.

<sup>24</sup>Το track segment αποκαλείται και χτύπημα (stab).

- **Cathode Strip Chambers:**

Βρίσκονται στα Καπάκια και καλύπτουν την περιοχή  $0.9 < |\eta| < 2.4$  (βλέπε Σχήμα 3.6). Το πλήθος τους στον ανιχνευτή CMS φτάνει τα 540. Οι CSCs έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να ανιχνεύουν μεγάλο πλήθος μιονίων και να λειτουργούν μέσα σε μη ομογενές μαγνητικό πεδίο. Ειδικεύοντας στο πρώτο, όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 3.2, η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης κίνησης του μεγαλύτερου ποσοστού των προϊόντων και του άξονα της δέσμης είναι πολύ μικρή.

Η δομή του CSC είναι θετικά φορτισμένα σύρματα, τα οποία διασταυρώνονται κάθετα με αρνητικά φορτισμένες λωρίδες χαλκού. Επιπλέον, περιέχει αέριο. Όπως και οι DTs, όταν ένα μίονιο περάσει στο εσωτερικό των θαλάμων, σκεδάζεται με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του αερίου και ionίζει τα άτομα του. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έλκονται από τα σύρματα και τα κατιόντα κινούνται προς τις λωρίδες. Με αυτό τον τρόπο, καταφέρνουμε να βρούμε έμμεσα τις δύο χωρικές συντεταγμένες του μιονίου. Ειδικότερα, τα καλώδια μετράνε την συντεταγμένη  $\eta$  και οι λωρίδες την γωνία  $\phi$ .

- **Resistive Plate Chambers:**

Βρίσκονται και στα δύο μέρη του CMS, δηλαδή στο Βαρέλι και στα Καπάκια. Ειδικότερα, καλύπτουν την περιοχή  $|\eta| \leq 1.9$  (βλέπε Σχήμα 3.6). Ο ανιχνευτής CMS φέρει συνολικά 610 RPCs. Οι RPCs αποτελούνται από αέριο και από δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες, στις οποίες εφαρμόζεται αρνητικό δυναμικό. Ανάμεσα στις πλάκες, υπάρχουν παράλληλες λωρίδες οι οποίες είναι θετικά φορτισμένες. Το διερχόμενο μίονιο ionίζει τα άτομα του αερίου και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έλκονται από τις λωρίδες. Έτσι, παράγεται ένα hit.

Σε αυτό το σημείο, θα έχει δημιουργηθεί η εξής απορία: Αφού οι RPCs λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και βρίσκονται σε κοινές περιοχές  $|\eta|$  με τους DTs και CSCs, γιατί χρησιμοποιούνται; Μεγαλύτερη βάση στο επιχειρήμα αυτό δίνει το γεγονός πως οι RPCs, σε αντίθεση με τους άλλους δύο θαλάμους μιονίων, έχουν πολύ μικρή χωρική ακρίβεια. Συγκεκριμένα, οι DTs και οι CSCs έχουν χωρική διακριτικότητα περίπου 0.01 cm, ενώ οι RPCs περίπου 1 cm! Ως αποτέλεσμα, από τη διάδοση σφαλμάτων, θα έχουμε υψηλά σφάλματα στις τιμές των χωρικών συντεταγμένων του διερχομένου μιονίου (Για αυτό το λόγο, οι RPCs δεν σχηματίζουν track segments).

Ο λόγος που οι RPCs χρησιμοποιούνται είναι η υψηλή χρονική ανάλυση που διαθέτουν (περίπου 1 ns). Μέσω αυτής, ο Μιονικός Σκανδαλιστής (βλέπε Κεφάλαιο 4) διορθώνει λανθασμένες χρονικές μετρήσεις των hits από τους DTs ή τους CSCs, οι οποίες αποδόθηκαν σε προηγούμενο ή επόμενο BX από αυτό όπου πραγματικά συνέβησαν.

Αξίζει να σημειωθεί πως η τοπική ανακατασκευή της τροχιάς του μιονίου, δηλαδή ο σχηματισμός των track segments, πραγματοποιείται από επεξεργαστικές μονάδες, οι οποίες βρίσκονται στο πίσω μέρος των DTs και CSCs. Επίσης, πέρα από τις χωρικές συντεταγμένες, υπολογίζουν και τη γωνία κάμψης ως προς τη  $\phi$  συντεταγμένη, η οποία συμβολίζεται ως  $\phi_b$  και την ποιότητα της ανακατασκευής<sup>25</sup>. Τα αποτελέσματα των επεξεργαστικών μονάδων, μαζί με τα hits των RPCs, στέλνονται στον Μιονικό σκανδαλιστή, ο οποίος τα συνδυάζει προκειμένου να ανακατασκευάσει την ολοκληρωμένη τροχιά του μιονίου.

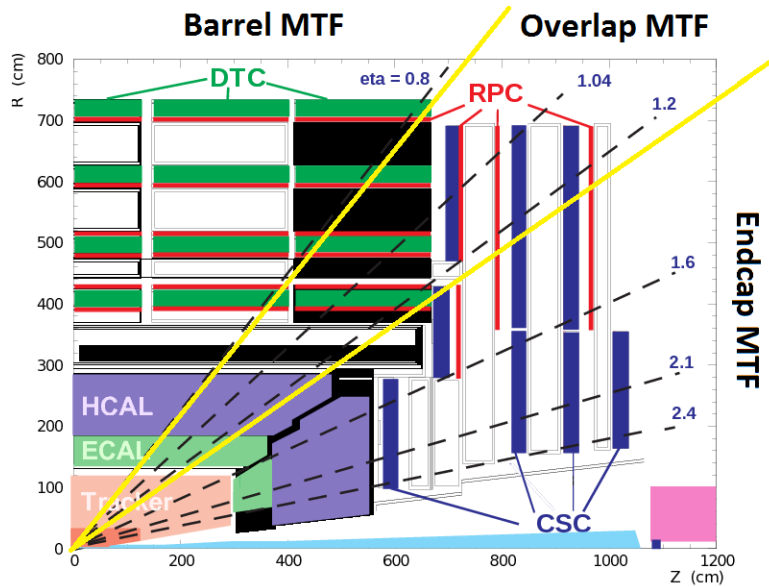
Ολοκληρώνοντας την λεπτομερή ανάλυση της δομής του CMS, μπορούμε να καταλάβουμε πως προκύπτει το όνομά του:

- Συμπαγές, γιατί αποτελεί μια πολύ πυκνή διάταξη.
- Μιονικό, γιατί έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανιχνεύει με πολύ μεγάλη ακρίβεια μίονια.
- Σωληνοειδές, λόγω του υπεραγωγίμου πηνίου που διαθέτει, το οποίο είναι ο ισχυρότερος σωληνοειδής μαγνήτης που έχει κατασκευαστεί ποτέ.

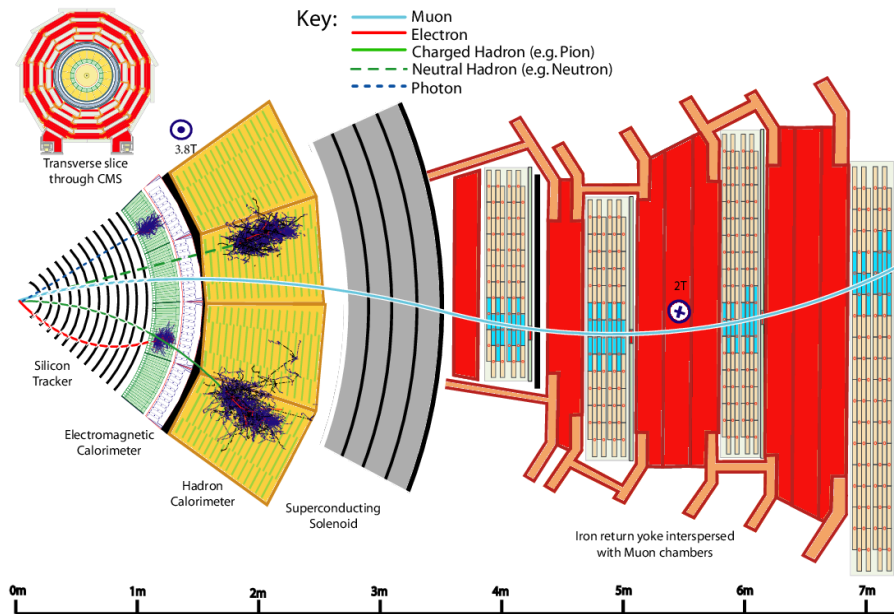
Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, συνοψίζονται στο Σχήμα 3.7 οι τροχιές διαφόρων σωματιδίων στο εσωτερικό του CMS.

<sup>25</sup>Ως ποιότητα της ανακατασκευής ορίζεται το πλήθος των hits που χρησιμοποιήθηκαν για να σχηματιστεί το track segment.





Σχήμα 3.6: Διαμήκης τομή του πρώτου τεταρτημορίου του CMS. Οι αλγόριθμοι Barrel MTF, Overlap MTF και Endcap MTF θα αναπτυχθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 3.7: Εγκάρσια τομή του CMS και οι τροχιές των σωματιδίων μέσα σε αυτή.

## 4 Σκανδαλιστής του CMS

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών BXs είναι 25 ns και σε κάθε BX, πραγματοποιούνται περίπου 50 αλληλεπιδράσεις πρωτονίου – πρωτονίου. Μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε πως, κάθε 1 s, έχουμε  $2 \cdot 10^9$  αλληλεπιδράσεις πρωτονίου – πρωτονίου. Όμως, αυτός ο μεγάλος αριθμός δεδομένων είναι αδύνατον να αποθηκευτεί<sup>26</sup>. Ακόμα και αν ήταν δυνατή η αποθήκευση των δεδομένων, τα περισσότερα events<sup>27</sup> δεν θα μας προσέφεραν κάποια καινούργια πληροφορία. Συγκεκριμένα, πολύ λίγα vertices αποκαλύπτουν ενδιαφέροντα φαινόμενα από άποψη φυσικής, καθώς οι χαμηλοενεργειακές συγκρούσεις έχουν πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης από τις κεντρικές και υψηλοενεργειακές συγκρούσεις, οι οποίες είναι και οι ζητούμενες. Για αυτό το λόγο, εφαρμόζεται ένα σύστημα το οποίο ονομάζεται "Σκανδαλιστής" (Trigger) και λειτουργεί ως κριτής αξιολόγησης των events σε πραγματικό χρόνο<sup>28</sup>.

Ο ρόλος του Trigger είναι, βασιζόμενος στα δεδομένα που συλλέγονται από τους ανιχνευτές, να επιλέγει τα events που περιέχουν ενδιαφέρουσα φυσική και να απορρίπτει τα υπόλοιπα. Για τον σκοπό αυτό, ο Trigger χρησιμοποιεί καλά καθορισμένα κριτήρια από την πλευρά της Φυσικής, τα οποία ονομάζονται τομές (cuts). Τα events τα οποία τελικά αποθηκεύονται για offline ανάλυση, είναι αυτά τα οποία πληρούν τα cuts. Ο Trigger είναι σχεδιασμένος ώστε να μειώνει τον ρυθμό των εισερχομένων events κατά ένα παράγοντα  $4 \cdot 10^4$ . Μιλώντας με αριθμούς, ο ρυθμός των events ελαττώνεται από 40 MHz, που είναι η συχνότητα των BXs ( $1/[25 \text{ ns}]$ ), σε 1 kHz.

Ο Trigger χωρίζεται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο ονομάζεται "Σκανδαλιστής Πρώτου Επιπέδου" (Level-1 Trigger / L1T) και μειώνει τον ρυθμό των εισερχομένων events από 40 MHz σε 100 kHz. Το δεύτερο ονομάζεται "Σκανδαλιστής Υψηλού Επιπέδου" (High-Level Trigger / HLT) και ελαττώνει τον ρυθμό των events από 100 kHz σε 1 kHz. Η βασική διαφορά των δύο επιπέδων είναι ότι ο L1T εκτελείται σε επίπεδο υλικού (hardware), ενώ ο HLT σε επίπεδο λογισμικού (software). Τα δύο αυτά μέρη θα αναλυθούν εκτενώς στα επόμενα υποκεφάλαια.

### 4.1 Level-1 Trigger

Ο L1T [14, 15] αποτελεί το πρώτο επίπεδο σκανδαλισμού στο CMS. Πρέπει, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από το BX, να αποφασίσει αν το event θα κρατηθεί ή θα απορριφθεί. Συγκεκριμένα, ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων από τους ανιχνευτές στον L1T και για την λήψη της απόφασης είναι 3.8  $\mu\text{s}$ <sup>29</sup>. Όμως, ένα BX πραγματοποιείται κάθε 25 ns! Για αυτό το λόγο, έχει δημιουργηθεί μια προσωρινή μνήμη (pipeline memory), η οποία διατηρεί τις πληροφορίες του event, μέχρι ο L1T να λάβει την απόφασή του (βλέπε Σχήμα 4.2). Είναι αυτονόητο πως, στην pipeline memory, τα events ξεχωρίζονται μεταξύ τους και καταγράφονται με τη σειρά με την οποία συνέβησαν.

Όπως είναι λογικό, σε χρονικό διάστημα 3.8  $\mu\text{s}$ , ο L1T δεν έχει τη δυνατότητα να εξετάσει εξονυχιστικά το BX, για να διαπιστώσει αν περιέχει ενδιαφέρουσα φυσική. Οπότε, ψάχνει για πολύ απλά σημάδια, όπως αν περιέχει σωματίδια μεγάλης ενέργειας. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα είναι ένας αναγνώστης ο οποίος, σε μια βιβλιοθήκη, διαβάζει πολύ γρήγορα τους τίτλους των βιβλίων και επιλέγει μόνο όσα βιβλία του φαίνονται ενδιαφέροντα. Για αυτό το λόγο, ο L1T αποτελείται από ειδικά ηλεκτρονικά τα οποία είναι φτιαγμένα για αυτόν και μόνο τον σκοπό.

Τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιεί ο L1T βασίζονται σε συστοιχίες επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (Field Programmable Gate Arrays / FPGAs) και ολοκληρωμένα κυκλώματα<sup>30</sup> συγκεκριμένης εφαρμογής (Application Specific Integrated Circuits / ASICs). Τα πρώτα είναι τύπος ολοκληρωμένου κυκλώματος γενικής χρήσης, τα οποία είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιούνται από τον χρήστη οι

<sup>26</sup>Στην πραγματικότητα, ο απαιτούμενος αποθηκευτικός χώρος είναι πολύ μεγαλύτερος. Ειδικότερα, πέρα από τα δεδομένα του BX τα οποία καταγράφουν οι ανιχνευτές, πρέπει να αποθηκευτούν και τα παράγωγα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται από την offline ανάλυση. Ως παράγωγα μεγέθη εννοούνται, για παράδειγμα, οι χωρικές συντεταγμένες, ορμή, φορτίο και χρονική στιγμή όπου έγινε η ανίχνευση των σωματιδίων.

<sup>27</sup>Τα BXs αποκαλούνται και γεγονότα (events).

<sup>28</sup>Τα δεδομένα πραγματικού χρόνου ονομάζονται online και η επεξεργασία τους online ανάλυση. Αντίστοιχα, τα δεδομένα που αποθηκεύονται ονομάζονται offline και η επεξεργασία τους offline ανάλυση.

<sup>29</sup>Ο συνολικός χρόνος αυτός ονομάζεται χρονικό διάστημα υστέρησης (latency time).

<sup>30</sup>Ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι ένας ημιαγωγός ο οποίος περιέχει μία ομάδα από ηλεκτρονικά στοιχεία όπως τρανζίστορ, δίοδοι, αντιστάσεις, πυκνωτές. Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα πλήρες ηλεκτρικό κύκλωμα.

επιθυμητές λειτουργίες. Με άλλα λόγια, το FPGA είναι ολοκληρωμένο λογικό κύκλωμα με προγραμματιζόμενη λειτουργία ως πρωτογενής μικροεπεξεργαστής. Τα δεύτερα, όπως φαίνεται και στην ονομασία τους, είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα και έχουν σχεδιαστεί για να εκτελέσουν ένα συγκεκριμένο σκοπό. Τα ηλεκτρονικά, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνει ο L1T, κατασκευάζουν αναπαραστάσεις των αδρονικών πιδάκων (jets<sup>31</sup>), της ελλείπουσας ενέργειας<sup>32</sup> και σωματιδίων (περισσότερα παρακάτω). Ο L1T, βάσει αυτών των αναπαραστάσεων, κρίνει αν το event πρέπει να αποθηκευτεί για ανάλυση ή όχι.

Όμως, το μέγεθος σε bits των δεδομένων είναι αρκετά μεγάλο, ώστε η πλήρης ανακατασκευή των σωματιδίων να απαιτεί συνολικό χρόνο 10 s. Φυσικά, ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από το latency time και πρέπει να μειωθεί. Για αυτό το λόγο, ο L1T δέχεται δεδομένα μόνο από τα καλοριμετρα και τους θαλάμους μιονίων και τα οποία έχουν συμπιεστεί σε περιορισμένο αριθμό bits<sup>33</sup>. Αυτά τα συμπιεσμένα δεδομένα ονομάζονται "Αρχικοί Σκανδαλιστές" (Trigger Primitives / TPs) και παράγονται από τους Γεννήτορες Αρχικών Σκανδαλιστών (Trigger Primitive Generators / TPGs). Οι TPGs είναι ηλεκτρονικές μονάδες, οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα στους ανιχνευτές και στον L1T.

Ο L1T χωρίζεται σε τρεις υποσκανδαλιστές: τον καλοριμετρικό, τον μιονικό και τον γενικό. Ο καλοριμετρικός σκανδαλιστής δέχεται δεδομένα από τα δύο καλοριμετρα (ηλεκτρομαγνητικό και αδρονικό) και ο μιονικός από τους θαλάμους μιονίων. Οι πληροφορίες που παράγονται από τους δύο υποσκανδαλιστές (βλέπε παρακάτω) μεταφέρονται στον γενικό σκανδαλιστή, ο οποίος αποφασίζει αν θα αποθηκευτεί το γεγονός ή όχι. Ο γενικός σκανδαλιστής (Global Trigger) ονομάζεται micro Global Trigger και συμβολίζεται ως μGT.

#### • Καλοριμετρικός Σκανδαλιστής:

Ο καλοριμετρικός σκανδαλιστής χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο ονομάζεται Επίπεδο 1 Καλοριμετρικού σκανδαλιστή (Calorimetric trigger Layer 1 / CaloLayer 1). Ο ρόλος του είναι να συγκεντρώνει τα TPs του event από τα καλοριμετρα (ECAL και HCAL), να τα βαθμονομεί και να τα προ-επεξεργάζεται. Έπειτα, στέλνει τα αποτελέσματα στο επόμενο επίπεδο του Καλοριμετρικού Σκανδαλιστή. Ο CaloLayer 1 αποτελείται από πίνακες Επεξεργαστών Καλοριμετρικού Σκανδαλιστή 7 (Calorimeter Trigger Processor boards 7 / CTPs 7).

Το επόμενο μέρος ονομάζεται Επίπεδο 2 Καλοριμετρικού Σκανδαλιστή (Calorimeter Layer 2 / CaloLayer2). Ο CaloLayer2 λαμβάνει τα αποτελέσματα του CaloLayer1 και ανακατασκευάζει τις τροχιές των φυσικών αντικειμένων που ανιχνεύτηκαν. Επίσης, αναγνωρίζει αυτά τα φυσικά αντικείμενα, τα οποία μπορεί να είναι ηλεκτρόνια, φωτόνια, ταυ λεπτόνια<sup>34</sup> ή jets. Ο CaloLayer2 υπολογίζει και ενεργειακά αθροίσματα. Στη συνέχεια, στέλνει στον μGT τα 12 καλύτερα ηλεκτρόνια ή φωτόνια, τα 12 καλύτερα jets και τα 8 καλύτερα ταυ λεπτόνια. Στον CaloLayer2 χρησιμοποιούνται "Κύριοι Επεξεργαστές 7" (Master Processors 7 / MPs 7).

#### • Μιονικός Σκανδαλιστής:

Ο μιονικός σκανδαλιστής χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος δέχεται τα TPs από τους θαλάμους μιονίων. Συγκεκριμένα, τα TPs των DTs και RPCs που βρίσκονται στο Βαρέλι συλλέγονται από πίνακες

<sup>31</sup> Τα jets είναι ροές σωματιδίων μέσα σε νοητούς στενούς κώνους που προέρχονται από την αδρονοποίηση κουάρκς ή γλουονίων. Ως αδρονοποίηση, ορίζεται η διαδικασία σχηματισμού αδρονίων από ελεύθερα κουάρκς και γλουόνια, η οποία, όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 1, οφείλεται στην ισχυρή έλξη που αναπτύσσεται μεταξύ τους.

<sup>32</sup> Όπως ειπώθηκε στην υποσημείωση 22, το διανυσματικό άθροισμα των (εγκάρσιων) ορμών των προϊόντων ενός BX είναι πάντα μηδέν. Όμως, κατά την offline ανάλυση, μπορεί να μελετήσουμε event, στο οποίο η συνολική (εγκάρσια) ορμή μετά το BX να μην είναι μηδέν. Ο κυριότερος λόγος μπορεί να είναι πως στο event παράχθηκαν νετρίνα. Συγκεκριμένα, τα νετρίνα δεν μπορούν να ανιχνευθούν από τις πειραματικές διατάξεις του CMS και, έτσι, δεν μπορεί να μετρηθεί η (εγκάρσια) ορμή τους. Η συνολική (εγκάρσια) ορμή η οποία δεν μετριέται από τους ανιχνευτές, ονομάζεται Εγκάρσια Ελλείπουσα Ορμή και, βασιζόμενοι στην αρχή διατήρησης της ορμής, υπολογίζεται από τον τύπο:  $\vec{p}_{T,ελλείπουσα} = -\sum \vec{p}_{T,ανιχνευμένη}$ . Επιπλέον, επειδή τα νετρίνα έχουν πολύ μικρή μάζα, μπορούμε να θεωρήσουμε την προσέγγιση πως  $E_{T,ελλείπουσα} \approx |\vec{p}_{T,ελλείπουσα}|$ . Το μέγεθος  $E_{T,ελλείπουσα}$  ονομάζεται Ελλείπουσα Εγκάρσια Ενέργεια (Missing Transverse Energy / MET). Πρέπει να τονιστεί πως η MET είναι απλώς μία ένδειξη της παρουσίας νετρίνων στο event, δηλαδή δεν μπορούμε να γνωρίζουμε πόσα νετρίνα παράχθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί πως η μη μηδενική MET δεν συνεπάγεται πάντα πως στα προϊόντα του BX περιέχονται νετρίνα. Μπορούμε να έχουμε σημαντική MET και από στατιστικές διακυμάνσεις των καταιονισμών του αδρονικού καλοριμετρου.

<sup>33</sup> Η διαδικασία αυτή ονομάζεται κόρς γκρέινινγκ (coarse graining).

<sup>34</sup> Ακολουθώντας την λογική που χρησιμοποιήσαμε για να αποδείξουμε ότι τα μίονια διαπερνούν τα καλοριμετρα χωρίς να απορροφηθούν, θα έπρεπε να συμβαίνει το ίδιο και για τα ταυ λεπτόνια. Όμως, η μάζα τους είναι τόσο μεγάλη, ώστε να διασπώνται πολύ γρήγορα. Η ανίχνευσή τους πραγματοποιείται έμμεσα μέσω της απορρόφησης των προϊόντων της διάσπασής τους (κυρίως αδρόνια) από τα καλοριμετρα.

δίδυμης πολυπλεξίας (Twin-Multiplexing boards / TwinMuxs). Τα TPs των RPCs που βρίσκονται στα Καπάκια συλλέγονται από πίνακες Συγκέντρωσης, Προ-επεξεργασίας και Εξάπλωσης (Concentration, Pre-Processing, and Fan-out boards / CPPFs). Τα TPs των CSCs στέλνονται κατευθείαν στο επόμενο επίπεδο. Οι TwinMuxs και οι CPPFs προεπεξεργάζονται τα δεδομένα και στέλνουν τα αποτελέσματα στο επόμενο μέρος.

Το επόμενο κομμάτι του μιονικού σκανδαλιστή περιέχει τρεις αλγόριθμους ανακατασκευής μιονικών τροχιών (muon track finders / MTFs). Κάθε MTF είναι υπεύθυνος για ένα συγκεκριμένο διάστημα  $\eta$ . Ο αλγόριθμος ανακατασκευής μιονικών τροχιών στο Βαρέλι (Barrel MTF / BMTF) ψάχνει για μίονια σε περιοχές όπου  $|\eta| < 0.83$ . Ο αλγόριθμος ανακατασκευής μιονικών τροχιών στα Καπάκια (Endcap MTF / EMTF) αναζητά μίονια σε περιοχές όπου  $1.24 < |\eta| < 2.4$ . Τέλος, ο αλγόριθμος ανακατασκευής μιονικών τροχιών στην επικάλυψη των Καπακίων και του Βαρελιού (Overlap MTF / OMTF) προσπαθεί να βρει μίονια σε περιοχές όπου  $0.83 < |\eta| < 1.24$ . Οι παραπάνω περιοχές  $\eta$  και οι MTFs που δρουν σε κάθε μία από αυτές φαίνονται στο Σχήμα 3.6.

Ένας βασικός λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται τρεις MTFs (και όχι μόνο ένας ή δύο) είναι η διαφορετική γεωμετρία και τεχνολογία των ανιχνευτών. Ειδικότερα, όπως ειπώθηκε στο κεφάλαιο 3, το Βαρέλι χρησιμοποιεί άλλου τύπου θαλάμους μιονίων από τα Καπάκια. Επίσης, στην επικάλυψη των Καπακίων και του Βαρελιού, οι ανιχνευτές είναι μικτοί, δηλαδή περιέχονται και CSCs και DTs. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι το διαφορετικό μαγνητικό πεδίο (περίπου ομογενές στο Βαρέλι, ισχυρά μη ομογενές στα Καπάκια) και η διαφορετική πυκνότητα τροχιών (ψηλότερη στα Καπάκια) απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις και διαφορετική μεταχείριση των ανιχνευτικών δεδομένων για την εύρεση μιονίων με (περίπου) την ίδια ποιότητα και ανάλυση.

Ο BMTF δέχεται αποτελέσματα από τις TwinMuxs και ο EMTF από τους CPPF και CSCs. Ο OMTF λαμβάνει δεδομένα από τις TwinMuxs, τους CPPF και τους CSCs. Κάθε MTF, βασιζόμενος στα αποτελέσματα που δέχεται, ανακατασκευάζει τις τροχιές των μιονίων. Στη συνέχεια, υπολογίζει τις φυσικές παραμέτρους των τροχιών και την ποιότητα της ανακατασκευής τους<sup>35</sup> και στέλνει τα καλύτερα μίονια, μέχρι 36 συνολικά, στο επόμενο επίπεδο. Τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιούνται στον BMTF είναι MP 7, ενώ στους άλλους δύο αλγόριθμους είναι "Σπονδυλωτοί Ευρέτες Τροχιών 7" (Modular Track Finders 7 / MTFs 7).

Το τρίτο και τελευταίο μέρος ονομάζεται Γενικός Μιονικός Σκανδαλιστής (Global Muon Trigger / GMT) και συμβολίζεται ως  $\mu$ GMT (microGMT). Ο  $\mu$ GMT λαμβάνει συνολικά 108 ανακατασκευασμένες τροχιές μιονίων από τους τρεις MTFs, τα οποία κατατάσσει σύμφωνα με την ορμή τους και την ποιότητά τους. Αφού ο  $\mu$ GMT αφαιρεί όσα μίονια εμφανίζονται δύο φορές<sup>36</sup>, στέλνει τα 8 καλύτερα μίονια στον  $\mu$ GT. Ο  $\mu$ GMT αποτελείται από επεξεργαστές MPs 7.

Η πολύπλοκη δομή του L1T συνοψίζεται στο Σχήμα 4.1.

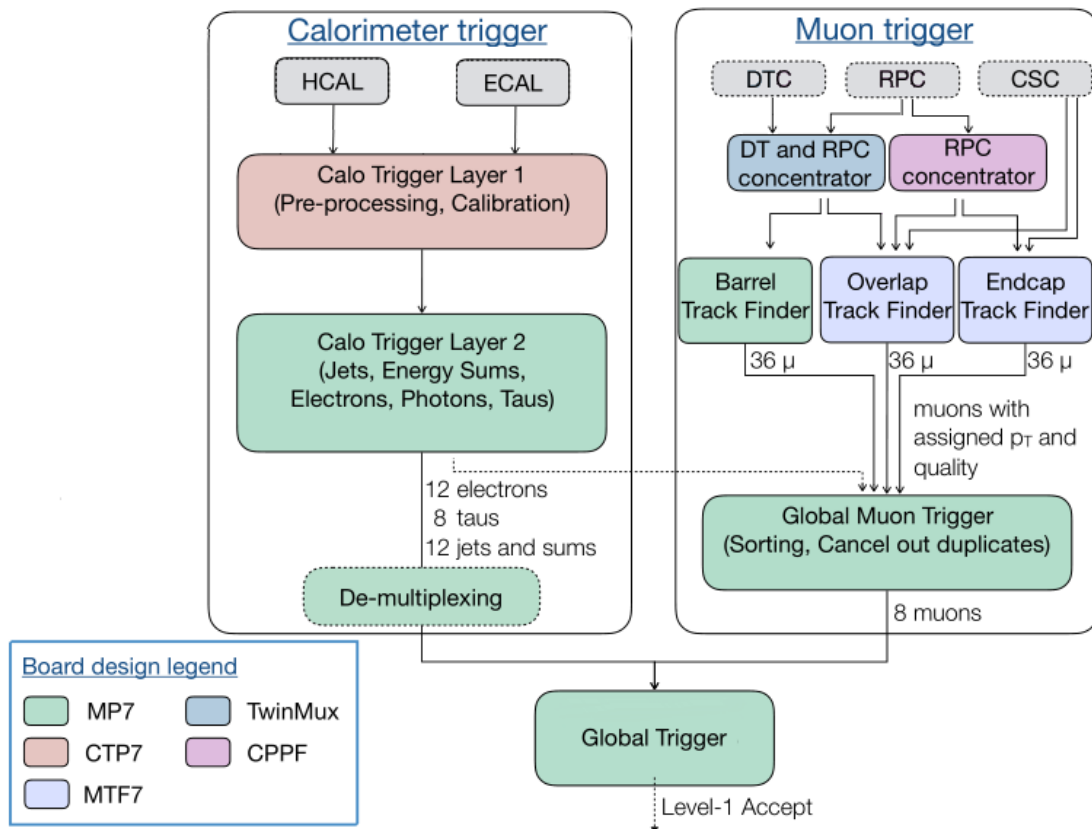
## 4.2 High-Level Trigger

Το δεύτερο και τελευταίο επίπεδο του Trigger είναι ο HLT [16]. Βασικός του σκοπός είναι να μειώσει τον ρυθμό των events στο 1 kHz, το οποίο απαιτεί αποδοτικότερη ανακατασκευή των τροχιών των σωματιδίων, αλλά και εφαρμογή αυστηρότερων cuts. Για αυτό το λόγο, σε αντίθεση με τον L1T, ο HLT έχει πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα του εγκεκριμένου event, όπως είχαν αποθηκευτεί στην pipeline memory. Ως συνέπεια, χρησιμοποιεί αλγόριθμους οι οποίοι είναι παρόμοιοι με αυτούς της offline ανάλυσης. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι γραμμένοι σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και Python.

Η αιτία για την οποία δεν χρησιμοποιούνται αυτοί οι αλγόριθμοι της offline ανάλυσης είναι ο περιορισμένος χρόνος που έχει στη διάθεσή του ο HLT για να λάβει την απόφαση (300 ms). Ειδικότερα, κάθε 1 s, ο HLT δέχεται από την pipeline memory 100,000 events. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα του event

<sup>35</sup>Ο MTF, λόγω του υψηλού PU, είναι δυνατόν να ανακατασκευάσει τροχιές από hits τα οποία δεν συνδέονται μεταξύ τους. Επίσης, ο ανιχνευτής μπορεί να έχει λάβει λανθασμένα hits και, ενώ η ανακατασκευή της τροχιάς να είναι αποτελεσματική, να μην αντιστοιχεί τελικά στην πραγματική τροχιά του σωματιδίου. Αυτά τα δύο είδη τροχιών ονομάζονται ψεύτικες τροχιές (fake tracks). Προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό των fake tracks, ο MTF υπολογίζει την ποιότητα κάθε τροχιάς που ανακατασκευάζει. Η ποιότητα μιας ανακατασκευασμένης τροχιάς υπολογίζεται μέσω τριών παραγόντων: του συνολικού αριθμού των hits, της συμβατικότητας της τροχιάς με τα vertices του BX και της  $\chi^2$  πιθανότητας της προσαρμογής της τροχιάς.

<sup>36</sup>Τα "σωματίδια" που απορρίπτονται από τον  $\mu$ GMT κατά τον έλεγχο για συγχρονισμένες μετρήσεις ονομάζονται σωματίδια φαντάσματα (ghost particles).



**Σχήμα 4.1:** Δομή του Level-1 Trigger του CMS, καθώς και οι ηλεκτρονικές μονάδες που χρησιμοποιούνται σε κάθε μέρος του.

στέλνονται σε έναν από τους επεξεργαστές του HLT. Αξίζει να αναφερθεί πως, ο HLT αποτελείται από μία "φάρμα" επεξεργαστών της αγοράς, η οποία ονομάζεται Event Filter Farm. Ο συνολικός αριθμός των επεξεργαστών που περιέχονται στην "φάρμα" είναι περίπου 13,000 επεξεργαστές. Ο αριθμός των επεξεργαστών πρέπει να είναι επαρκής, ώστε όταν ο τελευταίος είναι απασχολημένος αναλύοντας ένα event, ο πρώτος να είναι ελεύθερος να δεχτεί το επόμενο.

Αφού τα δεδομένα επεξεργάζονται online, θα πρέπει να υπάρχουν μέτρα ασφαλείας, σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο σοβαρό πρόβλημα. Παραδείγματα προβλημάτων είναι να προκληθεί βλάβη σε κάποιον επεξεργαστή ή η ανακατασκευή ενός event να χρειαστεί περισσότερο χρόνο από το αναμενόμενο (λόγω υψηλού PU). Για αυτό το λόγο, ο HLT είναι χωρισμένος σε βήματα, όπου αν κάποιο δεν πληροί τα cuts, τα υπόλοιπα δεν εκτελούνται. Στα πρώτα βήματα, εκτελούνται απλοί αλγόριθμοι, ενώ, στα τελευταία, οι περισσότεροι χρονοβόροι και μεγαλύτερης πολυπλοκότητας. Τα βήματα αυτά μπορούν να χωριστούν σε τρία επίπεδα, τα οποία, ως συνέχεια του L1T, θα ονομάζονται Level-2 Trigger, Level-2.5 Trigger και Level-3 Trigger. Με άλλα λόγια, θα μπορούσαμε να πούμε πως ο HLT είναι συνδυασμός τριών υποσκανδαλιστών. Όμως, επειδή στην αρχιτεκτονική του HLT δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των υποσκανδαλιστών, ο HLT θεωρείται ως μια ενιαία δομή.

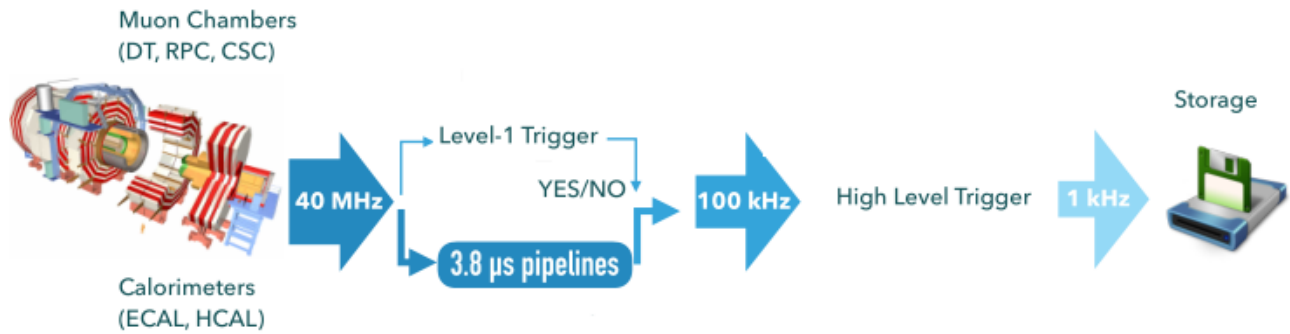
Ο Level-2 Trigger δέχεται όλα τα events που έχουν εγκριθεί από τον L1T. Αυτός ανακατασκευάζει τροχιές σωματιδίων χρησιμοποιώντας πληροφορίες μόνο από τα calorίμετρα ή τους θαλάμους μιονίων. Για παράδειγμα, η τροχιά ενός μιονίου θα ανακατασκευαστεί μόνο με δεδομένα από τους θαλάμους μιονίων. Φυσικά, αφού χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της pipeline memory (και όχι τα TPs), η ακρίβεια ανακατασκευής των τροχιών από τον HLT είναι μεγαλύτερη από αυτή του L1T.

Ο Level-3 Trigger ανακατασκευάζει πλήρως τις τροχιές των σωματιδίων, δηλαδή μέχρι και τα vertices από τα οποία παράχθηκαν. Ως συνέπεια, χρησιμοποιούνται δεδομένα από τους ανιχνευτές πυριτίου. Όπως μπορούμε να αντιληφθούμε, αυτή η διαδικασία είναι αρκετά πολύπλοκη και απαιτεί αρκετό χρόνο για να πραγματοποιηθεί. Για αυτό το λόγο, ο Level-3 Trigger εκτελείται τελευταίος.

Ο Level-2.5 Trigger, όπως φαίνεται και στο όνομά του, αποτελεί ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της ανακατασκευής τροχιών μόνο με βάση τα calorίμετρα ή τους θαλάμους μιονίων και της ανακατασκευής

τροχιών με βάση όλα τα δεδομένα του ανιχνευτή CMS. Συγκεκριμένα, ο Level-2.5 Trigger χρησιμοποιεί μόνο μερικά hits από τους ανιχνευτές πυριτίου για να ανακατασκευάσει τις τροχιές των σωματιδίων.

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, συνοψίζονται σε ένα σχήμα τα επίπεδα του Trigger του ανιχνευτή CMS:



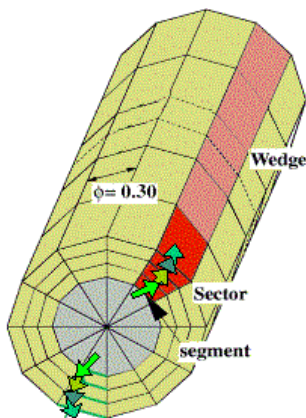
Σχήμα 4.2: Τμήματα του Trigger στο CMS.

## 5 Αλγόριθμοι ανακατασκευής μιονικών τροχιών του Level-1 Trigger στο Βαρέλι

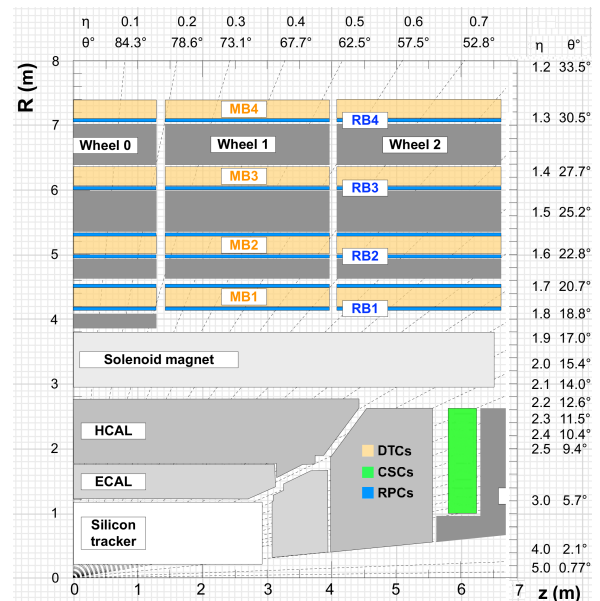
Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, είδαμε αναλυτικά πώς το CMS ανιχνεύει τα σωματίδια που παράγονται κατά το ΒΧ. Επιπλέον, μάθαμε πώς αποφασίζει ο Trigger ποια events αξίζουν να αποθηκευτούν. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθεί πιο λεπτομερώς πώς λειτουργεί ο BMTF [14, 17], γιατί με αυτόν θα ασχοληθούμε στην παρούσα μελέτη.

Πρώτα, όμως, πρέπει να αναφερθεί πως το Βαρέλι χωρίζεται κατά τη διεύθυνση  $\phi$  σε 12 ίσες σφήνες (wedges). Κάθε wedge έχει επίκεντρη γωνία  $30^\circ$  και αποτελείται από 5 τομείς (sectors). Οι sectors χωρίζονται ως προς την αρχική διεύθυνση της δέσμης ( $z$  διεύθυνση) (Βλέπε Σχήμα 5.1). Κάθε sector αποτελείται από 4 DTCs και 6 RPCs. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6, τα δύο χαμηλότερα DTCs βρίσκονται ανάμεσα σε RPCs. Από την άλλη, τα δύο εξωτερικότερα συνορεύουν με RPC μόνο στη κάτω πλευρά τους. Η αιτία είναι πως θέλουμε να μετρήσουμε με καλή ακρίβεια την ορμή των μιονίων, όταν αυτά έχουν χαμηλή ορμή και δεν μπορούν να φτάσουν μέχρι τους ανώτερους θαλάμους. Η ονομασία για τους DTCs, ξεκινώντας από τα χαμηλά επίπεδα και ανεβαίνοντας προς τα εξωτερικά, είναι Muon Barrel (MB) 1, MB 2, MB 3 και MB4. Τα RPCs ακολουθούν την ίδια ονομασία, δηλαδή Resistive Barrel (RB) 1, RB 2, RB 3 και RB 4 (Βλέπε Σχήμα 5.2).

Το Βαρέλι χωρίζεται και ως προς τη  $z$  διεύθυνση σε 5 ίσες τροχούς (wheels). Ο κεντρικός wheel, δηλαδή εκεί όπου συμβαίνει το ΒΧ, ονομάζεται Wheel 0. Οι δύο επόμενοι, οι οποίοι βρίσκονται στα θετικά  $\eta$ , ονομάζονται Wheel 1 και Wheel 2. Οι δύο προηγούμενοι, οι οποίοι βρίσκονται στα αρνητικά  $\eta$ , ονομάζονται Wheel -1 και Wheel -2. Κάθε wheel περιέχει έναν sector.



**Σχήμα 5.1:** Διαχωρισμός των μιονικών ανιχνευτών του Βαρελιού του CMS σε wedges και sectors. Τα πράσινα βέλη αναπαριστούν track segments.



**Σχήμα 5.2:** Διαμήκης τομή του πρώτου τεταρτημορίου του Βαρελιού του CMS και οι ονομασίες των θαλάμων μιονίων.

### 5.1 Barrel Muon Track Finder

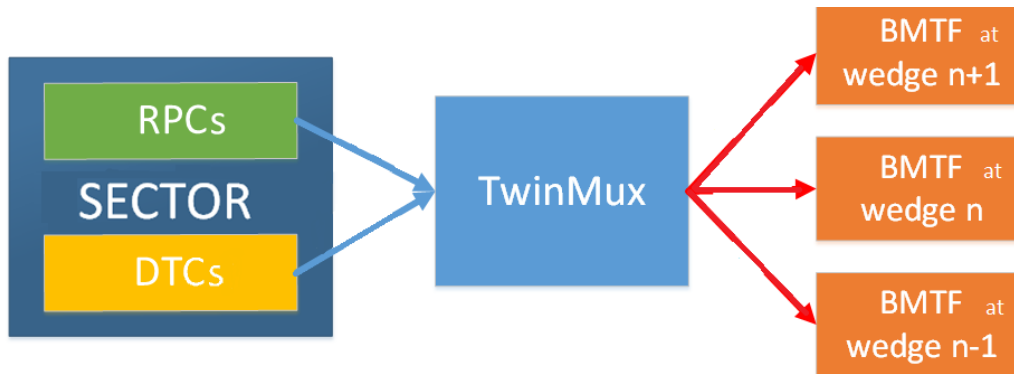
Όπως αναφέρθηκε στο 3ο κεφάλαιο, κάθε DTC περιέχει μια επεξεργαστική μονάδα η οποία ανακατασκευάζει τοπικά (μέσα στο superlayer) την τροχιά του διερχόμενου μιονίου. Ακόμα, δίνει στο μόνιο μια συγκεκριμένη τιμή  $\eta$  οποία δείχνει σε ποιο ΒΧ παράχθηκε. Επίσης, υπολογίζει τις χωρικές συντεταγμένες του μιονίου ( $\eta, \phi$ ), τη γωνία καμπής  $\phi_b$  και την ποιότητα της ανακατασκευής. Αυτή η επεξεργαστική μονάδα ονομάζεται Αναγνωριστής Δεσμίδας και Τροχιάς (Bunch and Track Identifier / BTI) και είναι τύπου ASIC.

Τα αποτελέσματα του BTI στέλνονται στον TPG και στην pipeline memory. Η pipeline memory τα αποθηκεύει μέχρι ο L1T να πάρει την απόφασή του. Ο TPG συμπιέζει τα αποτελέσματα σε μικρό αριθμό



bits και τα στέλνει στην TwinMux. Η TwinMux δέχεται, πέρα από τα TPs του DTC, και τα TPs του RPC. Στη συνέχεια, συγχρονίζει όλα τα TPs στο ίδιο BX και τα συγχωνεύει μεταξύ τους, δημιουργώντας, έτσι, τους αρχικούς υπερσκανδαλιστές (superprimitives). Από τα 4 superprimitives που παράγονται, η TwinMux στέλνει στον BMTF μόνο τα 2 καλύτερα. Ο λόγος είναι οι περιορισμοί στην επεξεργαστική ισχύ του MP7.

Κάθε TwinMux δέχεται όλα τα TPs από το αντίστοιχο sector όπου έχει τοποθετηθεί. Οπότε, το CMS φέρει συνολικά 60 TwinMuxs, 12 σε κάθε wheel. Όμως τι γίνεται στην περίπτωση όπου ένα μόνιο, κατά τη διαδρομή του μέσα στους θαλάμους μιονίων, δεν παραμένει σε μια συγκεκριμένη wedge; Ο BMTF που εκτελείται στη συγκεκριμένη wedge, θα έχει ημιτελή δεδομένα και, έτσι, δεν θα ανακατασκευάσει πλήρως τη τροχιά του μιονίου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ο L1T να θεωρήσει πως αυτή η τροχιά είναι μη φυσική και να την απορρίψει. Φυσικά, αυτό δεν πρέπει να επιτρέπεται, γιατί θα χάνονταν ενδιαφέροντα events! Για αυτό, οι επιστήμονες του CMS έχουν προνοήσει ώστε κάθε TwinMux να στέλνει τα superprimitives της όχι μόνο στον BMTF της wedge όπου βρίσκεται, αλλά και στους BMTFs των γειτονικών wedges (Βλέπε Σχήμα 5.3).



**Σχήμα 5.3:** Πηγή των δεδομένων που δέχεται η TwinMux στη wedge n και οι BMTFs που λαμβάνουν τα αποτελέσματά της.

Ο BMTF χωρίζεται σε τρία μέρη: Ευρέτης  $\varphi$  Τροχιάς ( $\varphi$  Track Finder), Ευρέτης  $\eta$  Τροχιάς ( $\eta$  Track Finder) και Ταξινομος Σφήνας (Wedge Sorter). Κάθε μέρος θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω.

### 5.1.1 $\varphi$ Track Finder

Ο  $\varphi$  Track Finder αποτελεί το βασικότερο μέρος του BMTF, γιατί ανακατασκευάζει ολοκληρωτικά τη τροχιά του μιονίου και υπολογίζει τη ορμή, την ποιότητα και τη γωνία  $\varphi$  της τροχιάς του. Βασική προϋπόθεση του αλγορίθμου αυτού είναι το μόνιο να διέλθει από δύο γειτονικούς DTCs. Ως γειτονικούς DTCs, εννοούμε τους DTCs οι οποίοι διαφέρουν κατά ένα επίπεδο. Φυσικά, ο ορισμός αυτός δεν περιορίζει και τους δύο DTCs να ανήκουν στο ίδιο sector. Μπορεί κάλλιστα ένας από τους δύο να ανήκει σε διπλανό sector (μπροστινό ή πλαϊνό). Ο  $\varphi$  Track Finder χωρίζεται σε τρεις υποαλγόριθμους οι οποίοι είναι: η Προέκταση (Extrapolation), ο Συναρμολογητής Τροχιών (Track Assembler) και η Ανάθεση (Assignment). Οι υποαλγόριθμοι έχουν τοποθετηθεί με βάση τη σειρά με την οποία εκτελούνται. Παρακάτω, θα εξηγηθεί αναλυτικά πως λειτουργεί κάθε υποαλγόριθμος.

- **Extrapolation:**

Η Extrapolation αποτελεί τον πρώτο υποαλγόριθμο του  $\varphi$  Track Finder. Δέχεται, λοιπόν, όλα τα superprimitives από την TwinMux της wedge όπου έχει τοποθετηθεί, καθώς και από τις TwinMuxs των διπλανών wedges. Τα superprimitives, όπως ειπώθηκε παραπάνω, περιέχουν, μεταξύ άλλων, τοπικές πληροφορίες για τη γωνία  $\varphi$  και τη γωνία καμπής  $\phi_b$  του μιονίου. Η Extrapolation χρησιμοποιεί αυτές τις γωνίες, για να βρίσκει από ποια DTCs πέρασε το μόνιο και να ανακατασκευάζει τμήματα της τροχιάς του.

Η Extrapolation εφαρμόζεται κάθε φορά μεταξύ δύο DTCs, όπου ο ένας θάλαμος ονομάζεται "πηγή" και ο άλλος "στόχος". Κατά κύριο λόγο, η πηγή βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από τον στόχο. Οι γωνίες  $\varphi$  και  $\phi_b$  για κάθε θάλαμο φέρουν το όνομά του, δηλαδή  $\phi_{πηγής}$ ,  $\phi_{b,πηγής}$  και  $\phi_{στόχου}$ ,  $\phi_{b,στόχου}$  αντίστοιχα. Η Extrapolation, βασισμένη στις γωνίες  $\phi_{πηγής}$  και  $\phi_{b,πηγής}$ , υπολογίζει την θεωρητική τιμή της  $\phi_{στόχου}$ . Η θεωρητική τιμή της  $\phi_{στόχου}$  ονομάζεται  $\phi_{extrapolated}$  και η εξίσωση που χρησιμοποιείται αναγράφεται



παρακάτω. Αν η απόλυτη τιμή της διαφοράς της  $\phi_{extrapolated}$  και της  $\phi_{στόχου}$  είναι μεγαλύτερη από μία καθορισμένη τιμή, η τροχιά του μιονίου μεταξύ των δύο DTCs απορρίπτεται. Αντίθετα, γίνεται αποδεκτή και στέλνεται στον επόμενο υποαλγόριθμο.

$$\phi_{extrapolated} = \phi_{πηγής} + \phi_{απόκλισης}(\phi_b, \pi_{πηγής}),$$

όπου η  $\phi_{απόκλισης}$  είναι μία συνάρτηση η οποία υπολογίζει, ανάλογα με την τιμή της  $\phi_b, \pi_{πηγής}$ , πόσο θα αποκλίνει το track segment του στόχου από το track segment της πηγής κατά τη  $\phi$  διεύθυνση.

Σε ένα sector, λοιπόν, η Extrapolation θα εκτελείται μεταξύ των ζευγών (MB1, MB2), (MB1, MB3), (MB1, MB4), (MB2, MB3), (MB2, MB4) και (MB4, MB3). Στις παρενθέσεις, ο αριστερός MB είναι η πηγή και ο δεξιός MB ο στόχος<sup>37</sup>. Ωστόσο, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, το μόνιο μπορεί να περάσει και σε γειτονικά sectors ίδιας ή διπλανής wedge. Για αυτό το λόγο, η Extrapolation εφαρμόζεται ταυτόχρονα και σε αυτά τα γειτονικά sectors. Οπότε, σε όλο το CMS, η Extrapolation εκτελείται παράλληλα 72 φορές και, επειδή κάθε sector αναλύει δύο μόνια, ο συνολικός αριθμός ανέρχεται στις 144 φορές.

Όμως, οι παραπάνω υπολογισμοί είναι πολύ χρονοβόροι για τα χρονικά πλαίσια που έχει στη διάθεση του ο BMTF. Επίσης, απαιτούν πολύτιμο μέρος της επεξεργαστικής ισχύος του L1T και, ως αποτέλεσμα, θα περιορίζονται οι λειτουργίες του. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται πίνακες οι οποίοι έχουν εξ' αρχής προαποθηκευμένες τιμές της  $\phi_{απόκλισης}$  για διάφορες τιμές της  $\phi_b, \pi_{πηγής}$ . Ειδικότερα, αντί να εκτελούνται οι πράξεις, κάθε  $\phi_{απόκλισης}$  λαμβάνει, ανάλογα με την τιμή της  $\phi_b, \pi_{πηγής}$ , την αντίστοιχη τιμή από τους πίνακες. Οι πίνακες αυτοί ονομάζονται Πίνακες Αναζήτησης της Προέκτασης (Extrapolation Look-up Tables) και είναι αποθηκευμένοι σε FPGAs.

Η ηλεκτρονική μονάδα στην οποία εκτελείται η Extrapolation ονομάζεται Μονάδα Προέκτασης (Extrapolation Unit).

#### • Track Assembler:

Ο επόμενος υποαλγόριθμος του  $\phi$  Track Finder είναι ο Track Assembler. Ο ρόλος του είναι να δέχεται από την Extrapolation τις επιμέρους αποδεκτές τροχιές του μιονίου και να τις συνδυάζει. Κάθε ολοκληρωμένη τροχιά που παράγει ο Track Assembler φέρει έναν κωδικό 14 bits. Ο κωδικός αυτός περιέχει την πληροφορία του από ποιους τέσσερις DTCs πέρασε το μόνιο. Για αυτό, ο κωδικός ονομάζεται διεύθυνση τροχιάς (track address). Επιπλέον, ο Track Assembler αναθέτει στην ολοκληρωμένη τροχιά μία τιμή η οποία αντικατοπτρίζει την ποιότητα της ανακατασκευής της. Η ηλεκτρονική μονάδα στην οποία εκτελείται ο Track Assembler ονομάζεται Μονάδα του Συναρμολογητή Τροχιάς (Track Assembler Unit).

#### • Assignment:

Η Assignment είναι ο τρίτος και τελευταίος υποαλγόριθμος του  $\phi$  Track Finder. Λαμβάνει από τον Track Assembler τις ολοκληρωμένες τροχιές των μιονίων και υπολογίζει την ορμή και τη γωνία  $\phi$  των μιονίων. Η ηλεκτρονική μονάδα στην οποία εκτελείται η Assignment ονομάζεται Μονάδα Ανάθεσης (Assignment Unit).

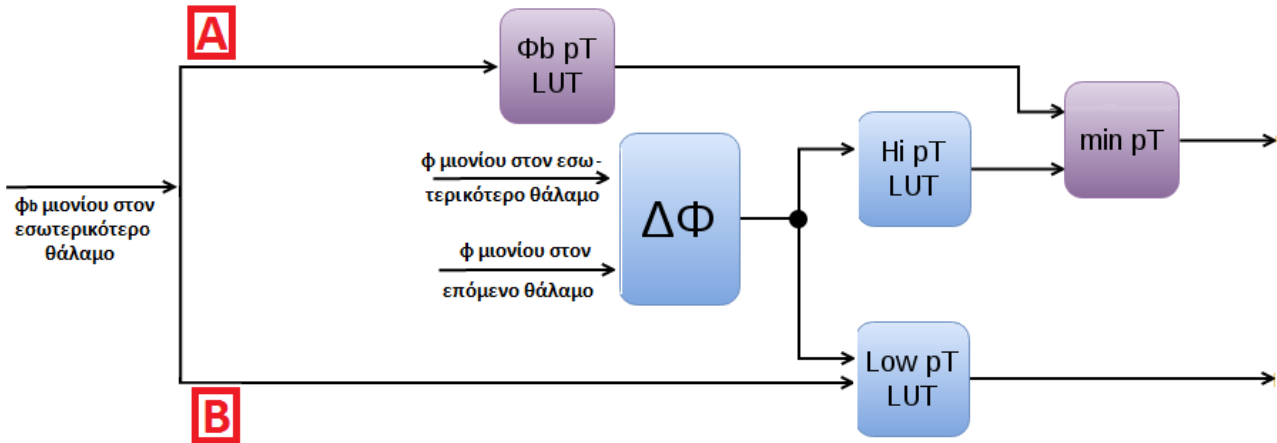
Όμως, όπως αιτιολογήθηκε στην Extrapolation, οι πράξεις στην online ανάλυση πρέπει να αποφεύγονται. Για αυτό, χρησιμοποιούνται και εδώ Look-up Tables, οι οποίοι είναι ξεχωριστοί για κάθε φυσική παράμετρο. Συγκεκριμένα, παράλληλα με την εκτέλεση των δύο παραπάνω υποαλγορίθμων, τα superprimitives που δέχτηκε η Extrapolation, αποθηκεύονται σε μια προσωρινή μνήμη. Όταν ο Track Assembler παραγάγει τις track addresses, αυτές στέλνονται στην προσωρινή μνήμη. Εκεί, επιλέγονται τα superprimitives των θαλάμων από όπου πέρασαν τα μόνια και τα υπόλοιπα απορρίπτονται. Τα αποδεκτά superprimitives εισάγονται ως δεδομένα στους Look-up Tables, οι οποίοι επιστρέφουν τις αντίστοιχες φυσικές παραμέτρους.

Ο υπολογισμός της ορμής είναι μία πολύ περίπλοκη διαδικασία. Η Assignment χρησιμοποιεί ως δεδομένα τις γωνίες του μιονίου μόνο στους δύο εσωτερικότερους DTCs. Αρχικά, μέσω της  $\phi_b$  του εσωτερικότερου από τους δύο θαλάμους, προβλέπεται η τιμή της ορμής. Αν η προβλεπόμενη τιμή της ορμής είναι μικρή (διαδρομή B στο Σχήμα 5.4), τότε η ορμή της τροχιάς υπολογίζεται από τη διαφορά  $\Delta\phi$  μεταξύ των δύο θαλάμων. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι Look-up Tables, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι μόνο για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Από την άλλη, αν η προβλεπόμενη τιμή είναι μεγάλη (διαδρομή A στο Σχήμα 5.4), τότε συγκρίνεται η προβλεπόμενη τιμή της ορμής με αυτή που υπολογίζεται

<sup>37</sup> Στο τελευταίο ζεύγος, η πηγή είναι ο MB4, γιατί η απώλεια ενέργειας του μιονίου στον MB3 συνεπάγει μικρή  $\phi_b$ . Η μικρή  $\phi_b$  καθιστά την προέκταση απρόβλεπτη.

από τη διαφορά  $\Delta\phi$ . Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται σε ειδικούς Look-up Tables. Η μικρότερη τιμή της ορμής από τις δύο επιλέγεται.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι Look-up Tables θεωρούν ως δεδομένο πως οι τροχιές των μιονίων ξεκινούν κοντά στο BX. Η απαίτηση αυτή ονομάζεται περιορισμός σε κορυφή (vertex constraint). Αυτό συμβαίνει ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια στη μέτρηση της ορμής του μιονίου. Συγκεκριμένα, είδαμε παραπάνω, πως η Assignment υπολογίζει την ορμή, βασιζόμενη μόνο σε δύο θαλάμους. Οπότε, με την απαίτηση του vertex constraint, προστίθεται ένα ακόμα σημείο και, άρα, έχουμε σαφέστερη γνώση της καμπύλωσης της τροχιάς του.



Σχήμα 5.4: Αλγόριθμος υπολογισμού της ορμής της μιονικής τροχιάς από την Assignment.

### 5.1.2 η Track Finder

Ο η Track Finder εκτελείται παράλληλα με τον  $\phi$  Track Finder σε κάθε wheel. Ο βασικός ρόλος του είναι ο υπολογισμός της συντεταγμένης  $\eta$  του ανιχνευμένου μιονίου. Ο η Track Finder δέχεται έναν κωδικό από κάθε η superlayer του wheel στον οποίο δρα, αλλά και των διπλανών wheels του. Κάθε κωδικός περιέχει την πληροφορία του από ποια layers πέρασε το διερχόμενο μίονιο, καθώς και την ποιότητα της μέτρησης. Συγκεκριμένα, αν το μίονιο πέρασε και από τα 4 layers, τότε η ποιότητα της μέτρησης ορίζεται ως 1, αλλιώς ως 0. Βασιζόμενος σε αυτούς τους κωδικούς, ο η Track Finder συγκρίνει τα hits με προκαθορισμένα μοτίβα τροχιών και παράγει μία τροχιά. Η τιμή της συντεταγμένης  $\eta$  του μιονίου προσδιορίζεται από αυτή τη τροχιά. Στη συνέχεια, η τροχιά συγκρίνεται με την τροχιά που παρήγαγε ο  $\phi$  Track Finder. Αν ταιριάζουν, τότε το  $\eta$  ορίζεται ως "καλό", αλλιώς ως "πρόχειρο".

### 5.1.3 Wedge Sorter

Ο Wedge Sorter αποτελεί τον τρίτο και τελευταίο αλγόριθμο του BMTF. Λαμβάνει τα αποτελέσματα των  $\phi$  Track Finder και η Track Finder και τα συγχωνεύει. Έτσι, παράγονται μίονια με ορμή, χωρικές συντεταγμένες ( $\eta, \phi$ ), ποιότητα ανακατασκευής και track address. Ο Wedge Sorter, βασιζόμενος στην track address κάθε μιονίου, απορρίπτει τυχόν ghost particles μέσα στη wedge στην οποία αυτός δρα. Ειδικότερα, αν βρει δύο ακριβώς ίδια μίονια, διαλέγει αυτό που έχει τη μεγαλύτερη ποιότητα. Επιπλέον, ο Wedge Sorter κατατάσσει τα μίονια με κυριότερο παράγοντα την ορμή τους και δευτερεύοντα την ποιότητά τους. Τα τρία καλύτερα μίονια στέλνονται στον μGMT.

## 5.2 Kalman Muon Track Finder

Ο BMTF, αν και ιδιαίτερα αποτελεσματικός στον σκοπό του, εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η χρήση πληροφοριών μόνο από δύο DTCs για τον υπολογισμό της ορμής του ανιχνευμένου μιονίου. Επιπλέον, οι Look-up Tables θεωρούν ως δεδομένο ότι η τροχιά του μιονίου είναι vertex constrained. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε περιπτώσεις μιονίων τα οποία παράχθηκαν μακριά από το BX, οι ανακατασκευασμένες τροχιές τους να απορρίπτονται από τον HLT. Συγκεκριμένα, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο HLT προσπαθεί να συνδέσει την τροχιά του μιονίου μέσα στους θαλάμους με

την τροχιά του μέσα στους ανιχνευτές πυριτίου. Οπότε, όταν η σύνδεση αυτή δεν παράγει μια φυσική τροχιά, η μέτρηση απορρίπτεται. Τέλος, ο BMTF έχει πολύ μικρή ακρίβεια στον υπολογισμό της ορμής, η οποία είναι μόνο 10%.

Για την επίλυση των παραπάνω ζητημάτων, έχει προταθεί και ερευνάται η αναβάθμιση του BMTF. Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε το 2018 και σχεδιάστηκε για τον HL-LHC (2027), αλλά θα είναι ο βασικός MTF στο Βαρέλι ήδη από την αρχή του Run 3, το 2022. Ο καινούργιος αλγόριθμος περιέχει το Φίλτρο Κάλμαν (Kalman Filter) [βλέπε παρακάτω] και, για αυτό, ονομάζεται Kalman MTF / KMTF [18]. Ο καινούργιος αλγόριθμος αξιοποιεί πληροφορίες και από τους τέσσερις DTCs από τους οποίους διέρχεται το μόνιο. Επίσης, δεν απαιτεί ότι το μόνιο παράχθηκε στο κέντρο του CMS. Θα δρα στην ίδια περιοχή με τον BMTF ( $|\eta| < 0.83$ ) και θα χρησιμοποιεί την ίδια επεξεργαστική μονάδα με αυτόν (MP7).

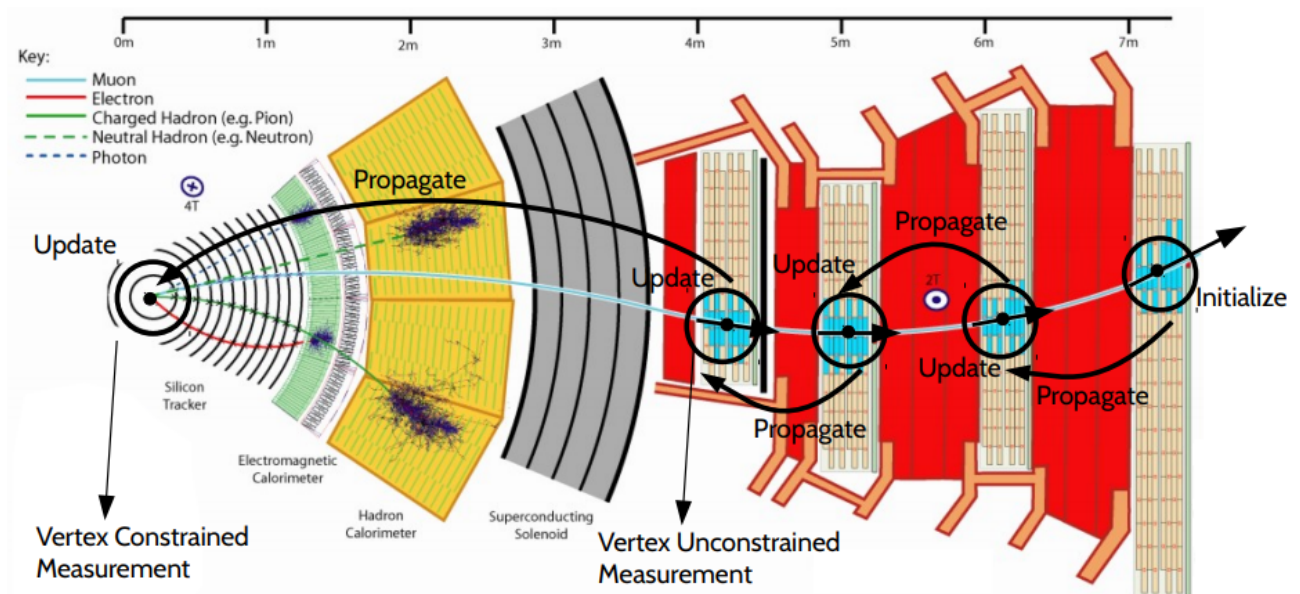
Το Kalman Filter είναι μία επαναληπτική μέθοδος, δηλαδή τα αποτελέσματα μίας επανάληψης χρησιμοποιούνται ως δεδομένα στην ακριβώς επόμενη επανάληψη. Ο βασικός σκοπός του είναι η εκτίμηση τιμών ενός μεγέθους, όταν αυτές συνοδεύονται με σφάλματα. Απαραίτητη προϋπόθεση για το Kalman Filter είναι τα σφάλματα να περιγράφονται από Γκαουσιανή συνάρτηση. Παρακάτω, το Kalman Filter ειδικεύεται<sup>38</sup> στην περίπτωση όπου μελετάμε, δηλαδή τον αλγόριθμο KMTF.

Ο KMTF, σε αντίθεση με τον BMTF, ξεκινάει από τον εξωτερικότερο θάλαμο από τον οποίο πέρασε το μόνιο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί ως αρχικά δεδομένα τις παραμέτρους, μαζί με τα σφάλματά τους, του track segment του μιονίου (εφεξής απλά track segment) στον MB4. Βασιζόμενος στα αρχικά δεδομένα, ο KMTF προβλέπει το track segment του μιονίου στον MB3. Στην πρόβλεψη αυτή, δεν θεωρείται πως το μόνιο χάνει ενέργεια μέσα στους θαλάμους. Λαμβάνονται, όμως, υπόψιν οι πολλαπλές σκεδάσεις του στο iron yoke που βρίσκεται μεταξύ των MB3 και MB4. Στη συνέχεια, το προβλεπόμενο track segment συνδυάζεται με το πιο κοντινό του μετρούμενο track segment στον MB3. Μαθηματικά, η συγχώνευση των track segments σημαίνει πολλαπλασιασμό των Γκαουσιανών συναρτήσεων που περιγράφουν τα track segments. Εδώ, χρησιμοποιείται η ιδιότητα πως ο πολλαπλασιασμός δύο Γκαουσιανών συναρτήσεων παράγει πάλι Γκαουσιανή συνάρτηση. Έτσι, το παραγόμενο track segment έχει και αυτό σφάλματα που περιγράφονται από Γκαουσιανή συνάρτηση. Η μιονική τροχιά προεκτείνεται στο παραγόμενο track segment, το οποίο αποτελεί το αρχικό δεδομένο της επόμενης προέκτασης (από τον MB3 στον MB2).

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η προέκταση της μιονικής τροχιάς να φτάσει στον MB1. Εκεί, η επανάληψη σταματάει και η τροχιά αποθηκεύεται. Η τροχιά αυτή ονομάζεται vertex unconstrained. Ταυτόχρονα, η ίδια μιονική τροχιά προωθείται στο κέντρο του CMS. Ωστόσο, αυτή τη φορά, λαμβάνεται υπόψιν η απώλεια ενέργειας του μιονίου. Ο λόγος είναι πως, κατά τη διαδρομή του μέσα στα υπόλοιπα υλικά, το μόνιο διέρχεται από πυκνότερα υλικά από τους θαλάμους μιονίων. Αυτή η δεύτερη μιονική τροχιά, όπως είναι ήδη γνωστό, ονομάζεται vertex constrained. Η διαδικασία που ακολουθεί ο KMTF, συνοψίζεται στο Σχήμα 5.5.

Όμως, όπως αναφέρθηκε στο κομμάτι των Look-up Tables, δεν πρέπει να πραγματοποιούνται τόσο περίπλοκοι υπολογισμοί στην online ανάλυση. Για αυτό το λόγο, έπειτα από μελέτες, η βελτίωση των σφαλμάτων (Kalman Gain) της τροχιάς από την ένωση των track segments, είναι προϋπολογισμένη και αποθηκευμένη σε κατάλληλο Look-Up Table. Η τιμή που θα λάβει εξαρτάται από το ποιους DTCs πέρασε το μόνιο και από την καμπυλότητα της τροχιάς του.

<sup>38</sup>Ο αναγνώστης ο οποίος ενδιαφέρεται να μάθει περισσότερα σχετικά με τη θεωρία του Kalman Filter, συνιστάται να διαβάσει το ακόλουθο άρθρο: Faragher, R. (2012). Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation. IEEE Signal Processing Magazine



Σχήμα 5.5: Διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος KMTF για την ανακατασκευή μιονικής τροχιάς.

## 6 Συγκριτική μελέτη των επιδόσεων των αλγορίθμων ανακατασκευής ζευγών μιονίων από διασπάσεις σωματιδίων J/ψ στο Βαρέλι

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι αλγόριθμοι BMTF και KMTF είναι πολύ αποτελεσματικοί στον σκοπό τους. Ένα λογικό ερώτημα που δημιουργείται είναι πως υπολογίζεται η απόδοση (efficiency) των αλγορίθμων αυτών. Γενικά, η απόδοση ενός Track Finder ορίζεται ως το κλάσμα των επιτυχημένα ανακατασκευασμένων τροχιών προς τον συνολικό αριθμό των ανιχνευμένων σωματιδίων. Η απόδοση συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\epsilon$ .

Όμως, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, η pipeline memory απορρίπτει όσα events θεωρούνται μη ενδιαφέροντα από τον L1T. Έτσι, δεν έχουμε τη δυνατότητα να τα αποθηκεύσουμε και να ελέγξουμε κατά πόσο ήταν σωστή ή όχι η απόφαση του L1T. Για αυτό το λόγο, οι επιστήμονες προσομοιώνουν με μεθόδους Μόντε Κάρλο (Monte Carlo) το πείραμα CMS.

Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιούνται διάφορα προγράμματα όπως, για παράδειγμα, το "Pythia 8.1" (Pythia 8.1) [19] και το "Γεωμετρία ΚΑι Ανίχνευση 4" (GEometry ANd Tracking 4 / GEANT4) [20]. Το πρώτο είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και προσομοιώνει συγκρούσεις πρωτονίου – πρωτονίου στον LHC. Τα σωματίδια που δημιουργούνται σε ένα προσομοιωμένο event ονομάζονται παραγόμενα (generated). Το δεύτερο είναι και αυτό γραμμένο σε C++ και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της πορείας των σωματιδίων μέσα στον ανιχνευτή. Αυτά τα δύο προγράμματα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

### 6.1 Ορισμός διμιοιικής απόδοσης

Ένα απαιτητικότερο κριτήριο εξέτασης της επίδοσης των αλγορίθμων MTF είναι η διμιοιική απόδοση. Η διμιοιική απόδοση είναι ο έλεγχος της ικανότητας των MTF να ανακατασκευάζουν επιτυχώς ζεύγος μιονίων το οποίο προέρχεται από διάσπαση σωματιδίου. Η παρούσα εργασία μελετά την διμιοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF σε περιπτώσεις όπου το ζεύγος μιονίων προέρχεται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ. Ο λόγος που επιλέχθηκε το σωματίδιο J/ψ είναι η μικρή γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των κατευθύνσεων κίνησης των παραγόμενων από τη διάσπασή του μιονίων. Ειδικότερα, η ορμή του J/ψ ισομοιράζεται κατά προσέγγιση στο ζεύγος των παραγόμενων μιονίων, γιατί τα μίονια έχουν ίδια μάζα. Οπότε, λόγω της αρχής διατήρησης της ορμής, όσο μεγαλύτερη είναι η ορμή του J/ψ, τόσο μικρότερη είναι η γωνία μεταξύ των κατευθύνσεων κίνησης των παραγόμενων μιονίων. Έτσι, επειδή στο CMS το J/ψ παράγεται με μεγάλη ορμή, τα δύο μίονια της διάσπασής του έχουν μικρή γωνιακή απόσταση μεταξύ τους. Ως συνέπεια, η απόδοση ανακατασκευής του J/ψ δείχνει κατά πόσο ικανοί είναι οι BMTF και KMTF στην ανακατασκευή ζευγών τροχιών μεγάλης εγγύτητας. Η σχέση με την οποία η απόδοση υπολογίζεται, είναι:

$$\epsilon_{J/\psi} = N_{\text{επιτυχώς\_ανακατασκευασμένα\_J/}\psi} / N_{\text{generated\_J/}\psi}$$

Ο παρονομαστής αποτελεί το σύνολο των events που περιέχουν generated J/ψ με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, τα δύο generated μίονια τα οποία προέρχονται από τη διάσπαση ενός generated J/ψ, θα πρέπει να έχουν  $|\eta| < 0.83$  και  $p_T > 3$  GeV/c. Η πρώτη ανίσωση χρησιμοποιείται γιατί εξετάζονται μόνο οι αλγόριθμοι BMTF και KMTF (μιας και σε αυτή τη περιοχή  $|\eta|$  δρουν). Η δεύτερη ανίσωση διασφαλίζει πως τα generated μίονια φτάνουν τουλάχιστον μέχρι το MB1, δηλαδή ανιχνεύονται τουλάχιστον από έναν θάλαμο μιονίων. Τέλος, τα generated μίονια πρέπει να είναι σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή μετά το πέρας όλων των διεργασιών εσωτερικής ακτινοβολίας του γεννήτορα events.

Ο αριθμητής είναι το πλήθος των  $N_{\text{generated\_J/}\psi}$  events, στα οποία τα generated μίονια που προέρχονται από διασπάσεις generated J/ψ, έχουν ανακατασκευαστεί επιτυχώς από τον BMTF (ή τον KMTF). Επιπλέον, τα ανακατασκευασμένα μίονια πρέπει να έχουν ορμή μεγαλύτερη από 5 GeV/c. Τέλος, τα ζεύγη ανακατασκευασμένων μιονίων πρέπει να αναπαράγουν το J/ψ, δηλαδή την μάζα του και το φορτίο του.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο, αναλύεται εκτενώς ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, για τον υπολογισμό της διμιοιικής απόδοσης των BMTF και KMTF. Για το υπόλοιπο της εργασίας, όταν θα αναγράφεται απλώς η λέξη "αλγόριθμος", θα εννοείται αυτός ο αλγόριθμος.

## 6.2 Περιγραφή αλγορίθμου υπολογισμού διμιοιικής απόδοσης

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε δείγμα events  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  με  $p_{T_{J/\psi}} > 8 \text{ GeV}/c$ . Τα events του δείγματος έχουν ομοιόμορφη κατανομή ως προς το PU, το οποίο κυμαίνεται από 28 μέχρι 62 <sup>39</sup>. Η online ανακατασκευή των μιοιικών τροχιών πραγματοποιήθηκε μέσω των αλγορίθμων BMTF και KMTF. Πρέπει να σημειωθεί πως τα online ανακατασκευασμένα (επιτυχώς ή ανεπιτυχώς) μόνια ονομάζονται L1 μόνια. Ο αλγόριθμος είναι γραμμένος σε C++ και υλοποιείται στο περιβάλλον της ROOT<sup>40</sup>.

Αρχικά, από το συνολικό πλήθος events, μελετώνται μόνο όσα περιέχουν ζεύγη μιοιίων (τα οποία προέρχονται από διάσπαση  $J/\psi$ ), των οποίων και τα δύο μέλη έχουν  $|\eta| < 0.83$  και ορμή μεγαλύτερη από  $6 \text{ GeV}/c$ . Ο λόγος που η ορμή των μιοιίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $6 \text{ GeV}/c$ , και όχι από  $3 \text{ GeV}/c$  (όπως ειπώθηκε στο υποκεφάλαιο 6.1), είναι ότι η  $p_{T_{J/\psi}}$  στο δείγμα είναι πάντα μεγαλύτερη από  $8 \text{ GeV}/c$ . Κατά συνέπεια, δεν παράγονται από την διάσπαση σωματιδίων  $J/\psi$  μόνια με ορμή μικρότερη από  $6 \text{ GeV}/c$ . Αν βρεθεί ένα τέτοιο event, τότε, για κάθε L1 μόνιο που παράχθηκε στο event, υπολογίζεται η γωνιακή απόστασή του από κάθε generated μόνιο του ζεύγους. Αν είναι μικρότερη από 0.35 (βλέπε επόμενη παράγραφο), τότε το L1 μόνιο ονομάζεται "πιθανώς ταιριασμένο" (potentially matched) ως προς το αντίστοιχο generated μόνιο. Επιπρόσθετα, τα L1 μόνια πρέπει να έχουν ορμή μεγαλύτερη από  $5 \text{ GeV}/c$ . Τα L1 μόνια που ικανοποιούν τις δύο παραπάνω συνθήκες, αποθηκεύονται σε δύο δυναμικούς πίνακες, ανάλογα με το ως προς ποιο generated μόνιο είναι potentially matched. Αν ένας ή και οι δύο δυναμικοί πίνακες είναι άδειοι, τότε σημαίνει ότι ο BMTF (ή ο KMTF) απέτυχε.

Η επιλογή του cut στην  $\Delta R(\text{L1 μόνιο, generated μόνιο})$  δεν είναι τυχαία. Αντιθέτως, βασίζεται στα Σχήματα 6.1 μέχρι 6.4, τα οποία είναι ιστογράμματα που έχουν γεμίσει με την ελάχιστη  $\Delta R(\text{L1 μόνιο, generated μόνιο})$  κάθε event. Παρατηρούμε πως, και στα τέσσερα ιστογράμματα, εμφανίζεται μια κορυφή στις χαμηλές τιμές. Σε αυτές τις μικρές τιμές της ελάχιστης  $\Delta R(\text{L1 μόνιο, generated μόνιο})$  αντιστοιχούν L1 μόνια που ταιριάζουν γεωμετρικά (ως προς την κατεύθυνση) με τα αντίστοιχα generated μόνια. Από την άλλη, η μακριά ουρά των ιστογραμμάτων προς τις μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχεί σε L1 μόνια, τα οποία δεν ταιριάζουν γεωμετρικά με τα αντίστοιχα generated μόνια. Αυτά τα L1 μόνια μπορεί να προέρχονται είτε από το PU, είτε από κακή ανακατασκευή των generated μιοιίων από τον BMTF (ή KMTF). Ένας άλλος λόγος μπορεί να είναι πως αυτά τα L1 μόνια ταιριάζουν γεωμετρικά με τα άλλα generated μόνια των ζευγών. Αυτή είναι και η αιτία όπου εμφανίζεται μια καμπύλη κοντά στην τιμή 0.65. Οπότε, επιλέγοντας το cut στη  $\Delta R(\text{L1 μόνιο, generated μόνιο})$  ίσο με 0.35, αποκλείεται αυτή η μακριά ουρά.

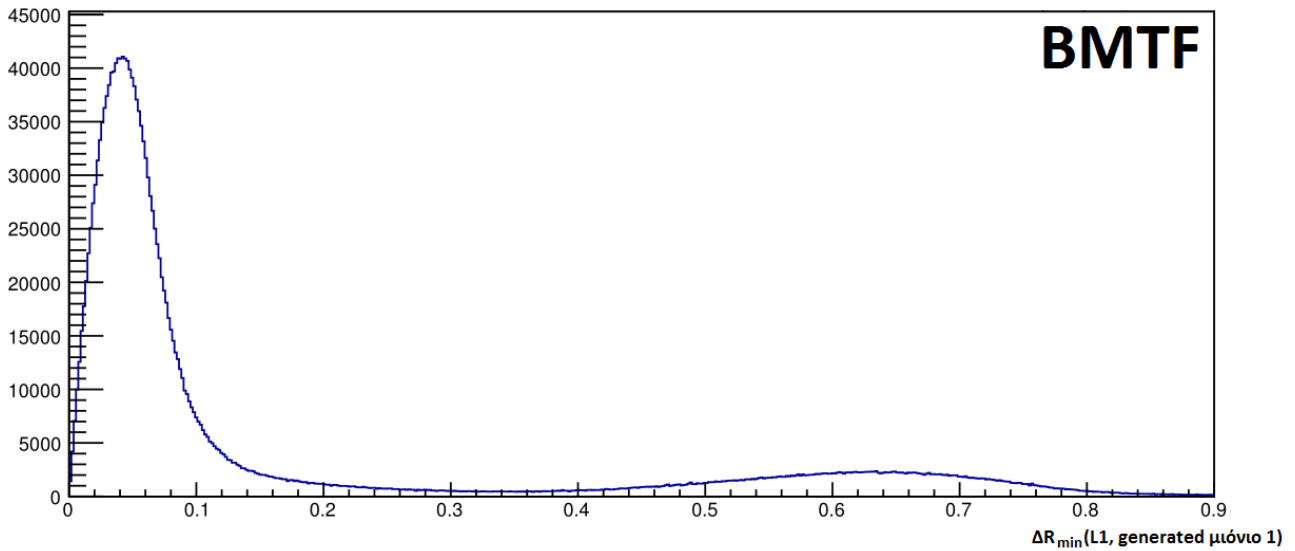
Συνεχίζοντας την περιγραφή του αλγορίθμου, εκτελείται ένας βρόχος τόσες φορές όσο το σύνολο των στοιχείων του ενός από τους δύο δυναμικούς πίνακες. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, δεν παίζει ρόλο ποιος θα επιλεγεί. Στο εσωτερικό του βρόχου αυτού, εκτελείται και άλλος βρόχος. Οι συνολικές επαναλήψεις του εσωτερικού βρόχου είναι ίσες με το πλήθος των στοιχείων του άλλου δυναμικού πίνακα. Κάθε μόνιο του ενός δυναμικού πίνακα συνδυάζεται με μόνιο του άλλου δυναμικού πίνακα και δημιουργείται ένα ζεύγος μιοιίων. Ελέγχεται αν τα μόνια του ζεύγους είναι διαφορετικά μεταξύ τους και αν έχουν αντίθετο φορτίο. Επίσης, εξετάζεται αν το ζεύγος παράγει τη μάζα του  $J/\psi$ . Αν κανένας συνδυασμός δεν ικανοποιεί τις παραπάνω συνθήκες, τότε έχουμε αποτυχία.

Εύκολα παρατηρούμε πως δεν έχει καμία σημασία ποιος δυναμικός πίνακας θα τοποθετηθεί στον εξωτερικό βρόχο. Αυτό που παίζει ρόλο είναι μόνο το ζευγάρι μεταξύ των L1 μιοιίων. Επίσης, φαίνεται γιατί θα ήταν λάθος να επιλέγεται μόνο το L1 μόνιο το οποίο έχει τη μικρότερη γωνιακή απόσταση από το αντίστοιχο generated μόνιο. Η αιτιολόγηση δίνεται με το ακόλουθο χαρακτηριστικό παράδειγμα, το οποίο απεικονίζεται και στο Σχήμα 6.5. Έστω πως μελετάται event το οποίο περιέχει παραπάνω από ένα L1 μόνια τα οποία είναι potentially matched με το αντίστοιχο generated μόνιο. Αν επιλεγεί μόνο το L1 μόνιο το οποίο είναι κοντινότερο ως προς το αντίστοιχο generated μόνιο, υπάρχει πιθανότητα να έχουμε αποτυχία. Ειδικότερα, μπορεί το κατάλληλο potentially matched L1 μόνιο, το οποίο αποτελεί μέλος του ζεύγους που αναπαράγει το σωματίδιο  $J/\psi$ , να βρίσκεται πιο μακριά από το αντίστοιχο generated μόνιο.

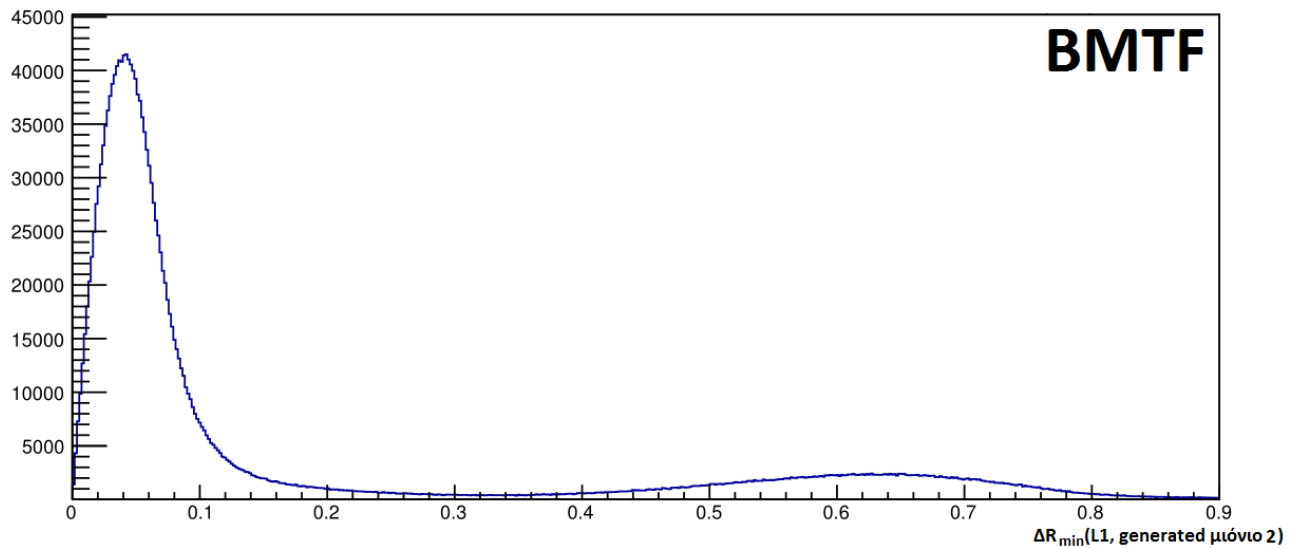
Τα σχήματα τα οποία παράχθηκαν από τον αλγόριθμο, επισυνάπτονται και αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

<sup>39</sup>Το σετ δεδομένων είναι το "/JpsiToMuMu\_JpsiPt8\_TuneCUEP8M1\_13TeV-pyth8/RunIISummer17MiniAOD-NZSFlatPU28to62\_92X\_upgrade2017\_realistic\_v10-v1/MINIAODSIM" και βρίσκεται στον ιστότοπο: <https://cmsweb.cern.ch/das/>.

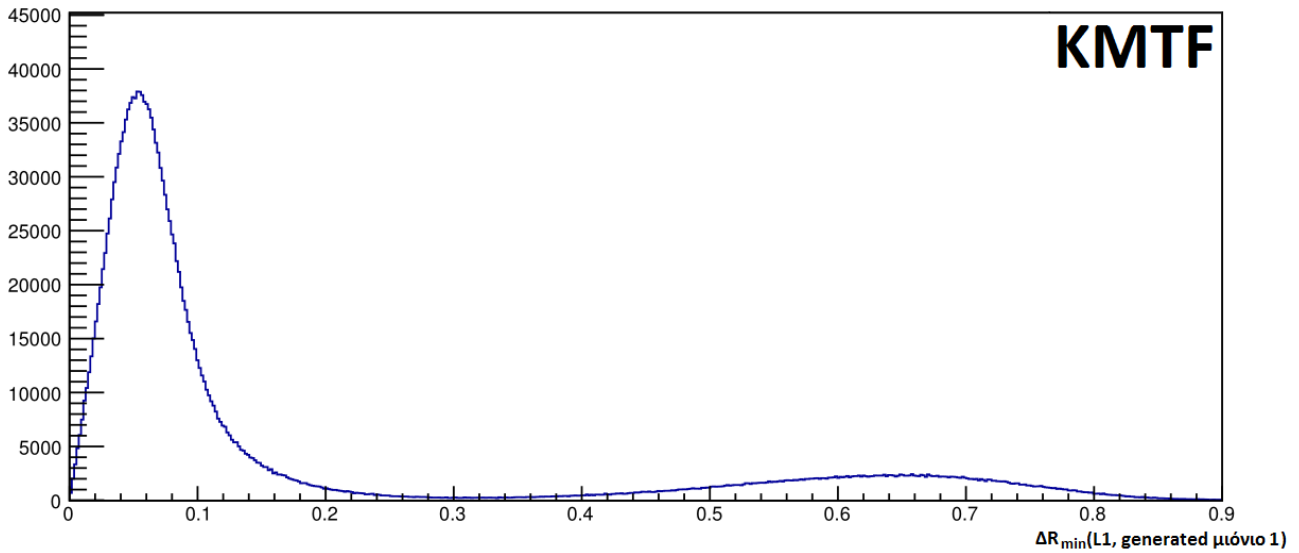
<sup>40</sup>Η ROOT [21] είναι προγραμματιστικό περιβάλλον, γραμμένο κυρίως σε C++. Οι κύριες λειτουργίες της είναι η επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, η στατιστική ανάλυση και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η ROOT αναπτύχθηκε από τους επιστήμονες του CERN.



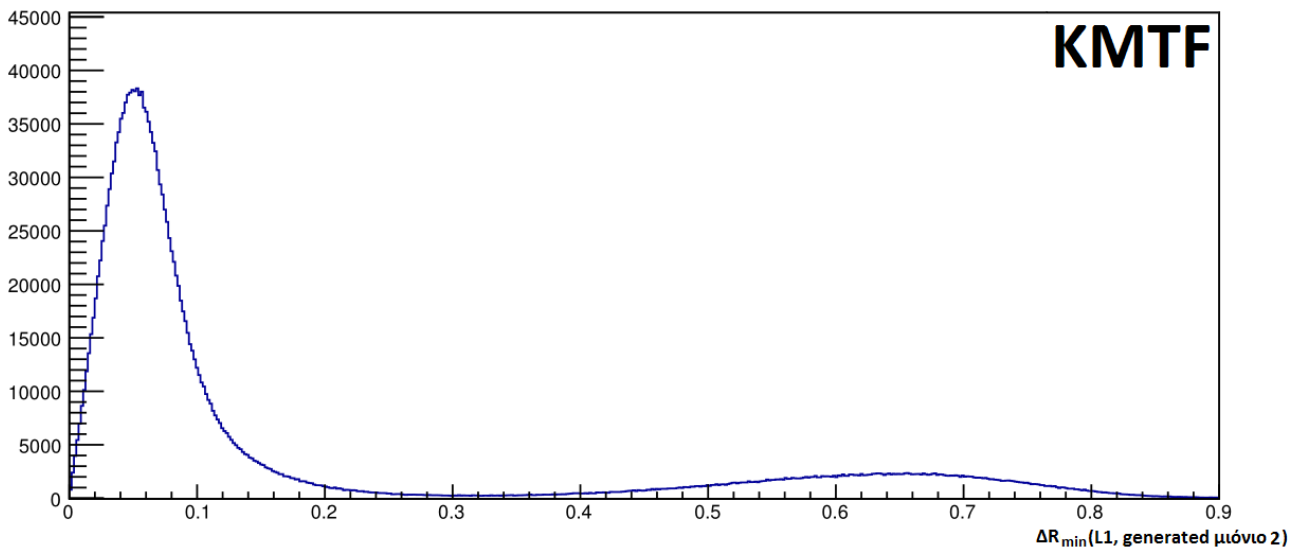
Σχήμα 6.1: Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του ενός από τα δύο generated μόνια (τα οποία προέρχονται από διάσπαση J/ψ) και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο BMTF.



Σχήμα 6.2: Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του άλλου generated μιονίου του ζεύγους και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο BMTF.

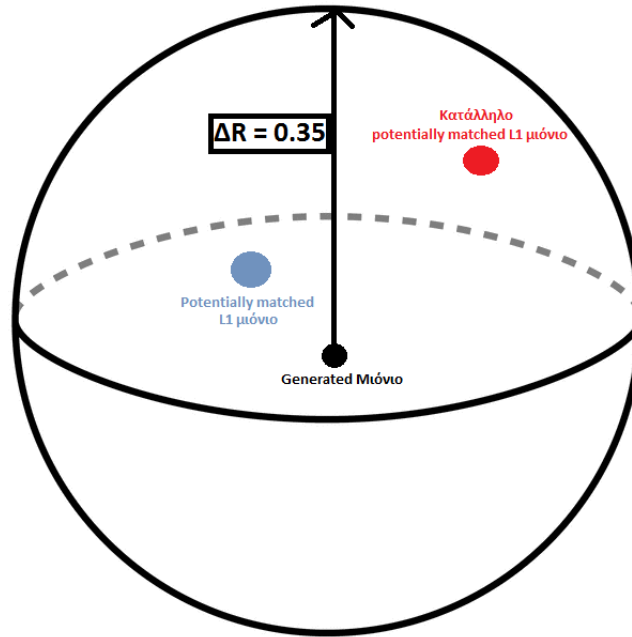


**Σχήμα 6.3:** Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του ενός από τα δύο generated μόνια (τα οποία προέρχονται από διάσπαση  $J/\psi$ ) και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο KMTF.



**Σχήμα 6.4:** Ιστόγραμμα της ελάχιστης γωνιακής απόστασης μεταξύ του άλλου generated μιονίου του ζεύγους και των L1 μιονίων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τον αλγόριθμο KMTF.

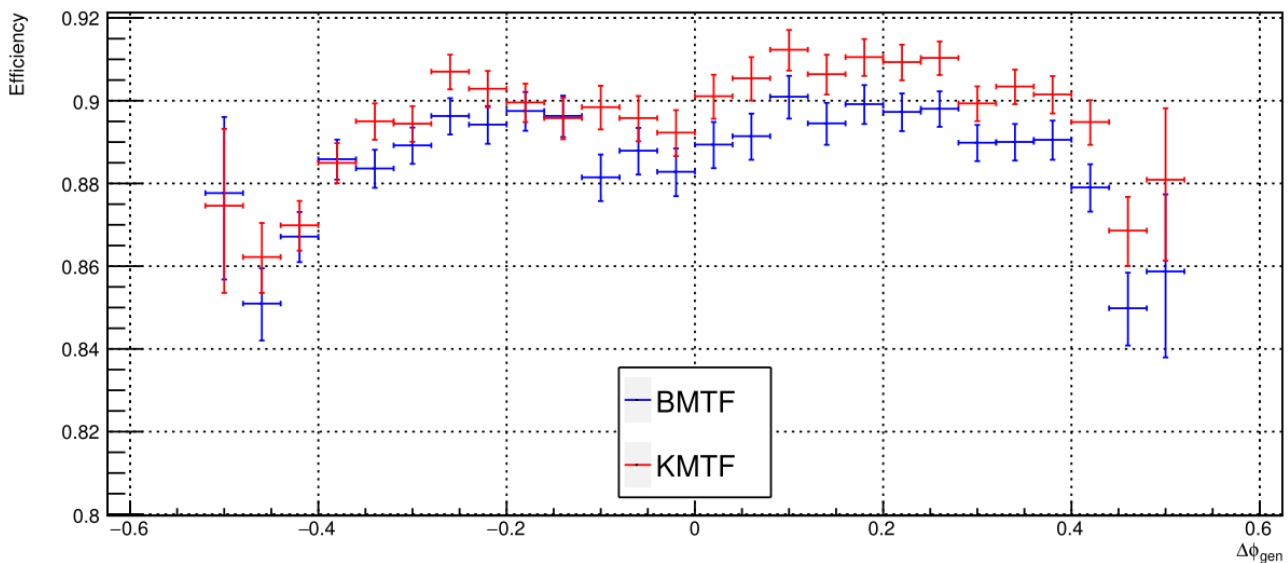




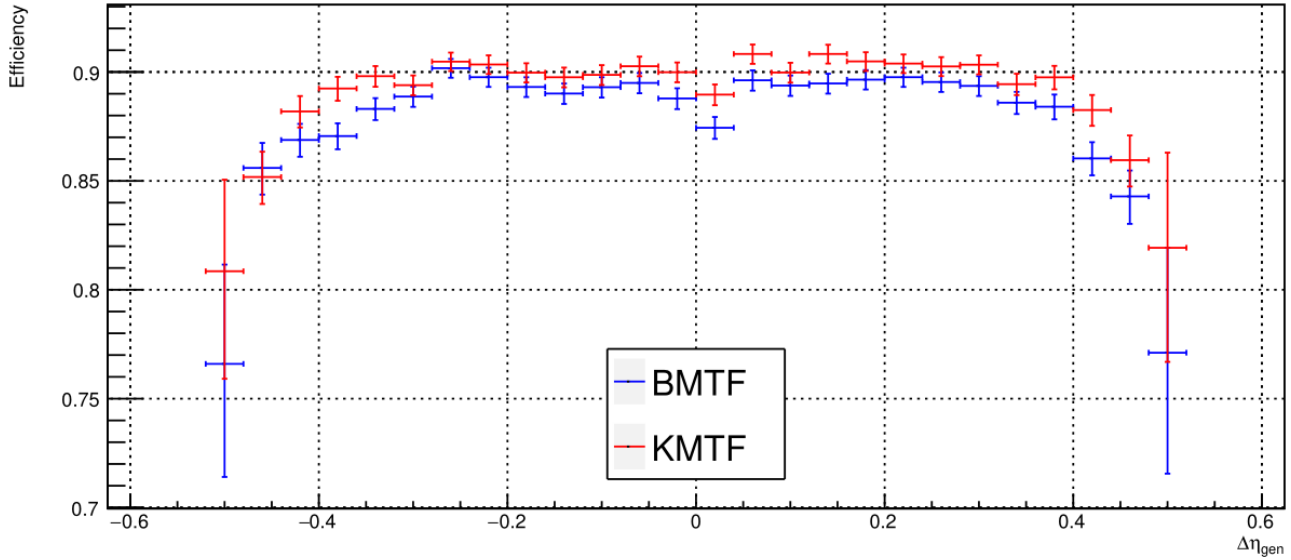
**Σχήμα 6.5:** Σφαίρα ακτίνας  $r = 0.35$ , στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ένα generated μιόνιο. Μέσα στην σφαίρα, περιέχονται όλα τα potentially matched L1 μιόνια ως προς αυτό το generated μιόνιο. Το μπλε μιόνιο έχει τη μικρότερη γωνιακή απόσταση ως προς το generated μιόνιο. Όμως, το κόκκινο μιόνιο είναι το κατάλληλο για μέλος του ζεύγους L1 μιονίων, ώστε να αναπαραχθεί επιτυχώς το J/ψ.

### 6.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

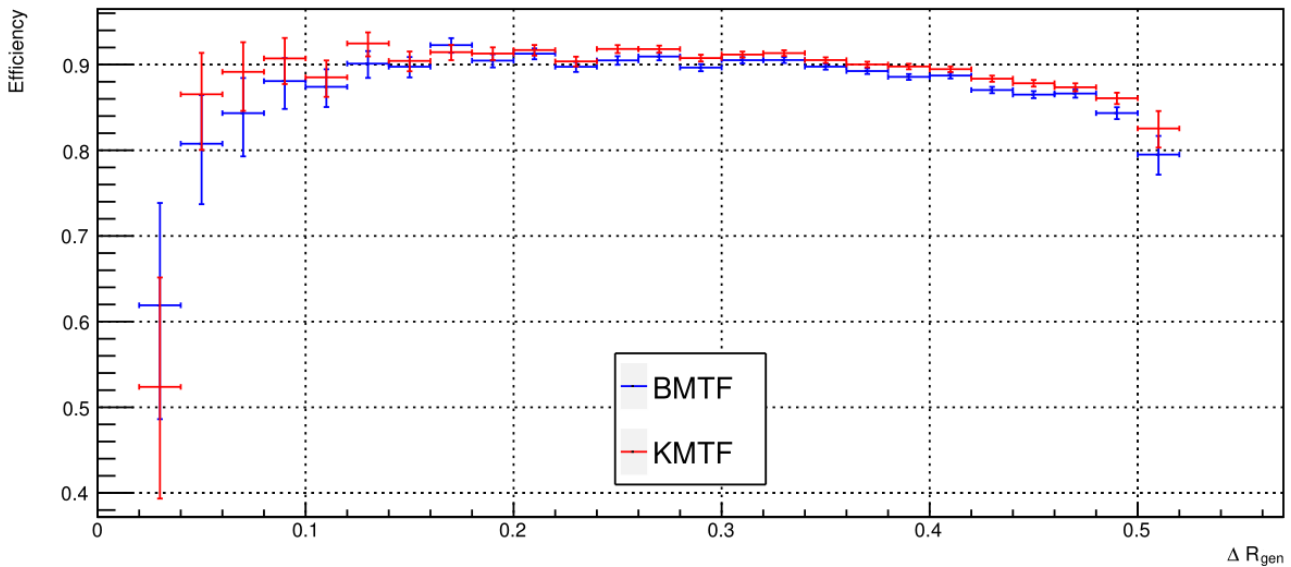
Με μια γρήγορη ματιά στα παρακάτω σχήματα, θα παρατηρήσει ο αναγνώστης πως η απόδοση των BMTF και KMTF μελετάται ως προς τις διαφορές  $\eta$  και  $\phi$  μεταξύ δύο generated μιονίων. Φυσικά, το ζεύγος generated μιονίων ικανοποιεί τις συνθήκες του παρονομαστή της  $\epsilon_{J/\psi}$ . Οι διαφορές  $\Delta\eta_{gen}$  και  $\Delta\phi_{gen}$  επιλέγονται, γιατί μας ενδιαφέρει η απόδοση των BMTF και KMTF ως προς την  $\Delta R_{gen}$ . Ο λόγος είναι πως, όπως αιτιολογήθηκε στο υποκεφάλαιο 6.1, η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο μιονίων συνδέεται άμεσα με την ορμή του σωματιδίου J/ψ από το οποίο προέρχονται. Για την ακρίβεια, ισχύει πως αυτά τα δύο μεγέθη έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση.



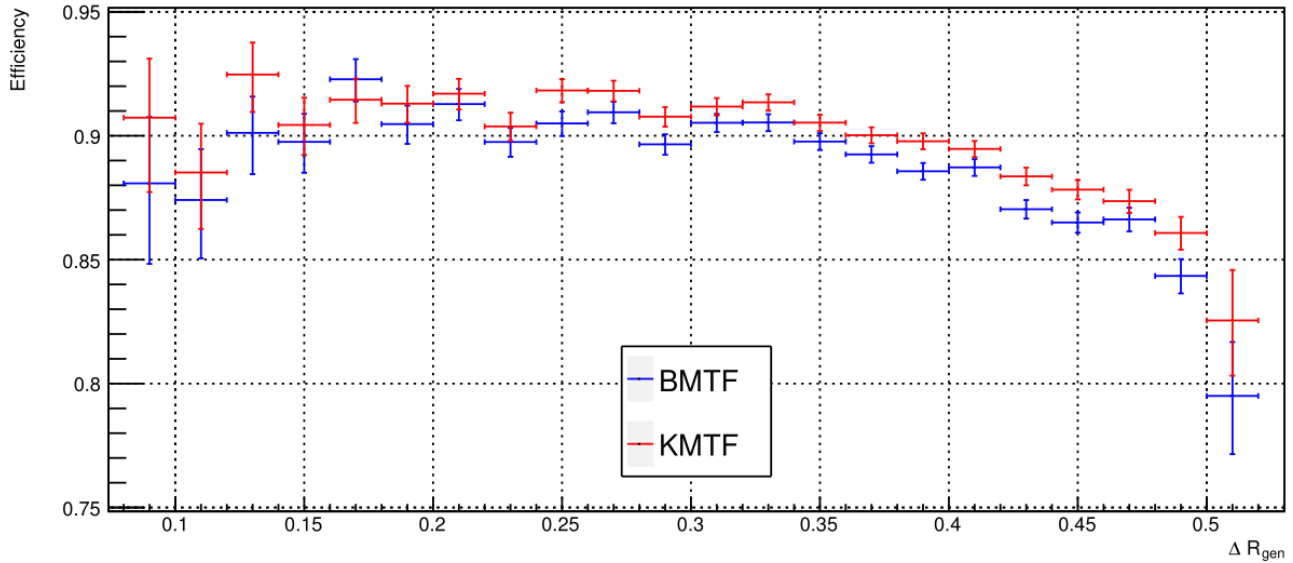
**Σχήμα 6.6:** Διμοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά  $\Delta\phi$  των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου J/ψ.



**Σχήμα 6.7:** Διμοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά  $\Delta\eta$  των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου  $J/\psi$ .



**Σχήμα 6.8:** Διμοιική απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF ως προς την διαφορά  $\Delta R$  των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου  $J/\psi$ . Βασιζόμενοι στην σχέση μεταξύ  $\Delta R_{gen}$  και  $p_{T,J/\psi}$ , συμπεραίνουμε πως το όριο  $\Delta R_{gen} = 0.51$  προέρχεται από το κάτω όριο της  $p_{T,J/\psi}$  ( $8 \text{ GeV}/c$ ).

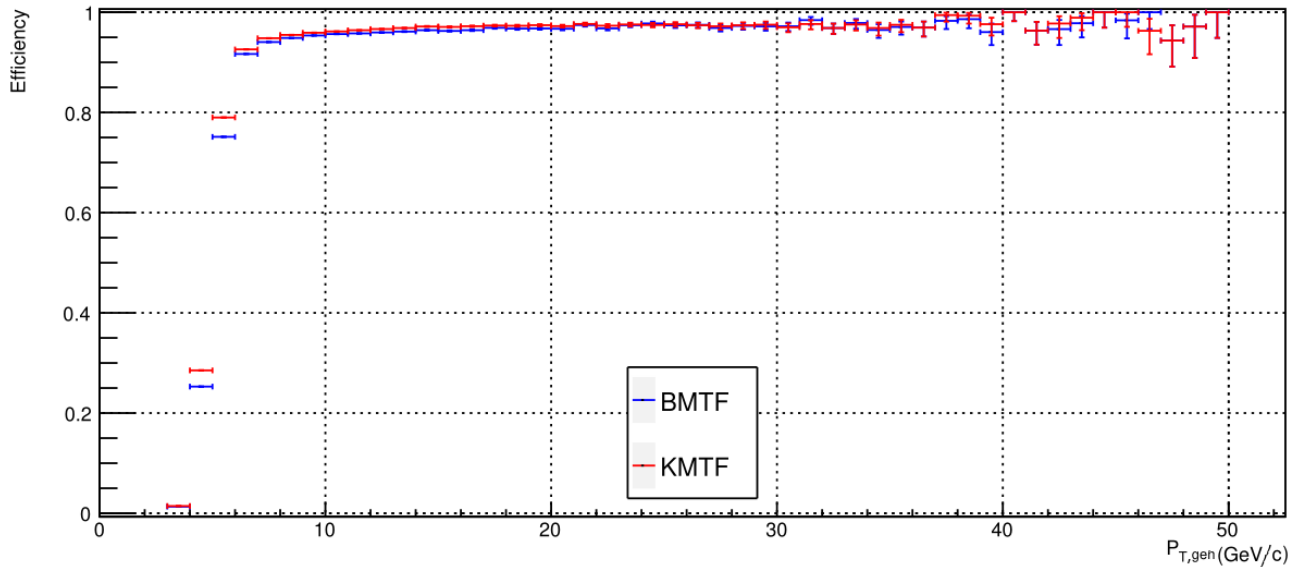


**Σχήμα 6.9:** Μεγέθυνση του διαγράμματος απόδοσης του Σχήματος 6.4. Ο λόγος που κόβεται το τμήμα της διμιονικής απόδοσης για  $\Delta R_{gen} < 0.08$  (υψηλές  $p_{T,J/\psi}$ ) είναι ότι, σε αυτή την περιοχή, η ενεργός διατομή παραγωγής J/ψ μικραίνει πάρα πολύ γρήγορα. Με άλλα λόγια, το πλήθος δεδομένων είναι μικρό, το οποίο φαίνεται από τα υψηλά σφάλματα που συνοδεύουν τη διμιονική απόδοση.

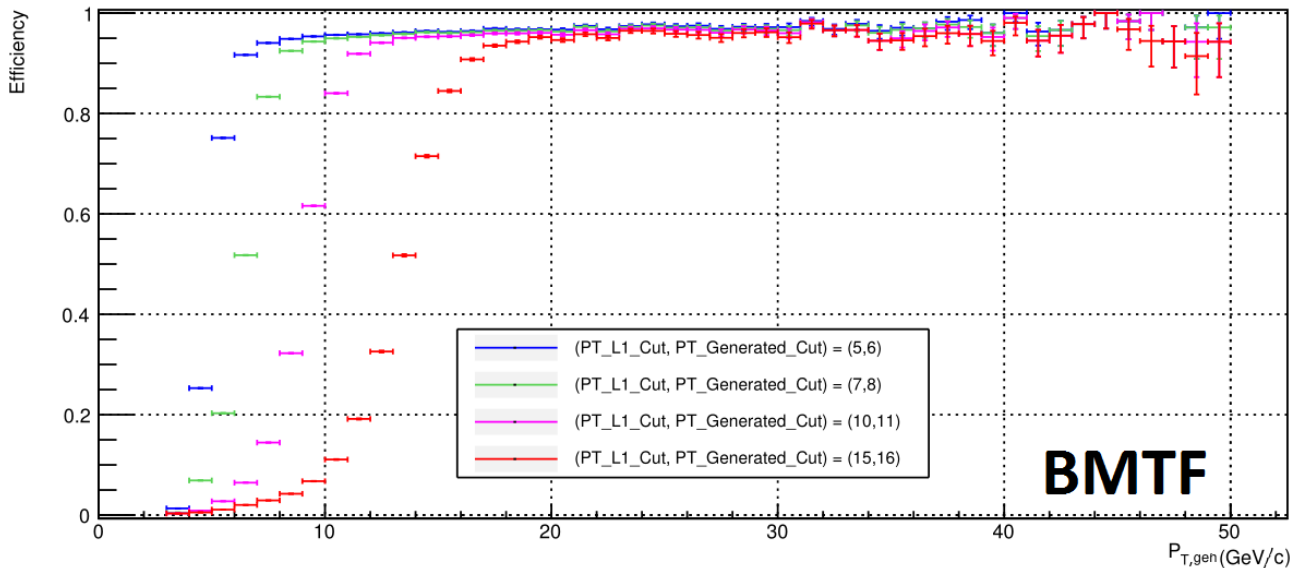
Από τα Σχήματα 6.6 μέχρι 6.9, φαίνεται ξεκάθαρα πως και οι δύο αλγόριθμοι έχουν υψηλή διμιονική απόδοση, με τον KMTF να είναι πιο αποτελεσματικός. Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 6.9 (και, κατά συνέπεια, στο Σχήμα 6.8), παρατηρείται μία συνεχής μείωση της διμιονικής απόδοσης τόσο στον BMTF, όσο και στον KMTF. Συγκεκριμένα, η απόδοση ως προς τις υψηλές  $\Delta R_{gen}$  ( $> 0.4$ ) είναι, κατά μέσο όρο, μικρότερη από την απόδοση ως προς τις υπόλοιπες  $\Delta R_{gen}$ . Αυτό σημαίνει πως οι αλγόριθμοι ανακατασκευής είναι, κατά μέσο όρο, λιγότερο αποτελεσματικοί ως προς τις χαμηλές ορμές του J/ψ από ότι ως προς τις υψηλές ορμές του. Όμως, όπως συμπεράναμε στο Κεφάλαιο 5, οι BMTF και KMTF δεν μεροληπτούν ως προς τις ορμές. Με άλλα λόγια, θα έπρεπε να έχουν την ίδια απόδοση ως προς όλες τις ορμές του J/ψ.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί, καθώς πηγαίνουμε προς τις χαμηλές ορμές του J/ψ, προσεγγίζουμε το cut της ορμής στα generated μόνια (6 GeV/c). Ταυτόχρονα, πλησιάζουμε το cut της ορμής στα L1 μόνια (5 GeV/c). Σε αυτή την περιοχή, η απόδοση των BMTF και KMTF ως προς την ορμή ενός generated μιονίου δεν έχει τη μορφή συνάρτησης σκαλοπάτι (step function). Αντιθέτως, ακολουθεί την σιγμοειδή συνάρτηση (Βλέπε Σχήμα 6.10). Οπότε, σε αυτό το διάστημα τιμών της ορμής, η απόδοση αρχίζει να μειώνεται σταδιακά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται η βαθμιαία υποβάθμιση της διμιονικής απόδοσης.

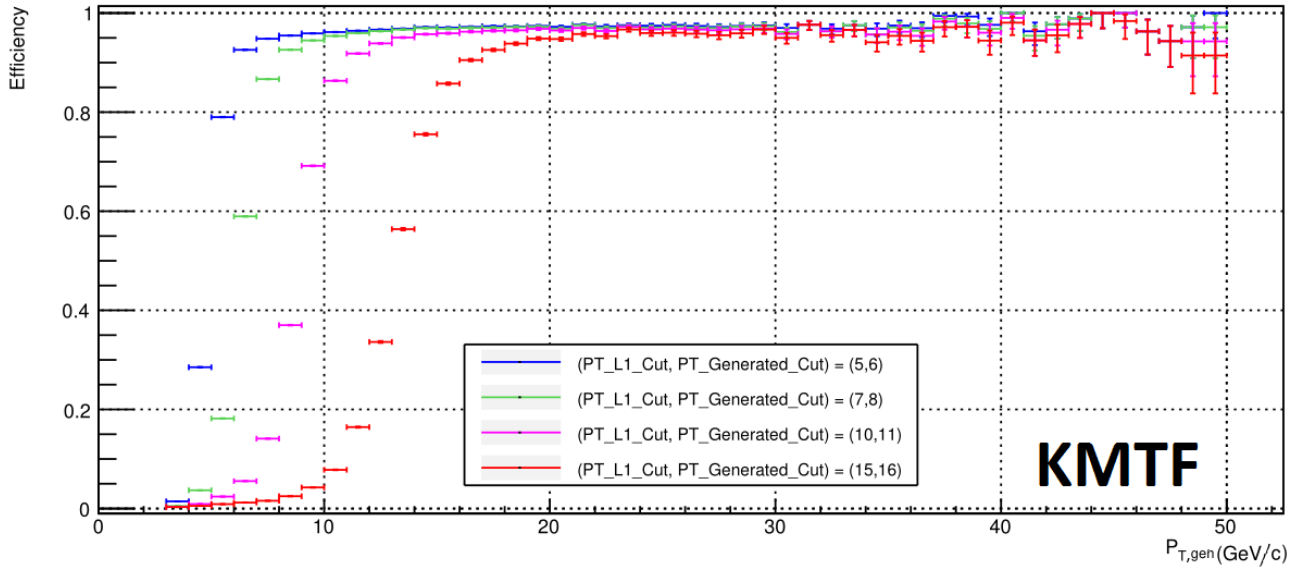
Για να επαληθευτεί ο παραπάνω ισχυρισμός, ο αλγόριθμος επαναλήφθηκε επιπλέον 3 φορές. Σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά cuts στην ορμή των generated μιονίων και στην ορμή των L1 μιονίων. Ειδικότερα, τα cuts ήταν (7 GeV/c, 8 GeV/c), (10 GeV/c, 11 GeV/c) (15 GeV/c, 16 GeV/c). Σε κάθε παρένθεση, ο αριστερός αριθμός είναι το cut στην ορμή των generated μιονίων και ο δεξιός είναι το cut στην ορμή των L1 μιονίων. Επίσης, ελέγχθηκε αν, σε κάθε επανάληψη, οι αποδόσεις των BMTF και KMTF ως προς την ορμή ενός generated μιονίου έχουν σιγμοειδή μορφή. Τα αποτελέσματα όλων των επαναλήψεων φαίνονται στα Σχήματα 6.11 μέχρι 6.14.



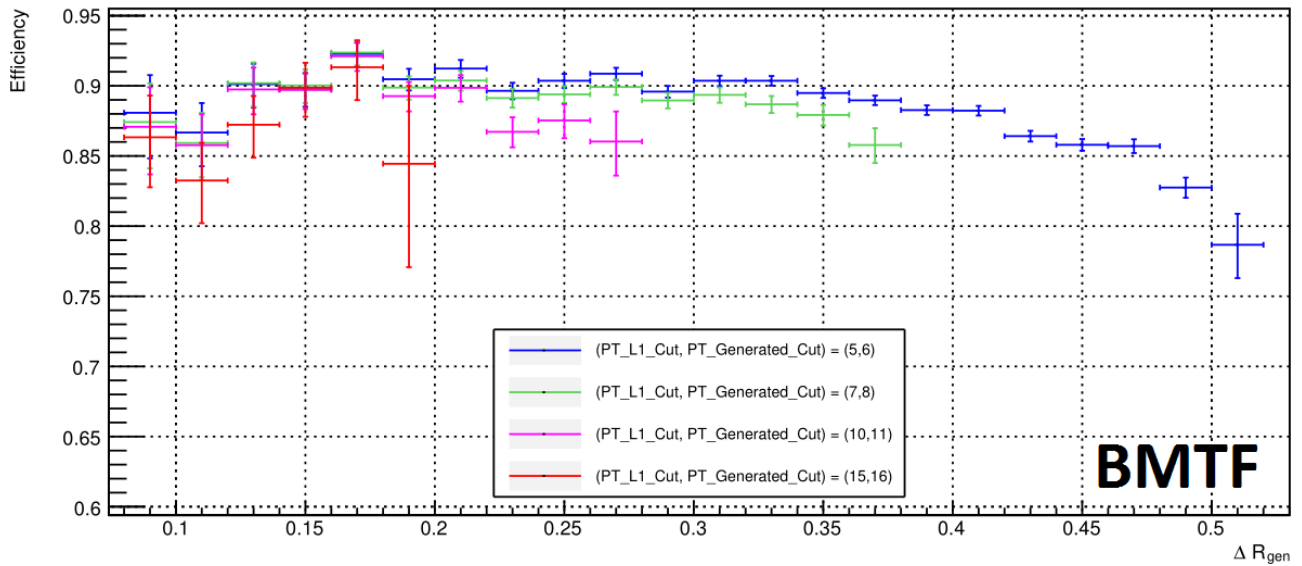
**Σχήμα 6.10:** Απόδοση των αλγορίθμων BMTF και KMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους. Παρατηρείται πως στο cut της ορμής των L1 μιονίων στα 5 GeV/c, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή. Ο λόγος είναι η περιορισμένη διακριτική ικανότητα του L1T στον υπολογισμό της ορμής της μιονικής τροχιάς.



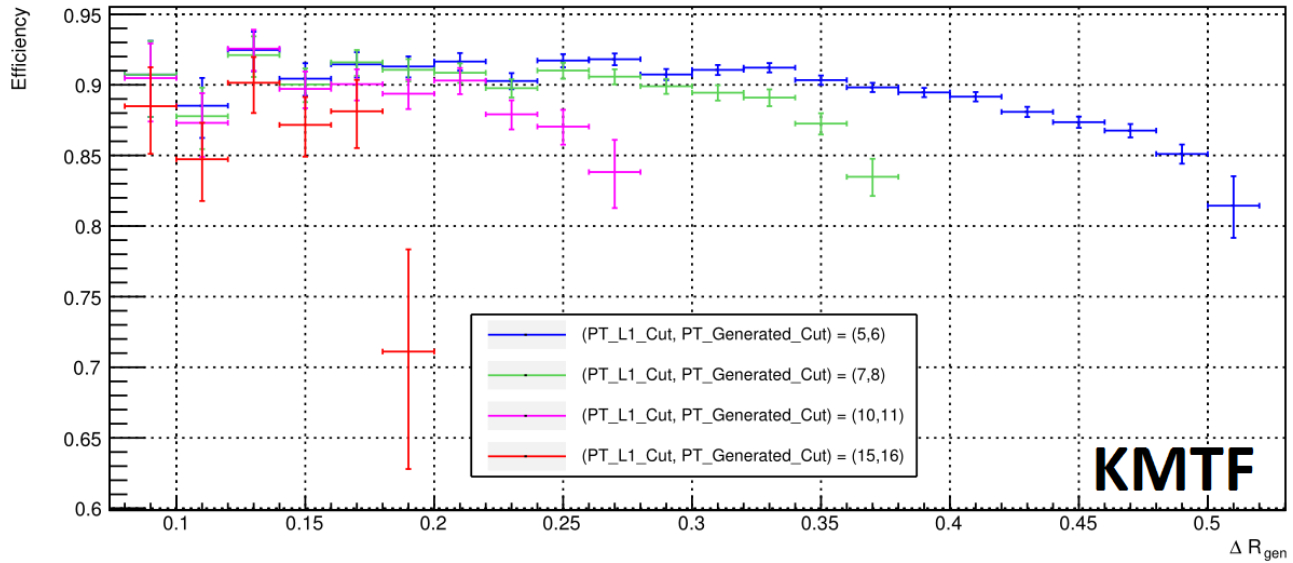
**Σχήμα 6.11:** Απόδοση του αλγορίθμου BMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Παρατηρείται πως, σε κάθε περίπτωση, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή.



Σχήμα 6.12: Απόδοση του αλγορίθμου KMTF στην ανακατασκευή generated μιονίων ως προς την ορμή τους σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Παρατηρείται πως, σε κάθε περίπτωση, η απόδοση έχει σιγμοειδή μορφή.



Σχήμα 6.13: Διμιοική απόδοση του αλγορίθμου BMTF ως προς την διαφορά  $\Delta R$  των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου  $J/\psi$ , σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις.



**Σχήμα 6.14:** Διμοιική απόδοση του αλγορίθμου KMTF ως προς την διαφορά  $\Delta R$  των generated μιονίων, τα οποία προέρχονται από διάσπαση σωματιδίου  $J/\psi$ , σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις.

Στα σχήματα 6.13 και 6.14, βλέπουμε πως η σταδιακή μείωση της απόδοσης εμφανίζεται σε κάθε επανάληψη. Όμως, αν ο ισχυρισμός ήταν λανθασμένος, θα έπρεπε οι αποδόσεις και στις τέσσερις περιπτώσεις να συμπίπτουν. Έτσι, επιβεβαιώνεται πως ο βασικός υπαίτιος της βαθμιαίας πτώσης της διμοιικής απόδοσης των BMTF και KMTF στα υψηλά  $\Delta R_{gen}$  είναι η σιγμοειδής μορφή της απόδοσής τους ως προς την ορμή ενός generated μιονίου.

Ανακεφαλαιώνοντας όλη τη μελέτη της παρούσας εργασίας, οι αλγόριθμοι KMTF και BMTF είναι πολύ αποτελεσματικοί στην ανακατασκευή ζευγών τροχιών μεγάλης εγγύτητας. Για να είμαστε ακριβείς, ο KMTF εμφανίζει υψηλότερη διμοιική απόδοση. Επίσης, ο KMTF, σε αντίθεση με τον BMTF, αποθηκεύει και την vertex unconstrained ανακατασκευασμένη μιονική τροχιά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να σκανδαλίζονται events, στα οποία τα μόνια προέρχονται από vertices σημαντικά μετατοπισμένες (μέχρι και κάποια μέτρα!) από το κέντρο του CMS. Αυτή η δυνατότητα ανοίγει ένα εντελώς νέο πεδίο διερεύνησης της ύπαρξης "εξωτικών" σωματιδίων με μεγάλο χρόνο ζωής που διασπώνται σε μόνια. Καταλήγουμε, έτσι, στο συμπέρασμα πως ο KMTF είναι πιο επιτυχημένος αλγόριθμος από τον BMTF σε κάθε σύγκριση. Άρα, ο KMTF είναι έτοιμος να διαδεχθεί τον BMTF κατά το Run 3 το 2022.

## Βιβλιογραφία

- [1] Thomson, M. (2013). *Modern Particle Physics* (1st ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Martin, B. R. and Shaw, G. (2017). *Particle Physics (Manchester Physics Series)* (4th ed.). Manchester: Wiley.
- [3] <https://home.cern/>
- [4] <https://kt.cern/>
- [5] Apollinari, G and Bèjar Alonso, I and Brüning, O and Lamont, M and Rossi, L (2015). *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Preliminary Design Report*. CERN Yellow Reports: Monographs
- [6] <http://atlas.cern/>
- [7] <https://home.cern/science/experiments/lhcf>
- [8] <http://alice.web.cern.ch/>
- [9] <https://cms.cern/>
- [10] <http://totem-experiment.web.cern.ch/totem-experiment/>
- [11] <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
- [12] <https://moedal.web.cern.ch/>
- [13] CMS Collaboration (2006). *Technical Design Report, Volume 1: Detector Performance and Software*. CERN/LHCC 2006 – 001
- [14] CMS TriDAS Project (2000). *Technical Design Report, Volume 1: The Trigger Systems*. CERN/LHCC 2000 – 38
- [15] Tapper, A and Acosta, D. (2013). *CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade*. CERN-LHCC-2013-011
- [16] The CMS Trigger and Data Acquisition Group (2006). *The CMS High Level Trigger*. Springer Science and Business Media LLC
- [17] A. Triossi and M. Bellato and J.M. Cela Ruiz and J. Ero and C. Fernandez Bedoya and G. Flouris and C. Foudas and L. Guiducci and N. Loukas and A. Navarro Tobar and S. Mallios and G. Masetti and F. Montecassiano and E. Paradas and I. Redondo Fernandez and D. Redondo Ferrero and J. Sastre and P. Sphicas and S. Ventura and C. Wulz (2017). *The CMS Barrel Muon trigger upgrade*. IOP Publishing
- [18] Bachtis, Michail(2018). *Upgrade of the CMS Barrel Muon Track Finder for HL-LHC featuring a Kalman Filter algorithm and an ATCA Host Processor with Ultrascale+ FPGAs*. CMS-CR-2018-294
- [19] Sjöstrand, Torbjörn and Mrenna, Stephen and Skands, Peter (2008). *A brief introduction to PYTHIA 8.1*. Elsevier BV
- [20] Allison, J. and others (2016). *Recent developments in Geant4*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment
- [21] Antcheva, I. and Ballintijn, M. and Bellenot, B. and Biskup, M. and Brun, R. and Buncic, N. and Canal, Ph. and Casadei, D. and Couet, O. and Fine, V. and et al. (2009). *ROOT — A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization*. Elsevier BV