



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Φυσικής

Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων

## Πτυχιακή Εργασία

**Μελέτη ανίχνευσης σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής στους μιονικούς ανιχνευτές του  
πειράματος CMS**

Μάριο Μπάρδι

A.M. 1110201700104

Επιβλέπων καθηγητής

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

Αθήνα 2021

## Περίληψη

Από το 2019 ο μεγάλος συγκρουστής αδρονίων (LHC) του CERN ξεκίνησε ένα μεγάλο πρόγραμμα συντήρησης και αναβάθμισης για το Phase 2. Ο σκανδαλιστής μιονίων στην κεντρική περιοχή του ανιχνευτή CMS περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα αναβάθμισης. Αν και ο ανιχνευτής είναι πολύ αποδοτικός στην ανίχνευση μιονίων, έχει προταθεί η αναβάθμιση του ώστε να μπορεί να ανιχνεύει και άλλα σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό μιας ποσότητας την οποία ονομάζουμε Figure Of Merit (FOM) και μας δίνει ένα μέτρο της απόδοσης του σκανδαλιστή, για την ανίχνευση σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής. Επιπλέον υπολογίζουμε αυτά τα FOMs. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία είναι είτε δεδομένα προσομοίωσης Monte Carlo του πειράματος CMS, είτε Zero-Bias data τα οποία συλλέχθηκαν κατά το Run 2 (2015-2018) του πειράματος CMS. Το FOM μας δείχνει ότι η απόδοση του τρέχοντος ανιχνευτή έχει μεγάλη εξάρτηση από την μέση απόσταση που μπορεί να διασχίσει το σωματίδιο στο σύστημα ηρεμίας του.

## Abstract

From 2019 the Large Hadron Collider (LHC) of CERN launched a major repair and upgrade program for the Phase 2. The muon trigger which is located in the central region of the CMS is included in the upgrade program. Even though the detector can detect muons very efficiently, it has been proposed to be upgraded so it can detect Long Lived Particles (LLPs) too. In this work we present an algorithm which calculates a quantity we call Figure Of Merit (FOM), which gives us a measure of the efficiency of the detector on detecting LLPs. Furthermore we calculate these FOMs. The data used for this work are either generated from a simulation of the CMS experiment with Monte Carlo methods or Zero-Bias Data collected through the Run 2 (2015-2018) of the CMS experiment. The FOM shows that in the current detector the efficiency is largely dependent on the average distance that the particle can travel in its rest system.

# Περιεχόμενα

## Κατάλογος σχημάτων

## Κατάλογος Πινάκων

<b>1 Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model)</b>	<b>1</b>
1.1 Κουάρκς . . . . .	1
1.2 Λεπτόνια . . . . .	3
1.3 Φορείς αλληλεπιδράσεων . . . . .	4
1.4 Επιτυχίες και ανοιχτά ερωτήματα του Καθιερωμένου Προτύπου . . . . .	5
<b>2 Σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής</b>	<b>7</b>
2.1 Κίνητρα για την υπόθεση ύπαρξης των LLPs . . . . .	7
2.2 Φυσική ερμηνεία του μεγάλου χρόνου ζωής . . . . .	9
2.3 Προκλήσεις στην αναζήτηση των LLPs . . . . .	10
2.4 Σύστημα σκανδαλισμού και αναζήτηση των LLPs . . . . .	12
2.5 Περιγραφή του φυσικού μοντέλου των LLPs που χρησιμοποιείτε σε αυτήν την εργασία . . . . .	13
<b>3 Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Πυρηνική Έρευνα (CERN) και ο ανιχνευτής CMS (Compact Muon Solenoid)</b>	<b>15</b>
3.1 Large Hardron Colider (LHC) . . . . .	16
3.2 Compact Muon Solenoid (CMS) . . . . .	18
3.3 Σκανδαλιστής CMS . . . . .	24
<b>4 Μελέτη δυνατότητας σκανδαλισμού σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής στους κεντρικούς ανιχνευτές μιονίων του πειράματος CMS</b>	<b>29</b>
4.1 Περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την μελέτη. . . . .	29
4.2 Περιγραφή μεθόδου επεξεργασίας των δεδομένων . . . . .	31
4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση . . . . .	35
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>38</b>

## Κατάλογος σχημάτων

1.1 Συγκριτικό διάγραμμα μαζών των κουάρκ του Καθιερωμένου Προτύπου . . . . .	2
1.2 Συγκριτικό διάγραμμα μαζών των λεπτονίων του Καθιερωμένου Προτύπου . . . . .	3
1.3 Σωματίδια καθιερωμένου προτύπου . . . . .	5
2.1 Διάγραμμα με τα σωματίδια που προβλέπονται από την Υπερσυμμετρία . . . . .	8
2.2 Διάγραμμα φυσικού μοντέλου που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία . . . . .	13
2.3 Αλληλεπιδράσεις στοιχειωδών σωματιδίων στο Καθιερωμένο Πρότυπο . . . . .	14
3.1 Λογότυπο του CERN . . . . .	15
3.2 Εικόνα των σχετικών θέσεων των διαφόρων ανιχνευτών και επιταχυντών, κάτω από την γη . . . . .	16
3.3 Δομή του CMS. . . . .	19
3.4 Λωρίδες πυριτίου του ανιχνευτή μέσα στο Βαρέλι . . . . .	20
3.5 Εγκάρσια τομή του CMS, οι τροχιές των σωματιδίων και καλοριμετρικοί καταιονισμο. . . . .	22
3.6 Γραφική αναπαράσταση μια ομάδας από 4 DTs . . . . .	22
3.7 Γραφική αναπαράσταση των CSCs . . . . .	23
3.8 Γραφική αναπαράσταση RPCs . . . . .	24
3.9 Εικόνα λειτουργίας του L1T . . . . .	26
3.10 Εικόνα λειτουργίας του σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου (L1T). . . . .	27
3.11 Επίπεδα Trigger . . . . .	28
4.1 Συγκριτικό διάγραμμα θορύβου με το σήμα των σωματιδίων Higgs για τα Triggers . . . . .	32
4.2 Συγκριτικό διάγραμμα θορύβου με το σήμα των σωματιδίων Higgs, για τα Segments . . . . .	32
4.3 Συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Segments . . . . .	35
4.4 Συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Triggers . . . . .	35
4.5 Μεγεθυμένο συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Triggers . . . . .	36

## **Κατάλογος Πινάκων**

1.1 Κβαντικοί αριθμοί κουάρκ του Καθιερωμένου Προτύπου .....	2
1.2 Κβαντικοί αριθμοί λεπτονίων του Καθιερωμένου Προτύπου .....	3
1.3 Ιδιότητες των φορέων αλληλεπιδράσεων .....	4
4.1 Αντιστοιχία κατωφλιού με rate για τα Triggers .....	33
4.2 Αντιστοιχία κατωφλιού με rate για τα Segments .....	33

## 1 Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model)

Το Καθιερωμένο Πρότυπο [1,2,3] της φυσικής σωματιδίων είναι η θεωρία που περιγράφει τρεις από τις τέσσερις στοιχειώδεις δυνάμεις του σύμπαντός μας. Οι δυνάμεις που περιγράφει είναι: η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η ισχυρή αλληλεπίδραση ενώ αδυνατεί να περιγράψει την δύναμη της βαρύτητας. Περαιτέρω το Καθιερωμένο Πρότυπο κατηγοριοποιεί τα στοιχειώδη σωματίδια σε λεπτόνια (leptons) και κουάρκ (quark), τα οποία δεν έχουν δομή και έχουν διάσταση μικρότερη των  $10^{-19}\text{m}$ . Αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας θεμελιώδη σωματίδια, τα οποία "κουβαλάνε" τις τρεις παραπάνω στοιχειώδεις δυνάμεις, που ονομάζονται «φορείς αλληλεπιδράσεων».

### 1.1 Κουάρκς (quarks)

Στα κουάρκ παρατηρούμε έξι<sup>1</sup> είδη, τα οποία ονομάζουμε γεύσεις. Αυτές είναι η Up (u), Down (d), Strange (s), Charm (c), Top (t) και Bottom (b). Τα κουάρκ παρατηρούνται στην Φύση με σπίν  $\frac{1}{2}$ , που σημαίνει ότι είναι φερμιόνια και χωρίζονται σε τρία ζεύγη που ονομάζουμε γενιές με τις γεύσεις της επόμενης γενιάς να έχουν μεγαλύτερη μάζα και μικρότερο χρόνο ζωής. Οι τρεις αυτές γενιές είναι:

I) Το ζεύγος (u,d)

II) Το ζεύγος (s,c)

III) και τέλος το ζεύγος (t,b)

Η φυσική σημασία των κουάρκ είναι ότι είναι τα συστατικά από τα οποία αποτελούνται τα πιο σύνθετα σωματίδια<sup>2</sup>, που λέγονται αδρόνια. Τα πιο σύνθετα σωματίδια χωρίζονται σε δυο είδη:

I) Τα βαρυόνια τα οποία αποτελούνται από τρία κουάρκ όπως π.χ. το πρωτόνιο (uud) και το νετρόνιο (udd)

II) Τα μεσόνια τα οποία αποτελούνται από ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ, όπως π.χ. το πιόνιο ( $u\bar{d}$ ).

Εφόσον τα βαρυόνια έχουν ακέραιο ηλεκτρικό φορτίο συνεπάγεται ότι τα κουάρκς έχουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο, ώστε το άθροισμα των ηλεκτρικών φορτίων των κουάρκ που φτιάχνουν ένα βαρυόνιο να είναι ακέραιο. Επιπλέον, τα κουάρκ διαθέτουν έναν βαρυονικό αριθμό και ένα συγκεκριμένο κβαντικό αριθμό ανάλογα με την γεύση. Όλοι οι παραπάνω κβαντικοί αριθμοί συνοψίζονται στο πίνακα 1.1<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Σε κάθε κουάρκ αντιστοιχεί και ένα αντικουάρκ

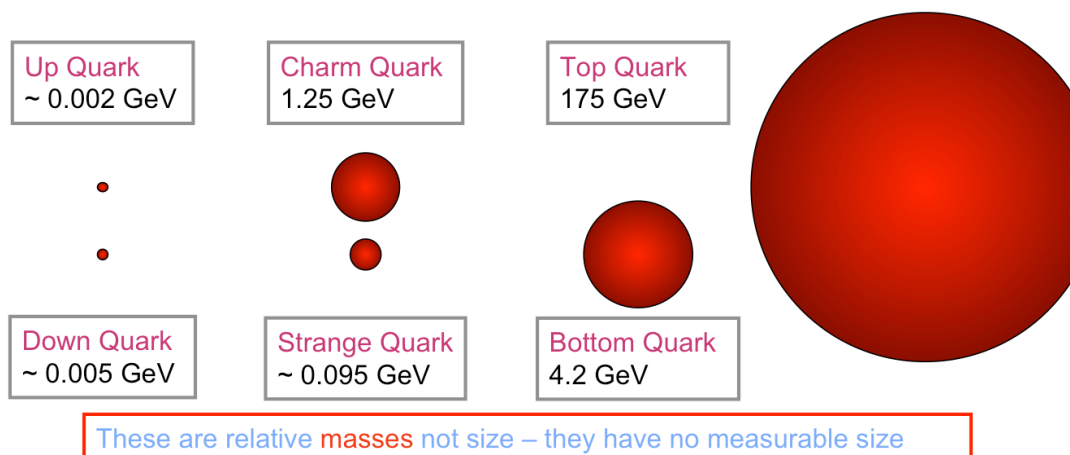
<sup>2</sup>Το Top δεν συμμετέχει στην παραγωγή πιο σύνθετων σωματιδίων καθώς ο χρόνος ζωής του είναι μικρότερος από τον χρόνο που απαιτείται για να συζευχθεί με τα άλλα κουάρκ

<sup>3</sup>Στον πίνακα 1.1 δεν συμπεριλαμβάνονται οι κβαντικοί αριθμοί topness και downness για το top και το down κουάρκ καθώς χρησιμοποιούνται σπάνια

Γεύση	Φορτίο Q(e)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Charm (C)	Strangness (S)	Topness (T)	Bottomness ( $\tilde{B}$ )
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 1.1:**Κβαντικοί αριθμοί κουάρκ του Καθιερωμένου Προτύπου

Όπως αναφέραμε παραπάνω τα κουάρκ κάθε νεότερης γενιάς είναι πιο βαριά από την προηγούμενη. Έτσι γεννάται το ερώτημα "πώς συγκρίνονται οι μάζες των κουάρκ της ίδιας γενιάς;". Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζουμε ένα συγκριτικό διάγραμμα των μαζών των κουάρκ του Καθιερωμένου Προτύπου και παρατηρούμε ότι, οι μάζες των θετικά φορτισμένων γεύσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των αρνητικά φορτισμένων με μόνη εξαίρεση τα κουάρκ της πρώτης γενιάς up και down τα οποία έχουν σχεδόν ίδια μάζα.



**Σχήμα 1.1:**Συγκριτικό διάγραμμα μαζών των κουάρκ του καθιερωμένου προτύπου

Μέσω της ισότητας αυτής των μαζών των up και down κουάρκ καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το πρωτόνιο και το νετρόνιο θα πρέπει να έχουν περίπου ίση μάζα, πράγμα που επαληθεύεται πειραματικά. Ακόμη, τα up και down κουάρκ υπόκεινται σε πανομοιότυπες ισχυρές αλληλεπιδράσεις, διαφέρουν, όμως, στα ηλεκτρικά τους φορτία και επομένως στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Για τον λόγο αυτό επινοήθηκε ο κβαντικός αριθμός του ισοσπίν ( $I$ ), ο οποίος ομαδοποιεί τα u και d κουάρκ στην ισοτοπική δυάδα  $I=1/2$  με τρίτη συνιστώσα  $I_3=1/2$  για το u και  $I_3=-1/2$  για το d. Το ισοσπίν βρίσκεται στην ίδια ομάδα συμμετρίας με το σπίν και ορίζεται ως

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

Όπου  $I_z$  η τρίτη προβολή του ισοσπίν (προβολή στον άξονα Z), η οποία ισούται με:

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

Η συμμετρία αυτή αντανακλά την αναλλοiotτητα της ισχυρής αλληλεπίδρασης στην ανταλλαγή του πρωτονίου με το νετρόνιο και σπάει όταν λάβουμε υπ' όψη το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων.

## 1.2 Λεπτόνια (leptons)

Όπως και με τα κουάρκ, το Καθιερωμένο Πρότυπο προβλέπει έξι λεπτόνια<sup>4</sup>. Αυτά είναι το ηλεκτρόνιο ( $e^-$ ), το νεutrino του ηλεκτρονίου ( $\nu_e$ ), το μιονίο ( $\mu^-$ ), το νεutrino του μιονίου ( $\nu_\mu$ ), το Tau ( $\tau^-$ ) και το νεutrino του Tau ( $\nu_\tau$ ). Περαιτέρω, όπως και με τα κουάρκ, τα λεπτόνια έχουν σπίν  $\frac{1}{2}$  οπότε είναι φερμιόνια και χωρίζονται και αυτά σε τρεις γενιές. Όπως και στα κουάρκ τα λεπτόνια της επόμενης γενιάς έχουν μεγαλύτερη μάζα και μικρότερο χρόνο ζωής από την προηγούμενη<sup>5</sup>. Οι τρεις αυτές γενιές είναι:

I) Το ηλεκτρόνιο και το νεutrino του ηλεκτρονίου ( $e^-, \nu_e$ )

II) Το μιονίο και το νεutrino του μιονίου ( $\mu^-, \nu_\mu$ )

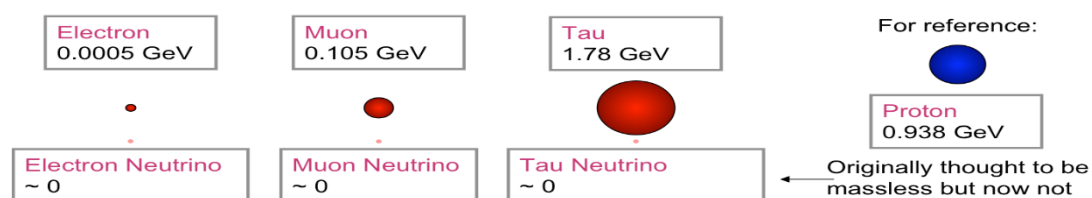
III) Το Tau και το νεutrino του Tau ( $\tau^-, \nu_\tau$ )

Κάθε ζεύγος διαθέτει τον δικό του λεπτονικό αριθμό. Αυτοί οι λεπτονικοί αριθμοί καθώς και το φορτίο κάθε λεπτονίου συνοψίζονται στον πίνακα 1.2.

Λεπτόνιο	Ηλεκτρικό φορτίο $Q(e)$	Ηλεκτρονικός αριθμός ( $L_e$ )	Μιονικός αριθμός ( $L_\mu$ )	Ταονικός αριθμός ( $L_\tau$ )
Ηλεκτρόνιο ( $e^-$ )	-1	1	0	0
Νεutrino του ηλεκτρονίου ( $\nu_e$ )	0	1	0	0
Μιονίο ( $\mu^-$ )	-1	0	1	0
Νεutrino του μιονίου ( $\nu_\mu$ )	0	0	1	0
Tau ( $\tau^-$ )	-1	0	0	1
Νεutrino του Tau ( $\nu_\tau$ )	0	0	0	1

**Πίνακας 1.2:** Κβαντικοί αριθμοί λεπτονίων του Καθιερωμένου Προτύπου

Στον πίνακα 1.2 δεν έχουμε συμπεριλάβει τις μάζες των λεπτονίων. Αυτές τις παραθέτουμε στο σχήμα 1.2.



**Σχήμα 1.2:** Συγκριτικό διάγραμμα μαζών των λεπτονίων του Καθιερωμένου Προτύπου

<sup>4</sup>Σε αντιστοιχία με τα κουάρκ και σε κάθε λεπτόνιο αντιστοιχεί ένα αντιλεπτόνιο

<sup>5</sup>Στα αντίστοιχα νεutrina των λεπτονίων δεν έχουμε μετρήσει ακόμα την μάζα καθώς είναι πολύ μικρή, οπότε θεωρούμε ότι έχουν μηδενική μάζα.



### 1.3 Φορείς αλληλεπιδράσεων

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το Καθιερωμένο Πρότυπο περιγράφει τρεις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις μέσω της ανταλλαγής θεμελιωδών σωματιδίων που ονομάζονται φορείς αλληλεπιδράσεων. Οι φορείς αλληλεπιδράσεων έχουν σπίν 1, δηλαδή είναι μποζόνια. Στον πίνακα 1.3 παρουσιάζουμε τις ιδιότητες των φορέων αλληλεπίδρασης, ενώ στην συνέχεια περιγράφουμε κάθε μια δύναμη ξεχωριστά.

Αλληλεπίδραση	Φορέας αλληλεπίδρασης		Ηλεκτρικό φορτίο Q(e)		Μάζα (GeV/c <sup>2</sup> )		Spin (ħ)	
Ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση	Γλουόνιο (g)		0		0		1	
Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση	Φωτόνιο (γ)		0		0		1	
Ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση	W <sup>±</sup>	Z <sup>0</sup>	±1	0	80,4	91,2	1	1

**Πίνακας 1.3:** Ιδιότητες των φορέων αλληλεπιδράσεων

**•Ηλεκτρομαγνητική (H/M) αλληλεπίδραση:** Στην κλασσική φυσική περιγράφουμε την ηλεκτρομαγνητική δύναμη μέσω συνεχών πεδίων αλλά στην φυσική στοιχειωδών σωματιδίων η περιγραφή της H/M δύναμης γίνεται μέσω της κβαντικής φυσικής. Πιο συγκεκριμένα, μια H/M αλληλεπίδραση ανάμεσα σε δύο σωματάρια περιγράφεται μέσω της ανταλλαγής ενός κβάντου ενέργειας που ονομάζουμε φωτόνιο. Στην κλίμακα των πυρηνικών φαινομένων η H/M αλληλεπίδραση είναι η δεύτερη πιο ισχυρή δύναμη από τις τρεις θεμελιώδεις δυνάμεις που εξετάζουμε σε αυτή την παράγραφο και έχει απεριόριστη εμβέλεια. Τα θεμελιώδη σωματάρια που αλληλεπιδρούν μέσω αυτής είναι όλα φορτισμένα φερμιόνια, ενώ η θεωρία που την περιγράφει ονομάζεται κβαντική ηλεκτροδυναμική (Quantum Electrodynamics/QED)

**•Ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση:** Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις πραγματοποιούνται μεταξύ των κουάρκ μέσω του φορέα της ισχυρής αλληλεπίδρασης που ονομάζεται γλουόνιο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή τα κουάρκ φέρουν έναν εσωτερικό βαθμό ελευθερίας τον οποίο ονομάζουμε χρώμα που τους επιτρέπει να αλληλεπιδρούν με την ανταλλαγή γλουονίου. Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι η ισχυρότερη από όλες τις αλληλεπιδράσεις που μελετάμε σε αυτή την παράγραφο, αλλά έχει πολύ μικρή εμβέλεια (περίπου 10<sup>-15</sup> m). Η θεωρία που την περιγράφει λέγεται κβαντική χρωμοδυναμική (Quantum Chromodynamics/QCD).

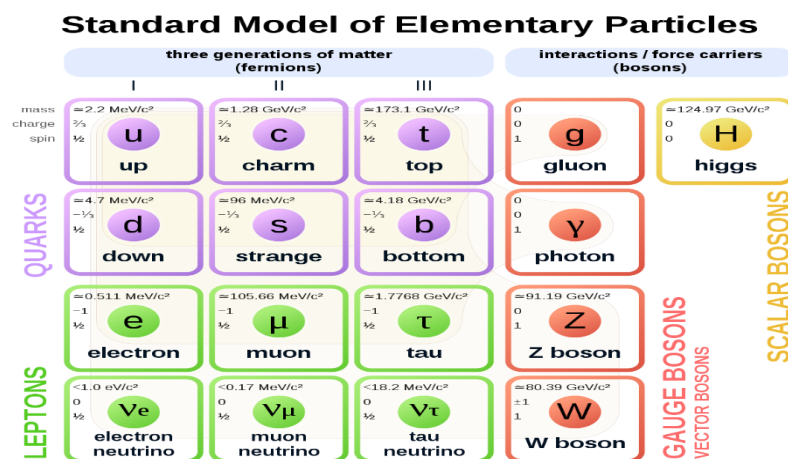
**•Ασθενής αλληλεπίδραση:** Σε αυτή την αλληλεπίδραση έχουμε τρεις φορείς, οι οποίοι είναι τα μποζόνια W<sup>±</sup> και Z<sup>0</sup>. Στην κλίμακα των πυρηνικών δυνάμεων η ασθενής αλληλεπίδραση είναι η ασθενέστερη από τις τρεις αλληλεπιδράσεις που μελετάμε σε αυτή την παράγραφο και ακόμη έχει πολύ μικρή εμβέλεια (περίπου 10<sup>-18</sup> m) καθώς οι φορείς της έχουν πολύ μεγάλη μάζα.

Επιπλέον από το Καθιερωμένο Πρότυπο προβλέπεται και ένα τελευταίο μποζόνιο, το οποίο ονομάζεται μποζόνιο Χίγκς [21] (Higgs). Το μποζόνιο Χίγκς έχει μηδενικό φορτίο και σπίν ενώ η μάζα του είναι 125 GeV/c<sup>2</sup>. Οι R. Brout, F. Englert και P. Higgs προέβλεψαν την ύπαρξη του το 1967 με την πειραματική επιβεβαίωση να έρχεται περίπου μισό αιώνα αργότερα, το

2012, στα πειράματα CMS και ATLAS του LHC. Το μποζόνιο Higgs δημιουργείται από την διαταραχή του πεδίου Higgs, το οποίο μέσω του μηχανισμού Brout-Englert-Higgs δίνει μάζα στα υπόλοιπα σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου

## 1.4 Επιτυχίες και ανοιχτά ερωτήματα του Καθιερωμένου Προτύπου

Το Καθιερωμένο Πρότυπο είναι μια πολύ επιτυχημένη θεωρία και αυτό έγκειται στις προβλέψεις που είχε κάνει και έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά. Από το Καθιερωμένο Πρότυπο είχαν προβλεφθεί το Top quark, το νεutrino του Tau τα οποία επιβεβαιώθηκαν πειραματικά το 1995 και το 2000 αντίστοιχα, ενώ η παρατήρηση του μποζονίου Higgs το 2012, ήταν η αποκορύφωση περίπου πενήντα ετών έρευνας από όταν πρωτοπροβλέφθηκε το 1967). Αυτή είναι και η μεγαλύτερη επιτυχία του Καθιερωμένου Προτύπου. Τα σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου για τα οποία μιλήσαμε στις παραγράφους 1.1, 1.2 και 1.3 συνοψίζονται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Σωματίδια Καθιερωμένου Προτύπου

Παρ'όλες όμως τις επιτυχίες του Καθιερωμένου Προτύπου, γνωρίζουμε πως αυτό δεν μπορεί να είναι η τελική θεωρία των στοιχειωδών σωματιδίων, καθώς αδυνατεί να εξηγήσει πολλά θεμελιώδη ερωτήματα και παρατηρούμενα φαινόμενα. Παρακάτω παρουσιάζουμε μερικά από αυτά.

- 1) Απουσία βαρύτητας<sup>6</sup>:** Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το Καθιερωμένο Πρότυπο αδυνατεί να εξηγήσει την παρουσία της βαρύτητας όπως αυτή παρουσιάζεται στην Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.

<sup>6</sup>Η βαρύτητα είναι η πιο ασθενής δύναμη από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις που γνωρίζουμε και στον κβαντικό κόσμο θεωρείται αμελητέα. Παρ'όλα αυτά γίνονται μεγάλες προσπάθειες για την ανάπτυξη μιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας, καθώς αυτή θα έδινε απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα, όπως τι συμβαίνει στο εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας

- 2) Ασυμμετρία ύλης-αντιύλης:** Σύμφωνα με την θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης και του Καθιερωμένου Προτύπου, η παραγωγή ύλης-αντιύλης γίνεται με τον ίδιο ρυθμό. Παρ' όλα αυτά στο σύμπαν παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ύλης παρά αντιύλης. Αυτό σημαίνει πως παρ' όλο που η συμμετρία σπάει στην πραγματικότητα, η θεωρία δεν περιέχει κάποιο μηχανισμό που να περιγράφει πλήρως αυτό το σπάσιμο της συμμετρίας.
- 3) Σκοτεινή ύλη:** Η σκοτεινή ύλη είναι μια υποθετική μορφή ύλης, της οποίας η παρουσία υπονοείται από διάφορες αστροφυσικές παρατηρήσεις, οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν από τις πλέον αποδεκτές θεωρίες της βαρύτητας, εκτός και αν υπάρχει περισσότερη ύλη την οποία δεν παρατηρούμε. Η σκοτεινή ύλη ονομάστηκε έτσι επειδή δεν αλληλοεπιδρά με καμία από τις γνωστές θεμελιώδεις δυνάμεις εκτός από αυτή της βαρύτητας. Το Καθιερωμένο Πρότυπο αδυνατεί να εξηγήσει την φύση της σκοτεινής ύλης.

## 2 Σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής

Στην εργασία αυτή ασχολούμαστε με την αναζήτηση υποθετικών σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής (Long Lived Particles/LLPs), πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο [3,18,20]. Τι είναι όμως τα σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής;

Τα περισσότερα σωματίδια που μελετώνται στην σύγχρονη έρευνα της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων ζούνε για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, πριν διασπαστούν σε πιο σταθερά σωματίδια τα οποία ζουν για κάποιο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τα τελευταία, όπως φαίνεται και από το όνομα τους, ονομάζονται σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής. Από την πλευρά του πειραματικού φυσικού τα σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής είναι: ουδέτερα σωματίδια τα οποία διασπώνται σε μια μακροσκοπική απόσταση από την κρούση πρωτονίου-πρωτονίου (βλέπε παράγραφο 3.1), η οποία μπορεί να ανακατασκευαστεί, είτε είναι φορτισμένα σωματίδια, τα οποία διασπώνται με τον ίδιο τρόπο όπως τα παραπάνω ουδέτερα σωματίδια ή τουλάχιστον είναι σταθερά για ένα χρονικό διάστημα, τέτοιο ώστε να μπορούν να ανιχνευτούν από τον ανιχνευτή (βλέπε παράγραφο 3.2).

Τα σωματίδια αυτά, όπως καταλαβαίνουμε, μπορεί να είναι σωματίδια όπως τα πρωτόνια, τα νετρόνια, τα ηλεκτρόνια και λοιπά, όμως, εμείς σε αυτή την εργασία, όταν λέμε σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής δεν αναφερόμαστε στο πρωτόνιο και στο ηλεκτρόνιο. Τα σωματίδια στα οποία αναφερόμαστε έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, αλλά προβλέπονται από θεωρίες που θέλουν να επεκτείνουν το Καθιερωμένο Πρότυπο της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων και δεν έχουν ανιχνευτεί ακόμα.

### 2.1 Κίνητρα για την υπόθεση ύπαρξης των LLPs

#### •Υπερσυμμετρία (Supersymmetry/SUSY)

Οι συμμετρίες είναι ένα βασικό στοιχείο για την κατασκευή του Καθιερωμένου Προτύπου. Για κάθε ποσότητα που διατηρείται, υπάρχει μια συμμετρία από πίσω, η οποία συνδέεται με αυτή την ποσότητα. Η υπερσυμμετρία [3] πηγάζει από την ιδέα ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις στο καθιερωμένο πρότυπο πρέπει να ενταχθούν σε μια μεγάλη ομάδα συμμετρίας. Οι Coleman και Mendula [4] βρήκαν το 1967 ότι μια τέτοια ομάδα δεν ήταν εφικτό να κατασκευαστεί. Παρ' όλα αυτά, αργότερα οι Wess και Zumino [5] ανακάλυψαν ότι μια τέτοια υπερσυμμετρική ομάδα ήταν όντως εφικτή. Τέλος, το 1975 οι Lopuszanski και Sohniu [6] κατάφεραν να κατασκευάσουν μια μη τετριμμένη επέκταση της ομάδας του Poincaré, την οποία σήμερα γνωρίζουμε ως υπερσυμμετρία.

Η εφαρμογή της ιδέας της υπερσυμμετρίας, στο Καθιερωμένο Πρότυπο, ουσιαστικά διπλασιάζει τον αριθμό των σωματιδίων αξιώνοντας ότι σε κάθε φερμιόνιο του Καθιερωμένου Προτύπου αντιστοιχεί ένα μποζόνιο και σε κάθε μποζόνιο αντιστοιχεί ένα φερμιόνιο. Εκτός από αυτό, πρέπει να προστεθούν μερικά ακόμα σωματίδια Higgs, ώστε να περιλαμβάνει το σπάσιμο της ηλεκτρασθενούς<sup>7</sup> συμμετρίας.

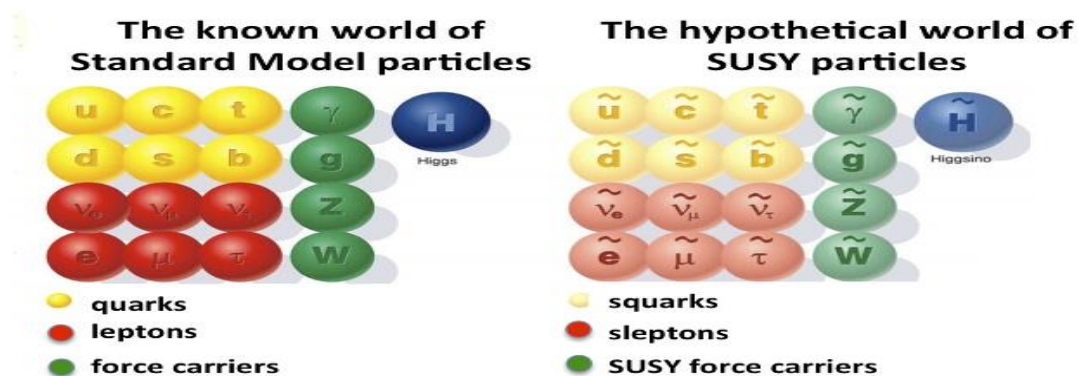
<sup>7</sup>Η ηλεκτρασθενής θεωρία είναι η θεωρία που ενώνει την ασθενή και την ηλεκτρομαγνητική δύναμη σε πολύ μεγάλες ενέργειες

### • Σπασμένη υπερσυμμετρία (Split Supersymmetry/SSUSY)

Ένα από τα κύρια κίνητρα για την κατασκευή της θεωρίας της υπερσυμμετρίας ήταν να λύσει το πρόβλημα της ιεραρχίας με έναν φυσικό τρόπο. Ως πρόβλημα της ιεραρχίας ορίζουμε το γεγονός ότι, μέσω του Καθιερωμένου Πρότυπου, προβλέπουμε ότι, η μάζα του μποζονίου Higgs είναι πολλές τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από την πειραματική του τιμή ( $125 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ).

Επομένως ο κύριος στόχος αυτής της θεωρίας είναι να υποστηρίξει ένα σωματίδιο Higgs της τάξης των  $125 \frac{\text{GeV}}{c^2}$  και να μας προμηθεύσει με έναν ρεαλιστικό υποψήφιο για την σκοτεινή ύλη (βλέπε παράγραφο 1.4). Η SSUSY το πετυχαίνει αυτό αντικαθιστώντας μερικά χαμηλοενεργειακά σωματίδια τα οποία προβλέπονται από την θεωρία της υπερσυμμετρίας με κάποια άλλα, πιο μεγάλης μάζας. Σε όλα τα υπερσυμμετρικά βαθμωτά σωματίδια (squarks, sleptons)<sup>8</sup> δίνεται μια μεγάλη τιμή μάζας,  $m_s$ , εκτός από το μποζόνιο Higgs, το οποίο μπορεί να υποστηριχθεί από την θεωρία με την μάζα με την οποία ανακαλύφθηκε το 2012 στον LHC. Όλα τα φερμιόνια (charginos, neutralinos, gluino)<sup>9</sup> της υπερσυμμετρίας μπορούν να έχουν μια σχετικά χαμηλή μάζα

Στο σχήμα 2.1 φαίνονται τα γνωστά σωματίδια του καθιερωμένου προτύπου σε αντιστοιχία με τα σωματίδια που προβλέπονται από την θεωρία της υπερσυμμετρίας.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα με τα σωματίδια που προβλέπονται από την υπερσυμμετρία

### • Θεωρίες επιπλέον διαστάσεων

Σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής, πέρα του Καθιερωμένου Προτύπου, προβλέπονται και σε άλλες θεωρίες, πέρα από αυτών της υπερσυμμετρίας. Πολλές θεωρίες που προσπαθούν να επεκτείνουν το καθιερωμένο πρότυπο, προβλέπουν επιπλέον διαστάσεις πέρα από των τεσσάρων (τριών χωρικών και μίας χρονικής) διαστάσεων που ήδη γνωρίζουμε.

Ένα παράδειγμα, είναι η θεωρία των μεγάλων επιπλέον διαστάσεων. Αυτή η θεωρία προτάθηκε από τους Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos και Gia Dvali [7] το 1998.

<sup>8</sup>Στην υπερσυμμετρία τα squarks και τα sleptons είναι οι εταίρος των quark και των λεπτονίων του καθιερωμένου προτύπου, που προβλέπονται ότι υπάρχουν μέσω της θεωρίας.

<sup>9</sup>Ανάλογα με την υποσημείωση 10 και για κάθε φερμιόνιο προβλέπεται και για αυτό ένας εταίρος

Στην θεωρία τους προσπαθούν να επιλύσουν το πρόβλημα της ιεραρχίας μέσω της εισαγωγής επιπλέον διαστάσεων. Θεωρούν ότι οι τέσσερις γνωστές διαστάσεις υπάρχουν σε μια μεμβράνη η οποία βρίσκεται σε έναν χώρο περισσότερων διαστάσεων. Προτείνουν ότι η ηλεκτρομαγνητική, η ισχυρή και η ασθενής αλληλεπίδραση και τα μποζόνια τους (βλέπε παράγραφο 1.3) ενεργούν πάνω σε αυτή την μεμβράνη, ενώ, το μποζόνιο της βαρυτικής δύναμης (βαρυτόνιο) μπορεί να διαδίδεται και στις επιπλέον διαστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο εξηγούν γιατί η βαρυτική δύναμη είναι τόσο ασθενέστερη από τις υπόλοιπες θεμελιώδεις δυνάμεις.

#### • Σκοτεινή ύλη

Στην παράγραφο 1.5 αναφερθήκαμε στην σκοτεινή ύλη ως ένα από τα αναπάντητα ερωτήματα που αφήνει το καθιερωμένο πρότυπο. Αν όμως, η σκοτεινή ύλη έχει σωματιδιακή φύση, τότε η ύπαρξη της μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

i) Να είναι μη σχετιστικά στην φάση δημιουργίας των γαλαξιών

ii) Να είναι σταθερά σε κοσμολογικές χρονικές κλίμακες

iii) Να έχουν πολύ ασθενή αλληλεπίδραση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

iv) Η πυκνότητα τους την περίοδο του freeze-out<sup>10</sup> (relic density), να αντιστοιχεί στην πυκνότητα που παρατηρείται από την ακτινοβολία υποβάθρου (Cosmic Microwave Background)

## 2.2 Φυσική ερμηνεία του μεγάλου χρόνου ζωής

Έχουμε αναφέρει ότι τα περισσότερα σωματίδια, με τα οποία ασχολείται η σύγχρονη έρευνα στη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων, έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής. Τι διαφορετικό έχουν λοιπόν τα LLPs και ζουν τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα;

Το αν ένα σωματίδιο θα έχει μεγάλο χρόνο ζωής συνδέεται άμεσα με το πόσο μακριά μπορεί να ταξιδέψει από το σημείο που δημιουργήθηκε, το οποίο με την σειρά του συνδέεται με την μάζα του σωματιδίου. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος ζωής ενός σωματιδίου είναι ένας συνδυασμός του χρόνου ζωής όταν αυτό είναι στάσιμο και της ταχύτητας με την οποία ταξιδεύει σχετικά με τον ανιχνευτή. Έτσι, ο χρόνος ζωής ενός σωματιδίου, όταν είναι στάσιμο, δίνεται από τον τύπο  $\tau = \hbar/\Gamma$ , όπου  $\Gamma$  είναι η συχνότητα διάσπασης του σωματιδίου (decay rate). Η ποσότητα  $\Gamma$ , δηλαδή, δίνει την πιθανότητα ένα σωματίδιο να διασπαστεί ανά μονάδα χρόνου. Το  $\Gamma$  αυτό προέρχεται από την πυρηνική φυσική και έχει στατιστική φύση. Ως εκ τούτου έχει νόημα μόνο για ένα συνονθύλευμα σωματιδίων. Σε ένα σύστημα από  $N$  σωματίδια η μείωση του πληθυσμού των σωματιδίων δίνεται από τον τύπο

$$dN = -\Gamma N dt \rightarrow N(t) = e^{-\Gamma t}$$

<sup>10</sup>Είναι η περίοδος στην οποία το πρώιμο σύμπαν άρχισε να ψυχραίνεται και έτσι τα ελαφριά σωματίδια σταμάτησαν να έχουν την δυνατότητα να διασπαστούν σε πιο βαριά, καθώς, δεν είχαν πλέον την περίσσεια από το περιβάλλον για να κάνουν αυτή την διάσπαση.

Αυτό σημαίνει ότι ο μέσος χρόνος ζωής ενός σωματιδίου είναι ο χρόνος που θα περάσει μέχρι αυτό να διασπαστεί, που, σύμφωνα με τα παραπάνω είναι  $\tau = \hbar/\Gamma$

Μπορούμε βέβαια να δούμε αυτό το θέμα και από μια άλλη οπτική γωνία. Στην φυσική υπάρχουν πολλοί νόμοι διατήρησης (νόμος διατήρησης της ορμής, νόμος διατήρησης της ενέργειας κ.λπ.) και όταν ένα σωματίδιο διασπάται, οι νόμοι αυτοί εφαρμόζονται πάνω στην διάσπαση αυτή. Αυτό σημαίνει ότι κάποια ποσότητα του συστήματος πριν και μετά την διάσπαση πρέπει να διατηρείται. Η διατήρηση μιας ποσότητας (πχ ενέργεια) είναι ικανή ώστε να κάνει τα προϊόντα της διάσπασης να είναι σταθερά. Με άλλα λόγια, τα σωματίδια που δημιουργούνται μετά την διάσπαση έχουν μεγάλο χρόνο ζωής.

Τέλος μπορούμε να δούμε την διάσπαση ενός σωματιδίου και από μια τρίτη οπτική γωνία. Η διάσπαση του σωματιδίου μπορεί να μεταφραστεί ως η μετάβαση του σωματιδίου από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική κατάσταση. Στην κβαντομηχανική η πιθανότητα να γίνει αυτή η μετάβαση υπολογίζεται από τον χρυσό κανόνα του Fermi

$$\Gamma_{fi} = \hbar W_{fi} = 2\pi |T_{fi}|^2 \rho(E_f) \text{ όπου}$$

- $\Gamma_{fi}$  είναι η συχνότητα διάσπασης του σωματιδίου από την αρχική στην τελική κατάσταση
- $W_{fi}$  είναι η συχνότητα μετάβασής του, δηλαδή το πόσες μεταβάσεις γίνονται ανά μονάδα χρόνου
- $T_{fi}$  είναι το στοιχείο πίνακα που περιγράφει την δυναμική της μετάβασης και είναι  $T_{fi} = \langle \phi_f | V | \phi_i \rangle$  όπου  $\phi_i, \phi_f$  οι κυματοσυναρτήσεις των σωματιδίων στην αρχική και τελική κατάσταση και  $V$  το δυναμικό στο οποίο υπόκεινται τα σωματίδια.

Όταν λοιπόν, η πιθανότητα μετάβασης ενός σωματιδίου από μια κατάσταση σε μια άλλη είναι μικρή, αυτό σημαίνει πως το σωματίδιο αυτό είναι σχετικά σταθερό και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

### 2.3 Προκλήσεις στην αναζήτηση των LLPs

Στον ορισμό που δώσαμε παραπάνω για τα LLPs αναφέραμε ότι είναι σωματίδια που έχουν μεγάλο χρόνο ζωής η τουλάχιστον αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να γίνει αντιληπτό από κάποιον ανιχνευτή. Εφόσον λοιπόν τα σωματίδια είναι "ζωντανά" για αρκετό χρόνο, γιατί δεν τα έχουμε ανιχνεύσει ακόμα;

Γενικά η ανίχνευση των σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής είναι μια μεγάλη πρόκληση. Τα κυριότερα εμπόδια που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι

- 1) Ελλιπής ανιχνευτική πληροφορία
- 2) Δυσκολία κινηματικής ανακατασκευής
- 3) Πολύ υψηλός και δύσχρηστος θόρυβος

Παρακάτω αναλύουμε περισσότερο τα τρία αυτά εμπόδια.

### •Ελλιπής ανιχνευτική πληροφορία

Τα LLPs είναι δύσκολο να ανιχνευτούν από τους ανιχνευτές του LHC (βλέπε παράγραφο 3.1) και ο λόγος είναι ο μεγάλος χρόνος ζωής τους. Αυτό φαίνεται κάπως αντιφατικό, καθώς θα περίμενε κανείς πως αν ένα σωματίδιο έχει μεγάλο χρόνο ζωής, τότε θα ήταν πιο εύκολο να ανιχνευτεί καθώς θα είχαμε περισσότερο χρόνο για να το παρατηρήσουμε. Αυτό θα ήταν αλήθεια, αν το σωματίδιο ήταν ακίνητο. Τα σωματίδια όμως που θέλουμε να ανιχνεύσουμε στα πειράματα στον LHC δεν είναι ακίνητα αλλά συνήθως έχουν μεγάλες ταχύτητες. Αυτό σημαίνει πως η απόσταση που ταξιδεύουν είναι αρκετά μεγάλη και έχουν μεγάλη πιθανότητα να διασπαστούν έξω από τους ανιχνευτές. Ο λόγος όμως που ψάχνουμε ακόμα αυτά τα σωματίδια με τους ίδιους ανιχνευτές και δεν φτιάχνουμε μεγαλύτερους (εκτός από το γεγονός ότι οι ανιχνευτές είναι ήδη τεράστιοι και θα ήταν ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα να φτιάξουμε μεγαλύτερους) είναι ότι τα σωματίδια, όπως έχουμε εξηγήσει στην παράγραφο 2.2, δεν έχουν έναν συγκεκριμένο χρόνο ζωής αλλά ένα εύρος χρόνου ζωής, οπότε, αν σταθούμε τυχεροί, θα μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε ένα σωματίδιο το οποίο διασπάστηκε πιο νωρίς από τον μέσο χρόνο ζωής του, καθώς και αυτό το ενδεχόμενο έχει μια σημαντική πιθανότητα.

Τέλος επειδή τα σωματίδια αυτά έχουν μεγάλη μάζα, υπάρχει πιθανότητα να σταματήσουν στο πυκνό υλικό των ανιχνευτών και να διασπαστούν αργότερα. Αυτό συνήθως συμβαίνει για ταχύτητες μικρότερες των  $0.5c$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Σε αυτή την περίπτωση οι ανιχνευτές δεν έχουν την δυνατότητα να παρατηρήσουν αυτήν την διάσπαση.

### •Δυσκολία κινηματικής ανακατασκευής

Τα ηλεκτρικά φορτισμένα προϊόντα των LLPs έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να ανιχνευτούν στους θαλάμους μιονίων (βλέπε παράγραφο 3.2). Αυτό συμβαίνει γιατί τα προϊόντα των LLPs έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα μίονια που είναι και αυτά σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής. Το πρόβλημα, όμως, είναι ότι οι αλγόριθμοι ανακατασκευής των μιονικών τροχιών κατασκευάζουν τμήματα τροχιών, που λέγονται *segments*, για να συνθέσουν την τροχιά. Τα *segments* είναι κομμάτια της τροχιάς των μιονίων τα οποία δημιουργούνται ενώνοντας δυο hit. Ένα hit είναι το σήμα που αφήνει το μίονιο όταν περνάει από ένα σημείο στους θαλάμους μιονίων. Η τροχιά του μιονίου μέσα στο βαρέλι ανακατασκευάζεται μέσω των Drift Tubes/DTs (βλέπε παράγραφο 3.2). Τα DTs στοιβάζονται ανά τέσσερα στρώματα, φτιάχνοντας ένα υπερστρώμα. Η ανακατασκευή της τροχιάς γίνεται συνδυάζοντας τα hit από κάθε DT που διέρχεται το μίονιο φτιάχνοντας έτσι ένα κομμάτι της τροχιάς του (*track segment*).

Το πρόβλημα που υπάρχει με τα LLPs, που αναζητάμε εμείς, είναι ότι, σε αντίθεση με τα μίονια που αφήνουν περίπου έξι hits ανά θάλαμο, η διάσπαση κάποιου LLP θα αντιστοιχούσε σε έναν καταιονισμό σωματιδίων όπου θα παρήγαγε από δέκα έως και 150 hits τα οποία θα μπορούν να εμφανίζονται και σε άλλους θαλάμους, αν το επιτρέπουν οι συνθήκες. Εκτός από το ότι πρέπει να δημιουργηθούν καινούριοι αλγόριθμοι για αυτή την περίπτωση, τίθεται και το θέμα αν ο σκανδαλιστής (βλέπε παράγραφο 3.3) μπορεί να επεξεργαστεί αρκετά γρήγορα αυτήν την πληροφορία.



Τέλος ένα τελευταίο πρόβλημα που υπάρχει στην ανακατασκευή της κινηματικής των LLPs, είναι ότι αν ο χρόνος ζωής τους είναι περισσότερο από μερικές δεκάδες nanoseconds. Τότε οι περισσότερες διασπάσεις τους θα ανακατασκευαστούν ως διαφορετικά πρωτεύοντα γεγονότα κρούσεων τα οποία δεν συνδέονται με το αρχικό σωματίδιο.

#### ·Πολύ υψηλός θόρυβος

Η πληροφορία που παίρνουμε κάθε δευτερόλεπτο στα πειράματα που διεξάγονται στο CERN είναι τεράστια (βλέπε παράγραφο 3.1) και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής είναι από χαμηλοενεργειακές συγκρούσεις οι οποίες δεν μας ενδιαφέρουν. Το πρόβλημα είναι ότι αυτές οι συγκρούσεις συμβαίνουν και ο αριθμός τους είναι πολύ μεγαλύτερος από τις συγκρούσεις που μας ενδιαφέρουν (συγκρούσεις που μπορεί να δημιουργήσουν LLPs). Έτσι καταλαβαίνουμε ότι το να ανιχνευτεί κάποιο συγκεκριμένο σωματίδιο ανάμεσα σε αυτό το χάος από συγκρούσεις είναι πολύ δύσκολο εγχείρημα.

## 2.4 Σύστημα σκανδαλισμού και αναζήτηση των LLPs

Το σύστημα σκανδαλισμού του CERN είναι ένα σύστημα το οποίο αναλύει τα δεδομένα των συγκρούσεων των σωματιδίων στα πείραμα που διεξάγονται στον LHC, σε πρώτη φάση σε πραγματικό χρόνο και, σε δεύτερη φάση, κάνει μια offline ανάλυση. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στην παράγραφο 3.3.

Το σύστημα σκανδαλισμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αναζήτηση των LLPs καθώς οι ιδιότητες τους, μπορούν να έχουν ποικίλουν σημαντικά. Τα σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής μπορεί να έχουν μεγάλη ή μικρή μάζα, μπορεί να ταξιδεύουν με μεγάλες ή μικρές ταχύτητες, μπορεί να διασπώνται είτε σε κουάρκ είτε σε λεπτόνια, είτε ακόμα και σε αόρατα σωματίδια τα οποία αντιλαμβανόμαστε μέσω της ελλείπουσας εγκάρσιας ορμής. Όπως και να έχει, οι παράμετροι είναι πάρα πολλές και, αν θέλουμε να ανιχνεύσουμε ένα σωματίδιο με συγκεκριμένες παραμέτρους, τότε χρειαζόμαστε το σύστημα σκανδαλισμού. Για παράδειγμα, όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, μερικά LLPs μπορεί να έχουν παρόμοιο σήμα με αυτό των μιονίων. Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε αν το σήμα που πήραμε είναι από LLPs ή από κάποιο μιονίο, δίνουμε στον σκανδαλιστή τις παραμέτρους που πιστεύουμε ότι θα έχει το σήμα που θα έδινε κάποιο LLP και ο σκανδαλιστής μας στέλνει μόνο δεδομένα τα οποία ταιριάζουν με αυτές τις παραμέτρους.

Όπως βλέπουμε ο σκανδαλιστής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την αναζήτηση των LLPs, όμως η τροποποίηση του συστήματος σκανδαλισμού ώστε να μπορεί να διακρίνει τα LLPs είναι αρκετά δύσκολο πρόβλημα. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έχουν επινοηθεί διάφορες ιδέες. Μια από αυτές είναι το CalRatio trigger, που είναι ένα σύστημα σκανδαλισμού, το οποίο χρησιμοποιεί την αναλογία της εναποτιθέμενης ενέργειας στο ηλεκτρομαγνητικό και το αδρονικό καλορίμετρο από ένα συγκεκριμένο jet. Μια άλλη ιδέα, που έχει τεθεί ήδη σε εφαρμογή στον ανιχνευτή ATLAS, είναι ένας ειδικός σκανδαλιστής ο οποίος κοιτάει για μεγάλους αριθμούς αδρονίων που διασχίζουν μια μικρή περιοχή του μιονικού φασματόμετρου<sup>11</sup>, να χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει LLPs που διασπώνται λίγο πριν η μέσα στο μιονικό φασματόμετρο.

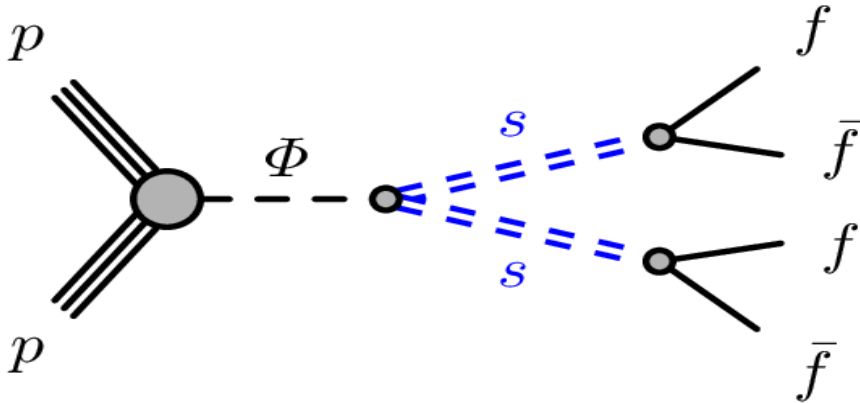
<sup>11</sup>Η λειτουργία το μιονικού φασματόμετρου είναι να μετράει τις ορμές των μιονίων με μεγάλη ακρίβεια ανεξάρτητα από το εσωτερικό του ανιχνευτή

Παρόλο που στο CERN έχουν γίνει μερικές προσπάθειες για την αναζήτηση LLPs, εξαιτίας του μεγάλου εύρους των ιδιοτήτων τους, δεν έχουμε κοιτάξει μερικές πολύ ενδιαφέρουσες περιπτώσεις, όπως η διαφορά σε μοτίβα εναπόθεσης ενέργειας σε εκτοπισμένα jets στο αδρονικό καλορίμετρο (βλέπε παράγραφο 3.2) ή σωματίδια που κινούνται ανάποδα στο ανιχνευτή και προέρχονται από LLPs τα οποία έχουν σταματήσει στο πυκνό υλικό του ανιχνευτή και διασπάστηκαν αργότερα

## 2.5 Περιγραφή του φυσικού μοντέλου LLP που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, τα σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής αναφέρονται σε πολλές θεωρίες πέρα του Καθιερωμένου Προτύπου. Για αυτόν τον λόγο, έχει εξεταστεί μια μεγάλη ποικιλία πιθανών σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής, που το καθένα έχει τις δικές του ιδιότητες και τρόπους διάσπασης.

Είναι προφανές λοιπόν πως σε αυτήν την εργασία μελετάμε ένα από αυτά τα φυσικά μοντέλα. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το διάγραμμα του φυσικού μοντέλου που περιγράφει την διαδικασία διάσπασης του LLP που μελετάμε στην παρούσα εργασία. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η σύγκρουση δυο πρωτονίων τα οποία δημιουργούν ένα βαθμωτό μποζόνιο ( $\Phi$ ), το οποίο μετά διασπάται σε δύο σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής ( $s$ ), τα οποία με την σειρά τους διασπώνται σε ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Στην εργασία αυτή θεωρούμε ότι το βαθμωτό μποζόνιο ( $\Phi$ ) είναι ένα εξωτικό σωματίδιο Higgs, ενώ τα κουάρκ και τα αντικουάρκ στα οποία διασπώνται τα LLP είναι ένα bottom και ένα anti-bottom κουάρκ.



**Σχήμα 2.2:** Διάγραμμα φυσικού μοντέλου που της διαδικασίας διάσπασης του LLP της παρούσας εργασία. Τώρα θα εξηγήσουμε περαιτέρω κάποιους από τους όρους που αναφέρθηκαν στην περιγραφή του φυσικού μοντέλου.

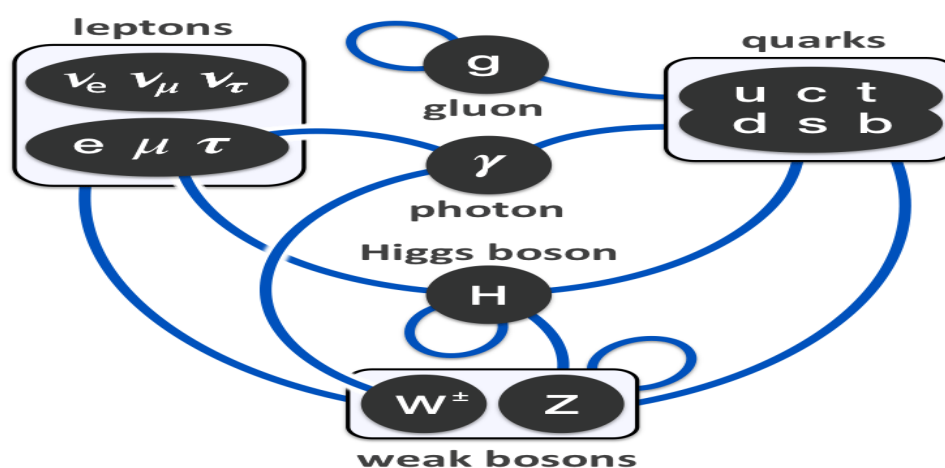
### •Βαθμωτό μποζόνιο

Ο όρος βαθμωτό μποζόνιο προέρχεται από την φυσική στοιχειωδών σωματιδίων. Όταν λέμε ότι ένα σωματίδιο είναι βαθμωτό μποζόνιο εννοούμε ότι, αν μετρήσουμε το σπίν του σε οποιαδήποτε διεύθυνση, θα μετράμε πάντα την τιμή μηδέν. Τότε ο χώρος των σπίν έχει έναν βαθμό ελευθερίας, όσους έχει στα μαθηματικά ένα βαθμωτό μέγεθος. Αν δούμε το βαθμωτό μποζόνιο από την πλευρά της κβαντικής θεωρίας πεδίου, τότε το πεδίο που αντιστοιχεί στο βαθμωτό μποζόνιο είναι βαθμωτό, για αυτό και του δίνουμε αυτό το όνομα. Μέχρι τώρα έχει ανακαλυφθεί μόνο ένα στοιχειώδες βαθμωτό μποζόνιο, το οποίο είναι το μποζόνιο Higgs.

### •Σωματίδιο Higgs/εξωτικό σωματίδιο Higgs

Το μποζόνιο Higgs [21] είναι το σωματίδιο που αντιστοιχεί στο πεδίο Higgs, στην κβαντική θεωρία πεδίου. Το πεδίο Higgs είναι υπεύθυνο για τον μηχανισμό με τον οποίο τα σωματίδια αποκτούν μάζα. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό είναι μέσω της αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με το πεδίο, όσο πιο μεγάλη η αλληλεπίδραση, τόσο πιο μεγάλη μάζα θα έχει το σωματίδιο.

Στο σχήμα 2.3 δίνουμε ένα διάγραμμα των γνωστών μέχρι τώρα μποζονίων και των στοιχειωδών σωματιδίων με τα οποία μπορούν να αλληλοεπιδράσουν. Παρατηρούμε ότι το μποζόνιο Higgs αλληλοεπιδρά με όλα τα στοιχειώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου, καθώς και με το εαυτό του, εκτός από τα νετρίνα των λεπτονίων. Αυτό είναι λογικό καθώς, όπως εξηγήσαμε παραπάνω, το πεδίο Higgs είναι υπεύθυνο για τον μηχανισμό με τον οποίο τα σωματίδια αποκτούν μάζα. Έτσι τα νετρίνα εφόσον είναι άμαζα δεν αλληλεπιδρούν με το πεδίο Higgs, ενώ όλα τα υπόλοιπα σωματίδια που έχουν μάζα αλληλεπιδρούν με αυτό.



**Σχήμα 2.3:** Αλληλεπιδράσεις στοιχειωδών σωματιδίων στο Καθιερωμένο Πρότυπο

Το μποζόνιο Higgs προτάθηκε από τους Robert Brout, François Englert και Peter Higgs το 1964 να λύσει το πρόβλημα των μαζών στην ηλεκτρασθενή θεωρία και ανιχνεύτηκε για πρώτη φορά στις 4 Ιουλίου του 2012. Τα εξωτικά σωματίδια Higgs είναι σωματίδια τα οποία έχουν διαφορετική μάζα από αυτό που ανιχνεύσαμε το 2012.

### 3 Ο Ευρωπαϊκός οργανισμός για την πυρηνική έρευνα (CERN) και ο ανιχνευτής CMS (Compact Muon Solenoid)

Ο Ευρωπαϊκός οργανισμός για την πυρηνική έρευνα (European Organization for Nuclear Research/CERN) είναι το Ευρωπαϊκό κέντρο ερευνών στο οποίο λειτουργεί το μεγαλύτερο εργαστήριο πυρηνικής φυσικής και στοιχειωδών σωματιδίων στον κόσμο. Δημιουργήθηκε το 1954 από δώδεκα κράτη. Βρίσκεται βορειοδυτικά της Γενεύης, στα σύνορα Γαλλίας-Ελβετίας και σήμερα τα μέλη του έχουν φτάσει τα 23.



Σχήμα 3.1: Λογότυπο του CERN

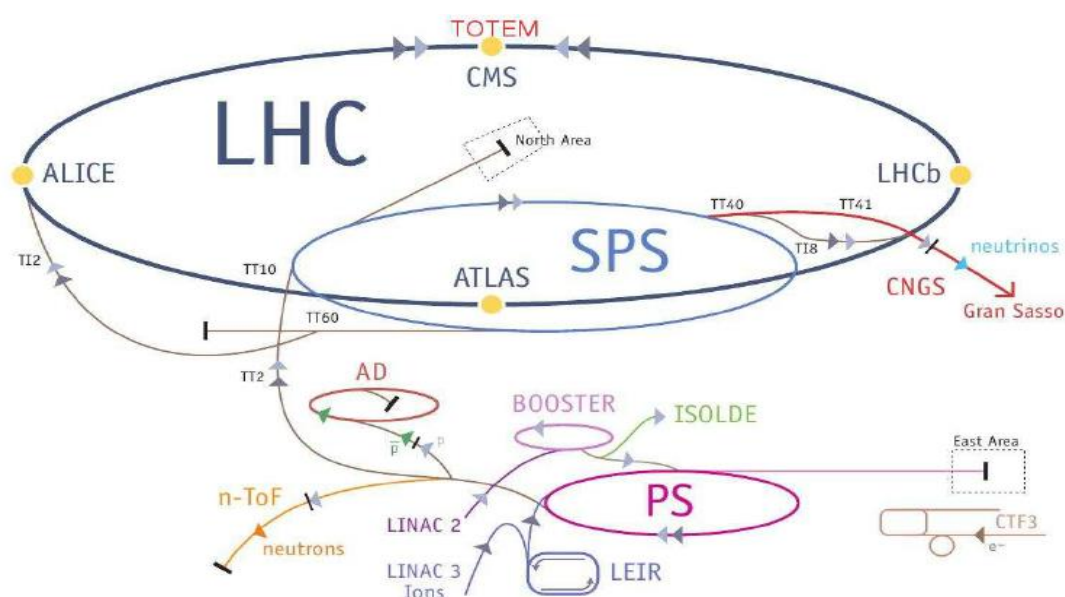
Ο κύριος σκοπός του CERN είναι να παρέχει επιταχυντές σωματιδίων και άλλες υποδομές που χρειάζονται για την έρευνα φυσικής υψηλών ενεργειών. Η έρευνα επικεντρώνεται στα στοιχειώδη σωματίδια. Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η σύγκρουση σε ταχύτητες πολύ κοντά σε αυτή του φωτός. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε στοιχεία για το πώς τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αλλά και πώς συμπεριφέρονται οι θεμελιώδεις δυνάμεις. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, χρειαζόμαστε ισχυρούς επιταχυντές<sup>12</sup>. Επί του παρόντος στο CERN χρησιμοποιούνται οι παρακάτω επιταχυντές<sup>13</sup>[8]:

- 1) LINear Accelerator 4 (LINAC 4)
- 2) Proton Synchrotron Booster (PS Booster)
- 3) LINear Accelerator 3 (LINAC 3)
- 4) Low Energy Ion Ring (LEIR)
- 5) Super Proton Synchrotron (SPS)
- 6) HIE-ISOLDE
- 7) CERN Linear Electron Accelerator for Research (CLEAR)
- 8) Proton Synchrotron (PS)
- 9) Large Hardron Collider (LHC)

<sup>12</sup>Επιταχυντής είναι ένα μηχάνημα το οποίο επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός

<sup>13</sup>Εκτός από τους επιταχυντές που αναφέρουμε σε αυτή την παράγραφο, υπάρχει και ένας επιβραδυντής, ο οποίος ονομάζεται επιβραδυντής αντιπρωτονίων και χρησιμοποιείται για την επιβράδυνση των αντιπρωτονίων που δημιουργούνται από τις συγκρούσεις στο LHC ώστε να μπορούμε να τα μελετήσουμε

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι διάφοροι επιταχυντές του CERN.Ο λόγος για τον οποίο συνδέονται οι επιταχυντές μεταξύ τους, είναι επειδή μερικοί επιταχυντές είναι πιο ισχυροί από άλλους. Έτσι, οι πιο μικροί επιταχυντές, επιταχύνουν τις δέσμες πρωτονίων μέχρι το σημείο που είναι ικανοί και μετά τις τροφοδοτούν σε πιο ισχυρούς επιταχυντές, για να επιταχυνθούν ακόμα παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, ο LHC τροφοδοτείται με πρωτόνια από ένα δίκτυο τεσσάρων επιταχυντών. Αρχικά, επιταχύνουμε τα πρωτόνια στον LINAC 4 και έπειτα αυτά περνάνε από τους επιταχυντές Booster,PS και SPS πριν καταλήξουν στον LHC.



**Σχήμα 3.2:**Εικόνα των σχετικών θέσεων των διαφόρων ανιχνευτών και επιταχυντών, κάτω από την γη

Το CERN, εκτός από την συνεισφορά του στην φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων, έχει συνεισφέρει σημαντικά και σε άλλους κλάδους, όπως σε αυτόν της επιστήμης των υπολογιστών. Ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web/WWW) δημιουργήθηκε από τους Tim Berners-Lee το 1989 και Robert Cailliau το 1990.Επίσης, οι τεχνολογικές καινοτομίες που απαιτούνται για να μπορούν να κάνουν οι πειραματικές διατάξεις του CERN ακριβέστερες μετρήσεις ,δημοσιοποιούνται στο κοινό ώστε ο καθένας να μπορεί να τις αξιοποιήσει.

### 3.1 Large Hadron Collider (LHC)

Ο LHC [9] είναι ο μεγαλύτερος επιταχυντής στοιχειωδών σωματιδίων σε όλο τον κόσμο. Άρχισε να λειτουργεί στις 10 Σεπτεμβρίου του 2008 και είναι ο τελευταίος επιταχυντής που έχει προστεθεί στο σύμπλεγμα ανιχνευτών στο CERN.Έχει μήκος 27 χιλιομέτρων και βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από το έδαφος. Μέσα στον επιταχυντή, δυο δέσμες που ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις και ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός συγκρούονται. Οι δέσμες βρίσκονται σε διαφορετικούς σωλήνες που διατηρούνται σε ultrahigh vacuum<sup>14</sup>.

<sup>14</sup>είναι ένας χώρος τόσο κενός ώστε να μπορεί να προσομοιώσει τις συνθήκες του διαστήματος

Οι δέσμες των σωματιδίων κατευθύνονται γύρω από τον LHC μέσω χιλίων εξακοσίων (1600) υπεραγωγίων μαγνητών, χιλίων διακοσίων τριάντα δυο (1232) διπολικών μαγνητών<sup>15</sup> και τριακοσίων ενενήντα δυο τετραπολικών μαγνητών<sup>16</sup>, ενώ, πριν από την σύγκρουση των δυο δεσμών, χρησιμοποιείται ένα ειδικό σύστημα μαγνητών, ώστε να "πιέσει" τα σωματίδια πιο κοντά μεταξύ τους. Έτσι αυξάνονται οι πιθανότητες σύγκρουσης .

Τα σωματίδια κινούνται γύρω από τον ανιχνευτή 11245 φορές ανά δευτερόλεπτο. Οι δέσμες των σωματιδίων δεν αποτελούν μια συνεχή ροή σωματιδίων αλλά χωρίζονται σε 2200-2800 πακέτα σωματιδίων ή αλλιώς bunches .

Τα bunches διασταυρώνονται ανά 25 ns (δηλαδή με ρυθμό 40 MHz) και το καθένα περιέχει  $1,15-1,5 \times 10^{11}$  σωματίδια. Παρά όμως τον υψηλό αριθμό σωματιδίων που διαθέτει κάθε bunch, οι συγκρούσεις που συμβαίνουν στην διασταύρωση δυο bunches (BX) είναι περίπου 50. Δηλαδή, έχουμε πολύ μικρή πιθανότητα σύγκρουσης, η οποία σχετίζεται με τους μαγνήτες που έχουν τοποθετηθεί γύρω από του σωλήνες, όπως αναφέραμε και παραπάνω.

Τα bunches διασταυρώνονται σε τέσσερα σημεία, τα οποία ονομάζονται σημεία αλληλεπίδρασης (ΣΑ). Γύρω από τα οποία έχουν τοποθετηθεί οι ανιχνευτές.

1<sup>ο</sup> Σημείο αλληλεπίδρασης: Το πρώτο σημείο αλληλεπίδρασης βρίσκεται γύρω από τους ανιχνευτές ATLAS [10] και LHC-f [11]. Ο ATLAS είναι ένας από τους δυο ανιχνευτές γενικής χρήσης στο CERN. Ερευνά ένα μεγάλο φάσμα φυσικής, από την μελέτη του μποζονίου Higgs ως την ανίχνευση παραπάνω διαστάσεων και την ανίχνευση σωματιδίων που θα μπορούσαν να αποτελούν την σκοτεινή ύλη. Ο LHC-f χρησιμοποιεί σωματίδια που έχουν συγκρουσθεί περιφερειακά μεταξύ τους, ώστε να μπορέσει να προσομοιώσει την κοσμική ακτινοβολία σε συνθήκες εργαστηρίου.

2<sup>ο</sup> Σημείο αλληλεπίδρασης: Στο δεύτερο σημείο αλληλεπίδρασης έχει τοποθετηθεί ο ανιχνευτής ALICE [12]. Ο ανιχνευτής αυτός είναι κατασκευασμένος ώστε να μελετάει την ισχυρά αλληλοεπιδρούσα ύλη σε πολύ μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες, όπου η φάση της ύλης, που ονομάζεται quark-gluon plasma<sup>17</sup>, δημιουργείται. Ο ανιχνευτής ALICE ζυγίζει 10.000 τόνους, είναι 26 μέτρα σε μήκος, 16 μέτρα σε ύψος και 16 μέτρα σε πλάτος. Επίσης, βρίσκεται 56 μέτρα κάτω από την γη.

3<sup>ο</sup> Σημείο αλληλεπίδρασης: Στο τρίτο σημείο αλληλεπίδρασης βρίσκονται οι ανιχνευτές CMS [13] και TOTEM [14]. Ο ανιχνευτής CMS είναι και αυτός ανιχνευτής γενικής χρήσης, όπως και ο ATLAS. Ο ανιχνευτής CMS (όπως και ο ATLAS) ασχολείται με την μελέτη του μποζονίου Higgs, την ανίχνευση παραπάνω διαστάσεων και την ανίχνευση σωματιδίων που θα μπορούσαν να αποτελούν την σκοτεινή ύλη. Βέβαια, χρησιμοποιεί διαφορετική τεχνολογία από τον ATLAS και το σύστημα μαγνητών του είναι διαφορετικά σχεδιασμένο. Το πείραμα TOTEM είναι το πιο παλιό πείραμα του CERN και ο ανιχνευτής TOTEM χρησιμοποιείται για την μελέτη των πρωτονίων που σκεδάζονται σε μικρές γωνίες από τις συγκρούσεις στον LHC. Τα σωματίδια που μελετάει ο TOTEM ονομάζονται εμπρόσθια.

<sup>15</sup>Οι διπολικοί μαγνήτες έχουν μήκος 15 μέτρα ο καθένας

<sup>16</sup>Οι τετραπολικοί μαγνήτες έχουν μήκος 5-7 μέτρα ο καθένας

<sup>17</sup>Είναι μια κατάσταση της ύλης όπου τα κουάρκ και τα γλουόνια που περιέχονται είναι ελεύθερα

4<sup>ο</sup> σημείο αλληλεπίδρασης: Στο τέταρτο σημείο αλληλεπίδρασης έχουν τοποθετηθεί οι ανιχνευτές LHC-b [15] και MoEDAL [16]. Ο ανιχνευτής LHC-b ειδικεύεται στην μελέτη των διαφορών της ύλης και της αντιύλης μέσω της μελέτης του b-quark. Ο σκοπός του ανιχνευτή MoEDAL είναι η ανίχνευση του μαγνητικού μονοπόλου.

Παραθέτουμε παρακάτω την πλήρη ονομασία των ανιχνευτών που αναφέρθηκαν.

1) ATLAS → A Toroidal LHC ApparatuS

2) LHC-f → LHC-forward

3) ALICE → A Large Ion Collider Experiment

4) CMS → Compact Muon Solenoid

5) TOTEM → TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC

6) LHC-b → LHC-beauty

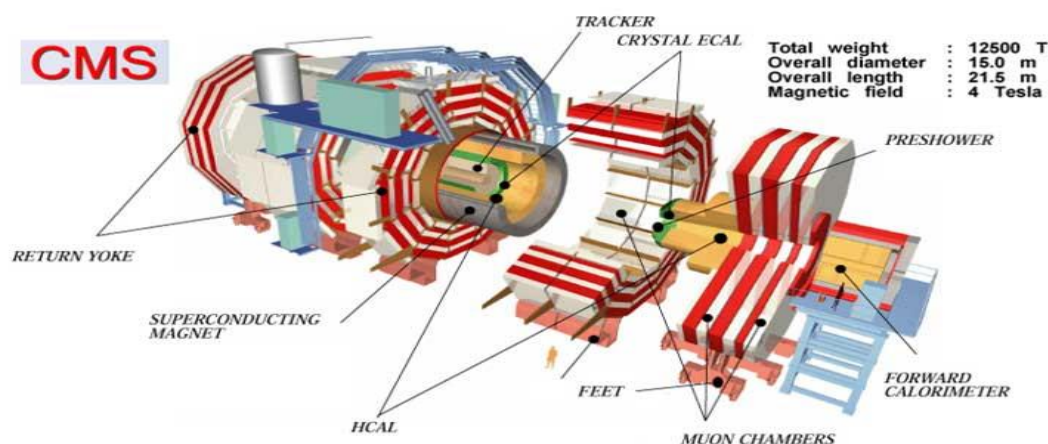
7) MoEDAL → Monopole and Exotics Detector At the LHC

Στην συνέχεια θα δώσουμε μερικές παραπάνω πληροφορίες για τον ανιχνευτή CMS, καθώς από αυτόν προέρχονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία.

## 3.2 Compact Muon Solenoid (CMS)

Ο ανιχνευτής CMS [13] έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελείται από αρκετά ομόκεντρα στρώματα διαφόρων εξαρτημάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο ανιχνευτής CMS δρα ως μια τεράστια κάμερα υψηλών ταχυτήτων, η οποία μπορεί να τραβήξει από όλες τις κατευθύνσεις μέχρι και σαράντα εκατομμύρια (40.000.000) φωτογραφίες των σωματιδίων που συγκρούονται το δευτερόλεπτο. Το CMS χωρίζεται σε τρία μέρη, με το πρώτο μέρος να είναι το καμπύλο τμήμα του κυλίνδρου, που ονομάζεται βαρέλι (Barel) και τα άλλα δύο οι βάσεις του, οι οποίες ονομάζονται καπάκια (Endcaps). Περαιτέρω το CMS έχει μήκος 21 μέτρα, ύψος 15 μέτρα και η συνολική του μάζα ανέρχεται στους 15.000 τόνους. Ο σκοπός του CMS είναι να παρατηρήσει τα προϊόντα των διασπάσεων και να διαπιστώσει από ποιες συγκρούσεις προήλθαν. Αυτό είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα, καθώς όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, ο ρυθμός με τον οποίο γίνονται οι συγκρούσεις είναι πάρα πολύ μεγάλος. Παρ' όλα αυτά, οι προδιαγραφές του CMS του επιτρέπουν να ανταπεξέλθει σε αυτές τις απαιτήσεις με μεγάλη αποδοτικότητα.

Το κύριο χαρακτηριστικό του CMS είναι ο σωληνοειδής μαγνήτης του, ο οποίος αποτελεί και μέρος της ονομασίας του (Solenoid). Ο μαγνήτης αυτός, είναι ο μεγαλύτερος υπεραγώγιμος μαγνήτης στον κόσμο και, έτσι, μπορεί και περικλείει τα καλορίμετρα και τους ανιχνευτές τροχιών. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η δομή του CMS, η οποία θα συζητηθεί παρακάτω.



Σχήμα 3.3: Δομή του CMS

Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι το υπεραγωγίμο σωληνοειδές πηνίο, βρίσκεται ανάμεσα στο αδρονικό καλορίμετρο και στους θαλάμους μιονίων, και διαρρέεται από ρεύμα 1300 Αμπερε, δημιουργώντας, έτσι, ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο 4 Tesla. Το μαγνητικό πεδίο πρέπει να περιοριστεί μέσα στον όγκο του CMS και, γι' αυτό, χρησιμοποιούνται σιδερένιοι ζυγοί, οι οποίοι παρεμβάλλονται μεταξύ των θαλάμων μιονίων. Όλο το σύστημα ζυγίζει 12500 τόνους.

Στον ανιχνευτή CMS υπάρχουν 3 είδη ανιχνευτών: οι ανιχνευτές τροχιών, τα καλορίμετρα και οι ανιχνευτές μιονίων.

#### 1) Ανιχνευτές τροχιών ή Ανιχνευτές πυριτίου (silicon trackers)

Ο ανιχνευτής τροχιών είναι ο πλησιέστερος ανιχνευτής στην δέσμη και είναι φτιαγμένος εξ'ολοκλήρου από πυρίτιο. Σκοπός του είναι η ανακατασκευή των τροχιών φορτισμένων σωματιδίων όπως μίονια ( $\mu^-$ ), ηλεκτρόνια ( $e^-$ ), πρωτόνια ( $p$ ), πιόνια ( $\pi^\pm$ ), καόνια ( $K^\pm$ ) και λοιπά. Ο λόγος για τον οποίο ο ανιχνευτής είναι κατασκευασμένος εξ'ολοκλήρου από πυρίτιο (βλέπε σχήμα 3.4), είναι ότι αυτό το υλικό μας επιτρέπει να πάρουμε μετρήσεις των σωματιδίων χωρίς να επηρεάσουμε την τροχιά τους. Οι τροχιές αυτές προέρχονται από το σημείο σύγκρουσης των πρωτονίων από τα οποία δημιουργήθηκαν τα σωματίδια και ο ανιχνευτής πυριτίου είναι ικανός να βρίσκει αυτό το σημείο. Η ανακατασκευή των τροχιών γίνεται παίρνοντας 10 με 14 μετρήσεις της θέσης του σωματιδίου μετά την σύγκρουση που τις ονομάζουμε hits και ενώνοντας όλα τα σημεία κατασκευάζουμε μια τροχιά.

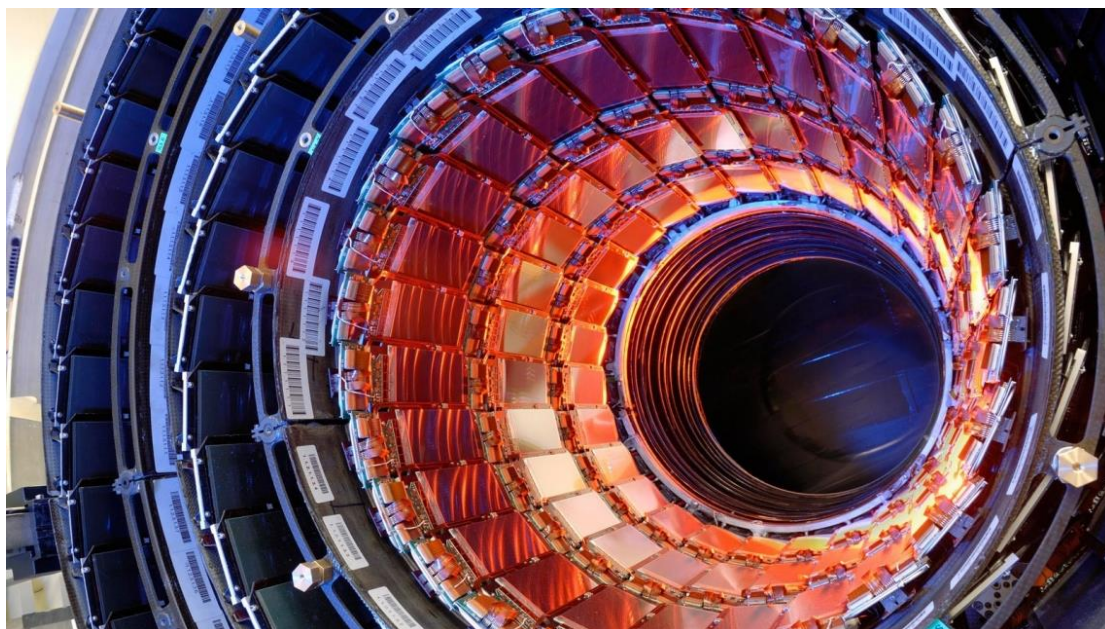
Πιο συγκεκριμένα τα σωματίδια που περνάνε από τον ανιχνευτή πυριτίου αντιδρούν ηλεκτρομαγνητικά με το πυρίτιο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ηλεκτρικά σήματα τα οποία μετά ενισχύονται και ανιχνεύονται. Αυτά τα σήματα είναι που ονομάσαμε hits παραπάνω. Η ανακατασκευή της τροχιάς προσδιορίζει την ορμή και το φορτίο του σωματιδίου. Το μαγνητικό πεδίο  $B$  που παράγεται από το υπεραγωγίμο σωληνοειδές πηνίο έχει προβολή μόνο στον άξονα της δέσμης.

Ισχύει ο τύπος:

$\mathbf{r}_\tau = (Bq)\rho$ , όπου  $\rho_\tau$  είναι η συνιστώσα ορμής κάθετη στον άξονα της δέσμης,  $q$  το φορτίο του σωματιδίου και  $\rho$  η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς του.



Έτσι μέσω του παραπάνω τύπου βλέπουμε ότι, μελετώντας την κατεύθυνση που έχει το σωματίο, μπορούμε να βρούμε το πρόσημο του φορτίου και μετρώντας της ακτίνα καμπυλότητας μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο της ορμής του.



**Σχήμα 3.4:** Λωρίδες πυριτίου του ανιχνευτή μέσα στο βαρέλι

## 2)Καλορίμετρα

Παρ' όλο που έχουμε την δυνατότητα να εξάγουμε πληροφορίες για τα σωματία από τους ανιχνευτές πυριτίου, αυτές δεν είναι αρκετές για να οριστεί πλήρως ένα σωματίο και, περαιτέρω, δεν έχουν την δυνατότητα να καταγράψουν ουδέτερα σωματία. Ο ανιχνευτής που δίνει λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι το καλορίμετρο. Υπάρχουν δυο είδη καλορίμετρων, το καθένα με διαφορετικές λειτουργίες.

### ·Ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο (Electromagnetic Calorimeter/ECAL)

Η κύρια λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού καλορίμετρου είναι να μετράει ενέργειες σωματιδίων που αλληλεπιδρούν κυρίως, ηλεκτρομαγνητικά με την ύλη, τα οποία είναι τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια. Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο αποτελείται από κρυστάλλους οξειδίου μολύβδου-βολφραμίου που σπινθηρίζουν όταν πέφτουν σε αυτούς ηλεκτρόνια και φωτόνια.

Περαιτέρω φωτοανιχνευτές που είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν σε πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία είναι προσαρτημένοι στο πίσω μέρος καθενός από αυτούς του κρυστάλλους για να μπορέσουν να ανιχνεύσουν τους σπινθηρισμούς και να τους μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ενισχύεται και στέλνεται για ανάλυση.

Το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο χωρίζεται σε τρία μέρη, τα οποία βρίσκονται στο βαρέλι και στα δύο καπάκια. Περαιτέρω, βρίσκεται ανάμεσα στον ανιχνευτή πυριτίου και στο δεύτερο είδος καλορίμετρου HCAL (βλέπε παρακάτω) και αποτελείται από 61.200 κρυστάλλους, οι οποίοι δημιουργούν 36 υπερμονάδες κρυστάλλων που διαθέτουν 1700 κρυστάλλους η καθεμιά. Τέλος, το κάθε καπάκι διαθέτει περίπου 15.00 κρυστάλλους.

### •Αδρονικό καλορίμετρο (Hardron Calorimeter/HCAL)

Το αδρονικό καλορίμετρο μετράει την ενέργεια των αδρονίων ( πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια κ.λπ.).Το αδρονικό καλορίμετρο είναι ένα δειγματοληπτικό καλορίμετρο που σημαίνει ότι μετράει την θέση, την ενέργεια αλλά και τον χρόνο άφιξης ενός σωματιδίου. Για να το κάνει αυτό, χρησιμοποιεί εναλλασσόμενα στρώματα υλικών που λειτουργούν ως απορροφητές και σπινθηριστές και παράγουν έναν γρήγορο παλμό φωτός, όταν το σωματίδιο περνάει από μέσα. Έπειτα ειδικές οπτικές ίνες συλλέγουν το φως και το τροφοδοτούν σε ειδικά κουτιά ανάγνωσης στα οποία έχουν τοποθετηθεί φωτοανιχνευτές που ενισχύουν το σήμα. Όταν η ποσότητα φωτός από πολλά στρώματα πλακιδίων και σε μια συγκεκριμένη περιοχή αθροιστεί, μας δίνει ένα μέτρο της ενέργειας του σωματιδίου.

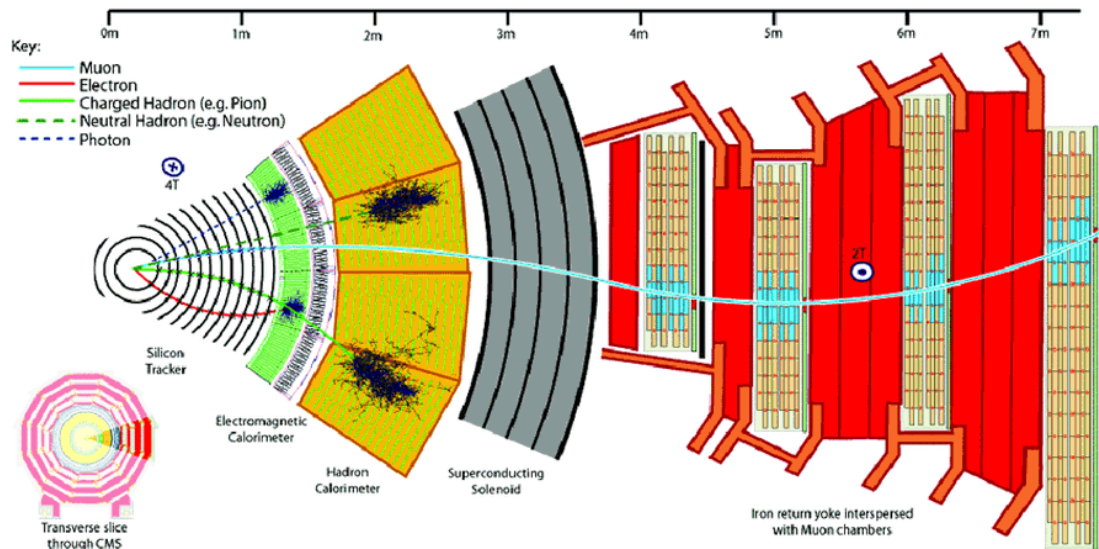
Το αδρονικό καλορίμετρο είναι φτιαγμένο από πολύ πυκνό υλικό<sup>18</sup>, ώστε να μπορεί να συγκρατήσει και να μετρήσει τους καταιονισμούς σωματιδίων όταν ένα αδρόνιο συγκρούεται με το απορροφητικό υλικό. Για αυτό τον λόγο, το αδρονικό καλορίμετρο είναι τεράστιο και το να ενσωματωθεί στο CMS ήταν ένα δύσκολο εγχείρημα. Για να γίνει αυτό, το αδρονικό καλορίμετρο έχει οργανωθεί σε πέντε μέρη: δυο στο βαρέλι (HB και HO),στα καπάκια (HE) και το εμπρόσθιο μέρος (HF). Αποτελείται 36 "σφήνες" στο βαρέλι όπου η καθεμία έχει βάρος 26 τόνους. Παρόμοια, 36 σφήνες στα καπάκια μετρούν την ενέργεια των σωματιδίων καθώς αναδύονται από τα άκρα του σωληνοειδούς μαγνήτη.

Τέλος, το αδρονικό καλορίμετρο βρίσκεται γύρω από το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο καθώς και αυτό έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει φορτισμένα σωματίδια.

### •Θάλαμοι μιονίων (Muon Chambers)

Οι θάλαμοι μιονίων βρίσκονται στο εξωτερικό στρώμα του βαρελιού και έξω από τον μαγνήτη. Είναι τοποθετημένοι ανάμεσα σε χαλύβδινους οπλισμούς που αντιστρέφουν την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με το εσωτερικό του μαγνήτη. Αυτό συμβαίνει καθώς η αλληλεπίδραση των μιονίων με την ύλη είναι πολύ ασθενής και έτσι κανένα από τα καλορίμετρα δεν μπορεί να τα ανιχνεύσει. Η λειτουργία τους βασίζεται στην καταγραφή των ιονισμών του αερίου που περιέχουν, ο οποίος προκαλείται από τα διερχόμενα σωματίδια. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη θαλάμων μιονίων: οι σωλήνες ολίσθησης (Drift Tubes/DTs),οι θάλαμοι καθοδικών λωρίδων (Cathode Strip chambers/CSCs) και οι θάλαμοι πλακών αντίστασης (Resistive Plate Chambers/RPC).Συνολικά το CMS διαθέτει 1400 θαλάμους, από τους οποίους οι 250 είναι DTs,οι 540 είναι CSCs και οι υπόλοιποι 610 είναι RPCs.Παρακάτω θα αναλύσουμε τις τρεις αυτές κατηγορίες θαλάμων. Πριν γίνει αυτό όμως, παραθέτουμε, στο σχήμα 3.5 τις τροχιές διαφόρων σωματιδίων στην εγκάρσια τομή του CMS,καθώς και οι καλοριμετρικοί καταιονισμοί που προκαλούν μερικά από αυτά.

<sup>18</sup>Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ο ορείχαλκος, καθώς είναι πολύ πυκνός και αποτελεί τους απορροφητές του καλορίμετρου

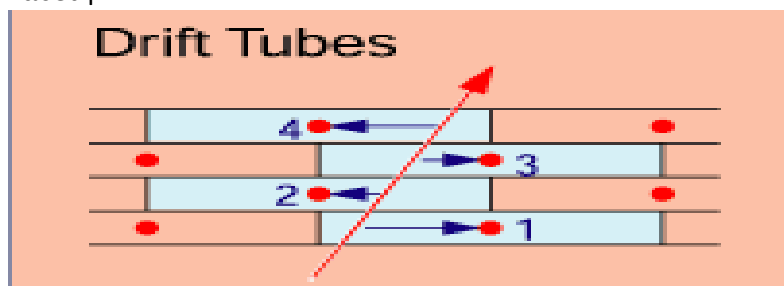


**Σχήμα 3.5:**Εγκάρσια τομή του CMS, οι τροχιές των σωματιδίων και καλοριμετρικοί καταποτισμοί

### Drift Tubes (DTs)

Τα DTs ανακατασκευάζουν τις τροχιές των μιονίων μέσα στο βαρέλι. Τα DTs έχουν πλάτος 4 εκατοστά και περιέχουν ένα τεντωμένο σύρμα μέσα σε όγκο αερίου. Όταν ένα μίονιο η οποιοδήποτε φορτισμένο σωματίο περνάει από τα DTs, χτυπά τα ηλεκτρόνια του αερίου, με αποτέλεσμα αυτά να ξεφεύγουν από το ατομό τους και να ακολουθούν το ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο καταλήγει στο θετικά φορτισμένο σύρμα.

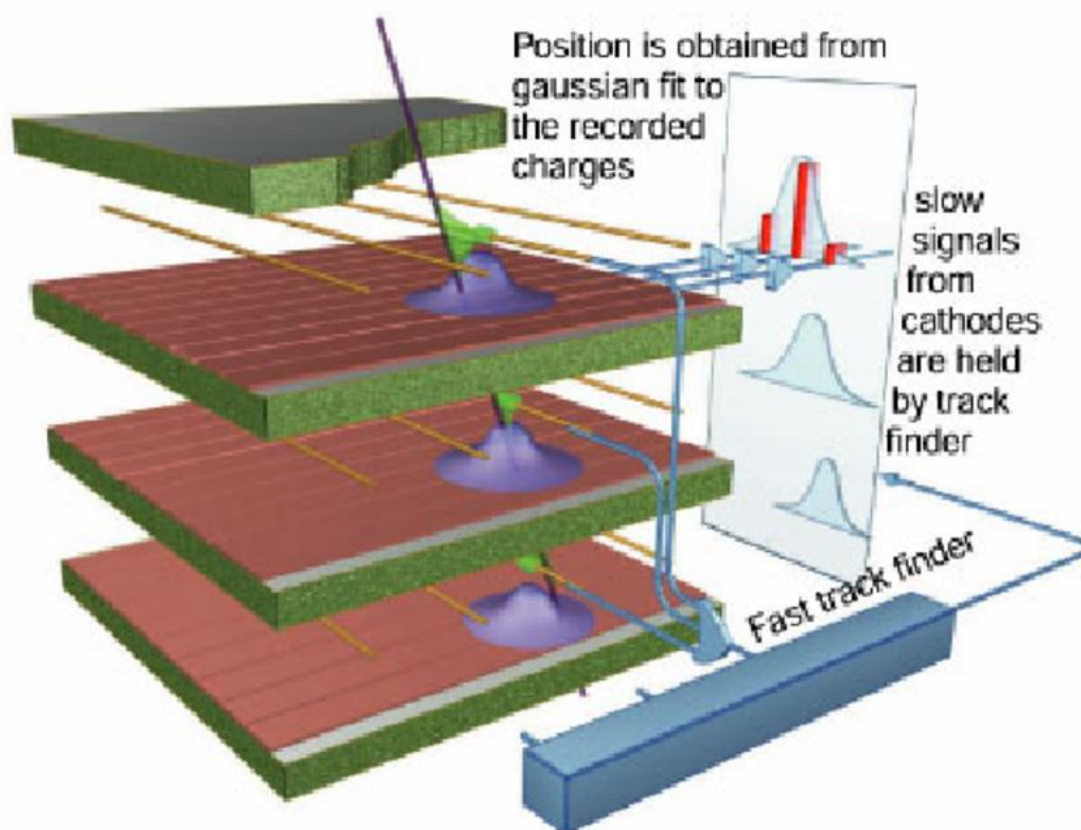
Κοιτώντας σε ποιο σημείο τα ηλεκτρόνια χτύπησαν το σύρμα, καθώς και υπολογίζοντας την αρχική απόσταση του μιονίου από το σύρμα, τα DTs μπορούν να δώσουν δύο συντεταγμένες: την συντεταγμένη κατά το μήκος της διεύθυνσης παράλληλη προς την δέσμη και την κάθετη συντεταγμένη από την δέσμη. Κάθε θάλαμος DT έχει μέγεθος 2m X 2.5m και αποτελείται από 12 στρώματα αλουμινίου, τα οποία έχουν χωριστεί σε τρεις ομάδες των τεσσάρων (βλέπε σχήμα 3.6), όπου η κάθε μια αποτελείται από 60 DTs. Η μεσαία ομάδα μετράει την παράλληλη στη δέσμη συντεταγμένη ενώ οι ακριανές την κάθετη.



**Σχήμα 3.6:**Γραφική αναπαράσταση μια ομάδας από 4 DTs

**Cathode Strip Chambers (CSCs):** Τα CSCs χρησιμοποιούνται στα καπάκια όπου το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιόμορφο και τα ποσοστά των σωματιδίων που βρίσκονται εκεί είναι μεγάλα. Τα CSCs αποτελούνται από συστοιχίες θετικά φορτισμένων καλωδίων ανόδου

διασταυρωμένα με αρνητικά φορτισμένες χάλκινες ταινίες καθόδου εντός όγκου αερίου (βλέπε σχήμα 3.7). Η φιλοσοφία της λειτουργίας του είναι παρόμοια με τα DTs. Όταν τα μίονια περνάνε από τα CSCs χτυπάνε τα ηλεκτρόνια των ατόμων του αερίου, τα οποία ξεφεύγουν και κατευθύνονται προς τα καλώδια της ανόδου, δημιουργώντας ένα καταιονισμό ηλεκτρονίων. Τα θετικά ιόντα κινούνται μακριά από τα καλώδια και προς την χάλκινη κάθοδο, προκαλώντας επίσης έναν ηλεκτρικό παλμό στις λωρίδες που βρίσκονται κάθετα με τα καλώδια. Επειδή οι λωρίδες και τα καλώδια είναι κάθετες μεταξύ τους, παίρνουμε δυο χωρικές συντεταγμένες για κάθε σωματίο. Επιπλέον, εκτός από την παροχή ακριβών μετρήσεων χώρου και χρόνου, επειδή τα καλώδια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, κάνουν τα CSCs γρήγορους ανιχνευτές, κατάλληλους για triggering<sup>19</sup>. Τέλος, κάθε CSC αποτελείται από 4 στρώματα (βλέπε σχήμα 3.7) και είναι ικανό να ανιχνεύσει μίονια και να αντιστοιχίσει τις τροχιές τους με τον ανιχνευτή τροχιών.



**Σχήμα 3.7:**Γραφική αναπαράσταση των CSCs

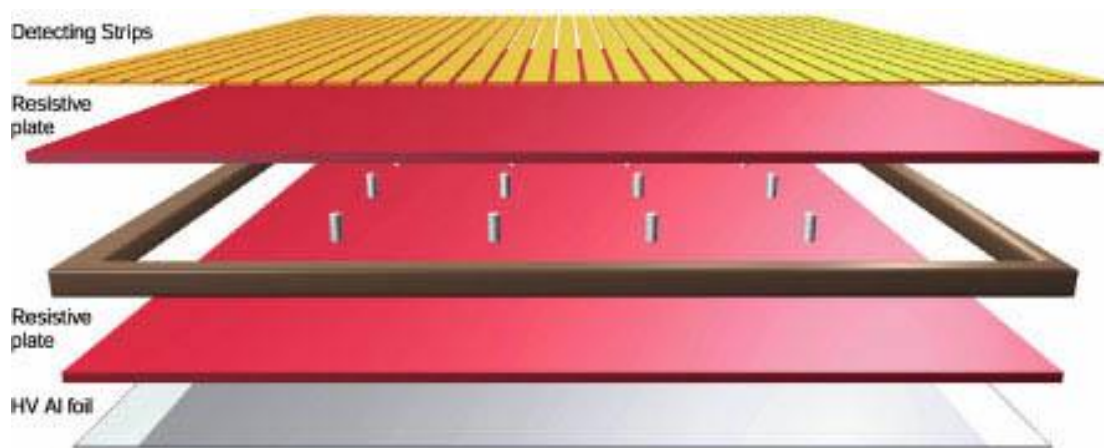
### Resistive Plate Chambers (RPCs)

Τα RPCs είναι γρήγοροι ανιχνευτές αερίων οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ένα επιπλέον σύστημα σκανδαλισμού, παράλληλα με τα DTs και τα CSCs. Τα RPCs αποτελούνται από δυο παράλληλες πλάκες, μια θετικά φορτισμένη άνοδο και μια αρνητικά φορτισμένη κάθοδο (βλέπε σχήμα 3.8). Οι δυο αυτές πλάκες είναι κατασκευασμένες από υλικό εξαιρετικά υψηλής αντίστασης και χωρίζονται από όγκο αερίου.

<sup>19</sup>Δηλαδή είναι αρκετά γρήγοροι ώστε σε πραγματικό χρόνο να μπορούν να κάνουν κάποια επιλογή

Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με τα DTs και CSCs. Όταν ένα μόνιο περνάει μέσα από τα RPCs χτυπάει τα ηλεκτρόνια από τα άτομα αερίου, τα οποία ξεφεύγουν και χτυπάνε άλλα άτομα αερίου, προκαλώντας έτσι μια "χιονοστιβάδα" ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόδια είναι διαφανή ως προς το σήμα (τα ηλεκτρόνια), τα οποία συλλέγονται από εξωτερικές μεταλλικές λωρίδες μετά από μια μικρή αλλά συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση. Το μοτίβο των χτυπημάτων στις λωρίδες δίνει ένα γρήγορο μέτρο για την ορμή του μιονίου, το οποίο χρησιμοποιείται από το σύστημα σκανδαλισμού (βλέπε παρακάτω) για να πάρει την απόφαση για τον αν η πληροφορία αξίζει να διατηρηθεί.

Αξίζει να αναφερθεί, προς αποφυγή αποριών, ότι μπορεί τα RPCs να λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και να βρίσκονται σε κοινές περιοχές με τα DTs και CSCs, όμως ο βασικός λόγος που χρησιμοποιούνται είναι η υψηλή χρονική ανάλυση και για αυτό χρησιμοποιούνται και στο σύστημα σκανδαλισμού όπως αναφέραμε παραπάνω.



Σχήμα 3.8:Γραφική αναπαράσταση RPCs

### 3.3 Σκανδαλιστής του CMS

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στο CMS ο χρόνος διασταύρωσης των Bunches είναι κάθε 25 ns. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε περίπου ένα δισεκατομμύριο συγκρούσεις πρωτονίου-πρωτονίου μέσα στον ανιχνευτή. Αυτός ο όγκος πληροφορίας είναι τεράστιος και είναι αδύνατον να αποθηκευτεί και να αναλυθεί. Ακόμα και αν μπορούσε να αποθηκευτεί και να αναλυθεί, η συντριπτική πλειοψηφία της πληροφορίας που θα παίρναμε θα ήταν αδιάφορη, καθώς οι περισσότερες αντιδράσεις είναι χαμηλοενεργειακές συγκρούσεις και δεν αποκαλύπτουν κανένα καινούριο φαινόμενο. Για αυτό τον λόγο, έχει δημιουργηθεί το σύστημα σκανδαλισμού (trigger) ώστε να επιλέγει σε πραγματικό χρόνο ποια από όλα αυτά τα δεδομένα θα κρατήσουμε προς ανάλυση.

Ο ρόλος του συστήματος σκανδαλισμού λοιπόν είναι να μειώσει τον όγκο δεδομένων που έχουμε προς ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα από τα περίπου 40 εκατομμύρια γεγονότα που πραγματοποιούνται στον CMS ανά δευτερόλεπτο, ο σκανδαλιστής κρατάει περίπου χίλια (1000). Για να το κάνει αυτό έχουμε δώσει στον σκανδαλιστή συγκεκριμένα κριτήρια φυσικής, τα οποία πρέπει να ικανοποιεί το γεγονός για να το κρατήσουμε.

Ο σκανδαλιστής χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο ονομάζεται σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου (Level-1 Trigger/L1T) και αναλύει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να κάνει μια αρχική μείωση του όγκου πληροφορίας που έχουμε, ενώ το δεύτερο ονομάζεται σκανδαλιστής υψηλού επιπέδου (High Level Trigger/HLT) και αναλύει τα δεδομένα που πέρασαν από τον L1T για να κρατήσει τελικά τα πιο ενδιαφέροντα. Η βασική διαφορά στα δυο αυτά μέρη είναι ότι ο L1T εκτελείται σε επίπεδο υλικού (hardware) ενώ ο HLT σε επίπεδο λογισμικού (software). Παρακάτω θα αναλύσουμε τα αυτά μέρη.

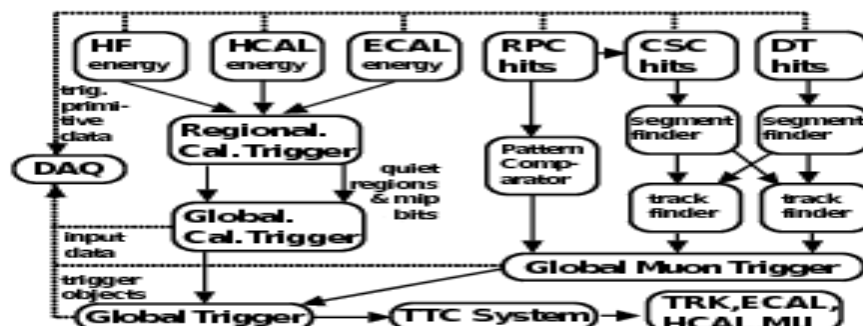
#### •Σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου (Level-1 Trigger/L1T)

Ο σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου [17,19] χρησιμοποιεί δεδομένα από τα καλορίμετρα και τους θαλάμους μιονίων για να κάνει μια αρχική ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για να δούμε ποια δεδομένα αξίζει να κρατήσουμε. Η ταχύτητα με την οποία μπορεί να πάρει αυτή την απόφαση ο σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου είναι 3,8 μs. Όμως, τα Bunches διασταυρώνονται μεταξύ τους κάθε 25 ns. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι να αναλυθεί ένα γεγονός από τον σκανδαλιστή, έχουν πραγματοποιηθεί περίπου 1500 καινούρια γεγονότα. Για αυτό τον λόγο έχει δημιουργηθεί ένα σύστημα προσωρινής μνήμης (pipeline memory) ώστε να αποθηκεύονται οι πληροφορίες από τα γεγονότα μέχρι να πάρει την απόφαση του ο σκανδαλιστής. Τα γεγονότα καταγράφονται με την σειρά που συνέβησαν. Εξαιτίας του μικρού χρόνου που έχουμε για να γίνει η ανάλυση, ο L1T ψάχνει για πολύ απλά σημάδια ενδιαφέρουσας φυσικής, όπως αν το σωματίδιο έχει υψηλή ενέργεια. Ο ρυθμός με τον οποίο ελαττώνεται ο όγκος της πληροφορίας είναι από 40 MHz σε 1 kHz.

Η διαδικασία μείωσης του όγκου της πληροφορίας σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία χρειαζόμαστε πολύ γρήγορα, ειδικά σχεδιασμένα ηλεκτρονικά, από τα οποία σημαντική μερίδα πρέπει να τοποθετηθεί στον ανιχνευτή του CMS. Αυτό εισάγει σοβαρούς περιορισμούς στον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών, τα οποία πρέπει να είναι ανεκτικά στην ακτινοβολία με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας. Αλγόριθμοι εύρεσης λεπτονίων και jet, τρέχουν σε επεξεργαστές, εκτός του ανιχνευτή, των οποίων το υλικό (hardware) βασίζεται σε ένα μείγμα διακριτών συσκευών και πεδίων προγραμματισμένων συστοιχιών πύλης (Field Programmable Gate Arrays/FPGAs).

Ο σκανδαλιστής πρώτου επιπέδου χωρίζεται σε τρεις υποσκανδαλιστές: τον καλοριμετρικό, που λαμβάνει δεδομένα από τα δυο καλορίμετρα (ηλεκτρομαγνητικό και αδρονικό), τον μιονικό, που λαμβάνει δεδομένα από τους θαλάμους μιονίων και τον γενικό στο οποίο μεταφέρονται οι πληροφορίες από τους δυο υποσκανδαλιστές και αποφασίζει αν θα αποθηκευτεί το γεγονός ή όχι. Κάθε υποσκανδαλιστής (καλοριμετρικός, αδρονικός και μιονικός) δέχεται συμπιεσμένα δεδομένα από τους αντίστοιχους ανιχνευτές (βλέπε σχήμα 3.9), τα οποία λέγονται αρχικοί σκανδαλιστές (Trigger Primitives/TPs). Τα TPs παράγονται από τον γεννήτορα αρχικών σκανδαλιστών (Trigger Primitive Generators/TPGs) ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που φτιάχνει ένα μόνο μέρος του φυσικού αντικείμενου (π.χ. μια segments μιας μιονικής τροχιάς). Η δουλειά κάθε σκανδαλιστή είναι να πάρει τα TPs από το αντίστοιχο ανιχνευτικό σύστημα και να κατασκευάσει ένα πλήρες φυσικό αντικείμενο π.χ. ο μιονικός σκανδαλιστής φτιάχνει μια μιονική τροχιά από τα segments μετρά την ορμή και το φορτίο του αντίστοιχου

μιονίου .Οι TPGs είναι ηλεκτρονικές μονάδες που βρίσκονται ανάμεσα στους ανιχνευτές και στον L1T.



Σχήμα 3.9:Εικόνα λειτουργίας του L1T

### Καλοριμετρικός σκανδαλιστής

Ο καλοριμετρικός σκανδαλιστής αποτελείται από δυο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο είναι ο περιφερειακός καλοριμετρικός σκανδαλιστής (Regional Calorimeter Trigger/RCT).Ο RCT επεξεργάζεται τα δεδομένα από τα TPs του ηλεκτρομαγνητικού και αδρονικού καλοριμέτρου και παράγει ένα σύνολο υποψηφίων ηλεκτρονίων και φωτονίων καθώς και αθροίσματα της εγκάρσιας περιφερειακής ενέργειας. Το δεύτερο επίπεδο ονομάζεται γενικός καλοριμετρικός σκανδαλιστής (Global Calorimeter Trigger/GCT) και ο ρόλος του είναι η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που παρήγαγε ο RCT (βλέπε σχήμα 3.10). Πιο συγκεκριμένα, ταξινομεί περαιτέρω τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια, βρίσκει jets<sup>20</sup> τα οποία ταξινομούνται σε κεντρικά, εμπρόσθια και tau,χρησιμοποιώντας τα αθροίσματα ενέργειας από τον RCT και υπολογίζει γενικές ποσότητες, όπως το ποσό της εγκάρσιας ενέργειας που λείπει. Τέλος, παράγει τέσσερις υποψηφίους πρωτονίων και ηλεκτρονίων τα οποία χωρίζονται σε δυο τύπους απομονωμένα και μη απομονωμένα, για κάθε ένα από τα κεντρικά, εμπρόσθια και tau jets καθώς και διάφορες γενικές ποσότητες.

### Μιονικός σκανδαλιστής

Ο μιονικός σκανδαλιστής λαμβάνει δεδομένα και από τα τρία είδη ανιχνευτών μιονίων που έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 3.2, για την εξασφάλιση καλής κάλυψης. Για τα DTs και CSCs τα ηλεκτρονικά του σκανδαλιστή στο μπροστινό μέρος προσδιορίζουν τμήματα τροχιών (segments) από την πληροφορία των hits,η οποία είναι καταχωρισμένη σε πολλαπλά επίπεδα ανιχνευτών ενός θαλάμου. Αυτά τα τμήματα συλλέγονται και μεταδίδονται μέσω οπτικών ινών σε περιφερειακούς ανιχνευτές τροχιών (regional track finders) που, στην συνέχεια, εφαρμόζουν αλγόριθμους αναγνώρισης προτύπων που προσδιορίζουν τα υποψήφια μίονια και υπολογίζουν τη ορμή τους καθώς και το πόσο κάμπτονται στο μαγνητικό πεδίο του υπεραγωγίμου σωληνοειδούς πηνίου. Η πληροφορία μοιράζεται ανάμεσα στους ανιχνευτές τροχιών των θαλάμων καθοδικών λωρίδων (CSC Track Finders/DCTF) και των ανιχνευτών τροχιών των θαλάμων ανόδων λωρίδων (DT Track Finders/DTTF) για αποτελεσματική κάλυψη στην περιοχή που επικαλύπτεται και από τα δύο συστήματα.

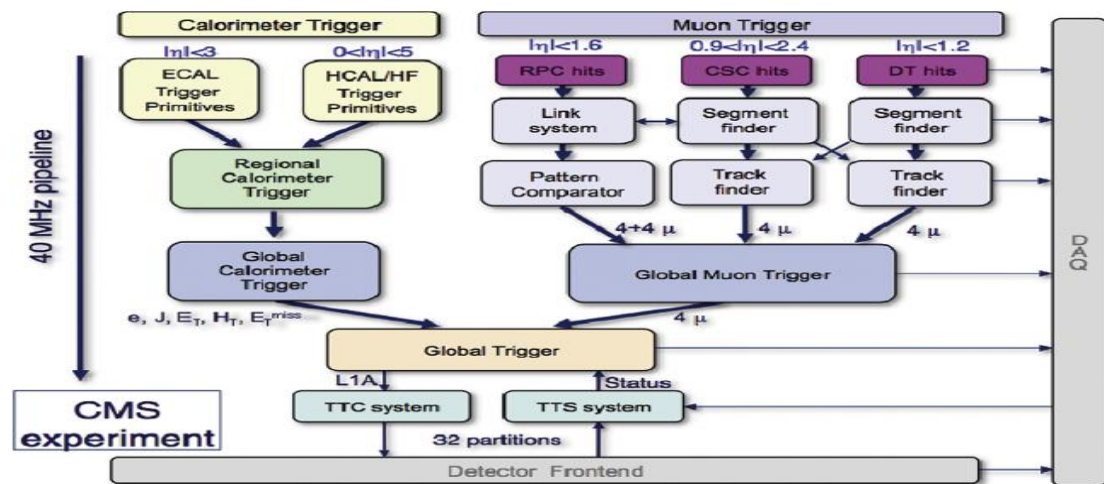
<sup>20</sup>Είναι ένας στενός κώνος από αδρόνια τα οποία παράγονται την αδρανοποίηση των κουάρκ ή των γλουονίων

Τα hits από τα RPCs στέλνονται κατευθείαν από τα ηλεκτρονικά στο μπροστινό μέρος σε λογικούς πίνακες σκανδαλιστή σύγκρισης μοτίβου (PAttern Comparator Trigger/PACT logic boards), που ταυτοποιούνται τα υποψήφια μόνια. Οι τρεις περιφερειακοί ανιχνευτές τροχιών ταξινομούν τα υποψήφια ταξινομημένα μόνια και στέλνουν στον γενικό μιονικό σκανδαλιστή από 4 μέχρι 8 υποψήφια μόνια για κάθε διασταύρωση στων Bunches. Τέλος, ο γενικός ανιχνευτής μιονίων (Global Muon Trigger) αναλύει περαιτέρω τα δεδομένα έτσι ώστε στην τελική ανάλυση τα υποψήφια μόνια μπορούν να απορριφθούν αν η ποιότητα τους δεν είναι καλή και ανακατασκευάζονται μόνο από έναν ανιχνευτή μιονίων.

Στο σχήμα 3.10 συνοψίζουμε την παραπάνω διαδικασία σε ένα απλό διάγραμμα.

### Γενικός σκανδαλιστής

Ο γενικός σκανδαλιστής είναι το τελευταίο μέρος του L1T και εφαρμόζει ένα μενού από σκανδαλιστές, ένα σύνολο απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιούν τα τελικά αντικείμενα (ηλεκτρόνια, φωτόνια, jets κτλ) για να επιλεγούν, οι οποίες απαιτούνται από τον σκανδαλιστή υψηλού επιπέδου. Αυτό το μενού περιλαμβάνει κριτήρια τα οποία κυμαίνονται από απλά, όπως ένα αντικείμενο να έχει ορμή πάνω από κάποια συγκεκριμένη τιμή, ως πολύπλοκα, όπως απαιτώντας συμπτώσεις πολλών αντικειμένων με τοπολογικές συνθήκες μεταξύ τους. Ο μέγιστος αριθμός απαιτήσεων σε κάθε μενού είναι 128.



Σχήμα 3.10:Εικόνα λειτουργίας του σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου (L1T)

### •Σκανδαλιστής υψηλού επιπέδου (High Level Trigger/HLT)

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω ο σκανδαλιστής υψηλού επιπέδου [17] είναι το δεύτερο και τελευταίο επίπεδο του Trigger. Σκοπός του είναι η μείωση του ρυθμού των γεγονότων σε 1 KHz. Οι αλγόριθμοι οι οποίοι εφαρμόζονται στον HLT τρέχουν σε μια μεγάλη φάρμα από επεξεργαστές οι οποίοι μπορούν να βρεθούν στο εμπόριο. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν πρόσβαση σε δεδομένα από όλους τους υποανιχνευτές του CMS, συμπεριλαμβανομένου και του ανιχνευτή τροχιών, με πλήρη λεπτομέρεια και ευκρίνεια. Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής του HLT είναι παρόμοιοι με αυτούς που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την offline ανάλυση των δεδομένων.

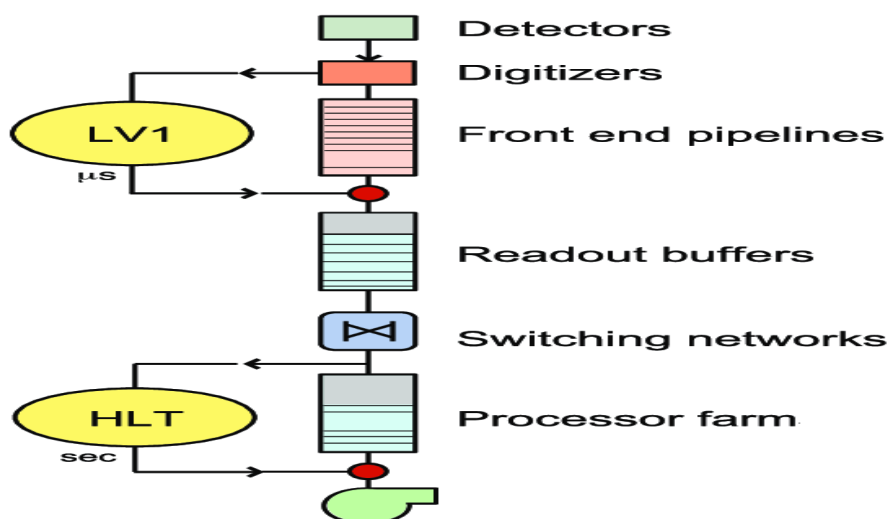


Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής του HLT είναι παρόμοιοι με αυτούς που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την offline ανάλυση των δεδομένων. Για αυτόν τον λόγο οι αλγόριθμοι του HLT σε αντίθεση με τον L1T, υπολογίζουν ποσότητες με ανάλυση συγκρίσιμη με αυτή της offline ανάλυσης. Έτσι, ο HLT μπορεί να παράγει αντικείμενα με ακρίβεια και να μειώσει σημαντικά τον θόρυβο.

Όπως είπαμε παραπάνω, η επεξεργασία των δεδομένων στον HLT γίνεται σε μια φάρμα επεξεργαστών. Η φάρμα αυτή χωρίζεται σε οικοδομικές μονάδες (builder units), όπου κάθε οικοδομική μονάδα παίρνει ξεχωριστά φυσικά αντικείμενα (τροχιές και jets) από τον σκανδαλιστή πρώτου επιπέδου, ώστε να συναρμολογηθούν σε ολοκληρωμένα γεγονότα. Έπειτα, με αίτημα από την μονάδα φίλτρου (filter unit), η οικοδομική μονάδα στέλνει το ολοκληρωμένο γεγονός στην μονάδα φίλτρου και η μονάδα φίλτρου αποσυμπιέζει τα ακατέργαστα δεδομένα σε δεδομένα ειδικά για τον ανιχνευτή και εκτελεί την ανακατασκευή του γεγονότος. Συνδεδεμένες οικοδομικές μονάδες και μονάδες φίλτρου βρίσκονται σε ένα μοναδικό πολυπύρηνο μηχάνημα και "συνεννοούνται" μέσω κοινής μνήμης.

Η επεξεργασία δεδομένων του HLT είναι δομημένη γύρω από την έννοια της διαδρομής (path), η οποία είναι ένα σύνολο βημάτων αλγοριθμικής επεξεργασίας, τα οποία εκτελούνται με προκαθορισμένη σειρά και ταυτόχρονα ανακατασκευάζουν φυσικά αντικείμενα και κάνουν επιλογές στα αντικείμενα αυτά. Κάθε διαδρομή εκτελείται ως ακολουθία βημάτων αυξανόμενης πολυπλοκότητας βελτίωσης της ανακατασκευής και φυσικής πολυπλοκότητας. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλείας, ώστε αν κάποιο βήμα δεν πληροί τα κριτήρια τα υπόλοιπα δεν εκτελούνται. Όταν η ακολουθία βημάτων ολοκληρωθεί, τα γεγονότα που έχουμε αποδεχθεί στέλνονται στον διαχειριστή μνήμης (storage manager) για αποθήκευση. Τελικά τα δεδομένα αποθηκεύονται τοπικά σε δίσκο και στέλνονται στο υπολογιστικό κέντρο CMS Tier-0 για offline επεξεργασία.

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζουμε συνοπτικά την λειτουργία του σκανδαλιστή.



Σχήμα 3.11: Επίπεδα Trigger

## 4 Μελέτη δυνατότητας σκανδαλισμού σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής στους κεντρικούς ανιχνευτές μιονίων του πειράματος CMS

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2, το σύστημα σκανδαλισμού στα διάφορα πειράματα που διεξάγονται στο CERN παίζει κεντρικό ρόλο στην αναζήτηση σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάμε την δυνατότητα ανίχνευσης τέτοιων σωματιδίων από τους κεντρικούς ανιχνευτές μιονίων του πειράματος CMS.

### 4.1 Περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την μελέτη

Για να διεξαχθεί αυτή η μελέτη χρησιμοποιήσαμε δυο τύπους δεδομένων, ο πρώτος τύπος δεδομένων ονομάζεται zero-bias data και ο δεύτερος τύπος δεδομένων δίνεται από μια τεχνική προσομοίωσης που ονομάζεται Monte-Carlo. Παρακάτω περιγράφουμε αυτούς τους δύο τύπους δεδομένων.

#### •Zero-bias data

Τα zero-bias data ή αλλιώς δεδομένα μηδενικής προκατάληψης είναι ακριβώς αυτό το οποίο υποδηλώνει το όνομα τους, δηλαδή δεδομένα τα οποία τα έχουμε συλλέξει χωρίς καμία επιλογή. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, τα δεδομένα τα οποία επεξεργαζόμαστε από τα πειράματα στον LHC είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό από το συνολικό όγκο δεδομένων που δημιουργείται κατά την διάρκεια κάποιου πειράματος και αυτό οφείλεται στα συστήματα σκανδαλισμού. Τα zero-bias data λοιπόν, είναι δεδομένα που έχουμε συλλέξει παρακάμπτοντας το σύστημα σκανδαλισμού του CMS. Ουσιαστικά είναι ο θόρυβος τον οποίο αναφέρουμε στο κεφάλαιο 2.3.

Στο κεφάλαιο αυτό είχαμε αναφέρει ότι αυτός ο τύπος δεδομένων είναι άχρηστος σε εμάς καθώς δεν περιέχουν κάποια καινούρια φυσική, παρ'όλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα μέτρο σύγκρισης του σήματος του σωματιδίου που θέλουμε να ανιχνεύσουμε με το σήμα του θορύβου που πρέπει να ξεπεράσει για να γίνει η ανίχνευση. Τα zero-bias data που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία συλλέχθηκαν κατά το Run-2 του LHC το 2018.

#### •Monte-Carlo

Η μέθοδος Monte-Carlo είναι μια στοχαστική διαδικασία όπου με την χρήση τυχαίων αριθμών και στατιστικής προσπαθούμε να λύσουμε ένα πρόβλημα μέσω μιας προσομοίωσης του. Ένα πείραμα Monte-Carlo συνήθως διεξάγεται με την χρήση μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

Ο δεύτερος τύπος δεδομένων που χρησιμοποιούμε σε αυτήν την μελέτη προέρχεται από προσομοιώσεις οι οποίες έχουν γίνει χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο. Μέσω αυτής της μεθόδου καταφέραμε να δημιουργήσουμε προσομοιώσεις για την συμπεριφορά τριών διαφορετικών σωματιδίων μεγάλου χρόνου ζωής. Μέσα από αυτές τις προσομοιώσεις καταφέραμε να συλλέξουμε διάφορα δεδομένα για αυτά τα σωματίδια

όπως σε ποιο θάλαμο μιονίων ανιχνεύτηκαν, την εγκάρσια ορμή τους, την ψευδο-ωκύτητα τους κτλ. Όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2, τα σωματίδια που μελετάμε σε αυτές τις προσομοιώσεις είναι όλα εξωτικά σωματίδια Higgs με διαφορετικές μάζες και χρόνους ζωής. Παρακάτω παραθέτουμε τις μάζες και την μέση απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το καθένα από αυτά.

i) Στην πρώτη προσομοίωση το σωματίδιο έχει μάζα 350 GeV και η μέση απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει είναι 10 μέτρα (στο σύστημα ηρεμίας<sup>21</sup>).

ii) Στην δεύτερη προσομοίωση το σωματίδιο έχει μάζα 1000 GeV και η μέση απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει είναι 10 μέτρα (στο σύστημα ηρεμίας).

iii) Στη τρίτη προσομοίωση το σωματίδιο έχει πάλι μάζα 1000 GeV αλλά η μέση απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει είναι 100 μέτρα ( στο σύστημα ηρεμίας).

Πριν συνεχίσουμε στην περιγραφή της μεθόδου επεξεργασίας των δεδομένων μας, παραθέτουμε τον ορισμό της ψευδο-ωκύτητας καθώς είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιούμε στην παρακάτω ανάλυση.

Για να ορίσουμε την ψευδο-ωκύτητα πρέπει αρχικά να ορίσουμε την ωκύτητα. Η ωκύτητα είναι ένα μέγεθος με το οποίο μετράμε την γωνία μεταξύ της διεύθυνσης των τροχιών των σωματιδίων και την διεύθυνση της δέσμης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\gamma = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1 + \frac{p}{E} \cos \theta}{1 - \frac{p}{E} \cos \theta} \right]$$

Όταν λοιπόν βρισκόμαστε στο σχετικιστικό όριο, δηλαδή, όταν τα σωματίδια έχουν πολύ μεγάλες ταχύτητες, έχουμε ότι  $p \approx E$ , οπότε σε αυτή την περίπτωση προκύπτει η ψευδο-ωκύτητα, η οποία δίνεται από τον τύπο:

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

Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του σωματιδίου και της διεύθυνσης της δέσμης. Το ενδιαφέρον της ωκύτητας βρίσκεται στο γεγονός ότι διαφορές ωκύτητας  $\Delta \gamma$  (ή ψευδο-ωκύτητας  $\Delta \eta$  στο σχετικιστικό όριο) είναι αναλλοίωτες κάτω από μετασχηματισμούς Lorentz στη διεύθυνση του πολικού άξονα ( $\theta = 0$  ή  $\pi$ ), ο οποίος συνήθως επιλέγεται να είναι ο άξονας των συγκρουόμενων δεσμών.

---

<sup>21</sup>Το σύστημα ηρεμίας είναι το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο το σωματίδιο είναι ακίνητο. Όταν λέμε ότι διανύει κάποια απόσταση στο σύστημα ηρεμίας εννοούμε την απόσταση που διανύει το φως στο χρόνο (ημι)ζωής του σωματιδίου.

## 4.2 Περιγραφή μεθόδου επεξεργασίας των δεδομένων

Ο κεντρικός σκοπός αυτής της εργασίας είναι να υπολογιστεί μια ποσότητα η οποία θα μας δίνει κάποια ιδέα για το που κυμαίνεται η απόδοση του CMS στο να ανιχνεύει σωματίδια μεγάλου χρόνου ζωής. Αυτήν την ποσότητα την ονομάζουμε Figure of Merit (FOM). Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφουμε την μέθοδο με την οποία υπολογίζουμε το FOM.

Αρχικά χρειάζεται να αναφέρουμε ότι οι τροχιές που εξετάζουμε σε αυτήν την εργασία ανακατασκευάζονται στον μιονικό σκανδαλιστή, αλλά δεν ανήκουν σε μίονια. Ανήκουν σε φορτισμένα σωματίδια που παράγονται από την αδρανοποίηση των  $b$  κουάρκ στα οποία διασπώνται τα LLPs. Αυτό σημαίνει ότι οι τροχιές αυτές δεν ανήκουν ούτε στα LLPs αυτά κάθε αυτά, αλλά η ύπαρξη τους επάγεται την ύπαρξη των LLPs που αναζητάμε.

Περαιτέρω, για τον υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε τις ποσότητες των Segments και  $ItBmtfln$  Triggers, οι οποίες ανακατασκευάζονται και αποθηκεύονται στα δεδομένα του πειράματος και της προσομοίωσης.

• **Segments:** Τα Segments είναι η ένωση δυο hits για την δημιουργία ενός ευθύγραμμου τμήματος της τροχιάς του LLP.

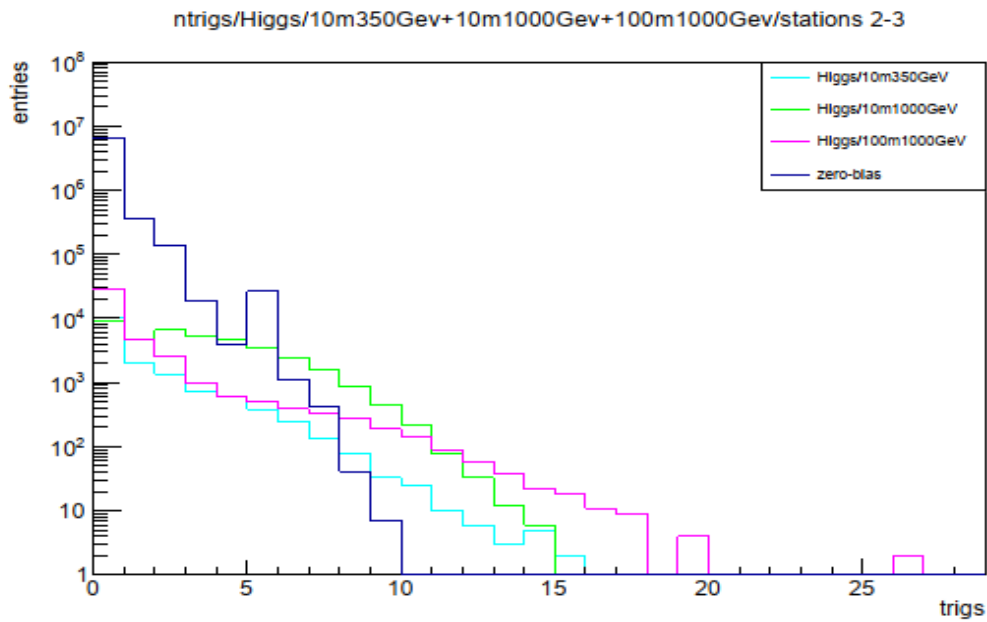
•  **$ItBmtfln$  Triggers:** Είναι trigger primitives, που σημαίνει ότι είναι τα στοιχεία που στέλνει ο ανιχνευτής στον Level-1 trigger και από αυτά ο αλγόριθμος ανακατασκευής τροχιών χτίζει την τροχιά του ανιχνευόμενου σωματιδίου και αποφασίζει αν είναι κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία.

Αυτό που κάνουμε αρχικά είναι να συγκρίνουμε την κατανομή αυτών των ποσοτήτων με την κατανομή του θορύβου που παίρνουμε από τα zero-bias data και να επιλέξουμε ένα κατώφλι (threshold) για το οποίο πιστεύουμε ότι το σήμα που δίνουν αυτές οι ποσότητες στο ανιχνευτή είναι αρκετά μεγαλύτερο από το σήμα του θορύβου, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι ανιχνεύουμε ένα LLP. Το πόσο καλό μπορεί να είναι το σήμα που λαμβάνουμε για τα LLP ποσοτικοποιείται από το rate. Το rate ουσιαστικά είναι ο ρυθμός με τον οποίο τα γεγονότα του θορύβου βάρανε τον trigger.

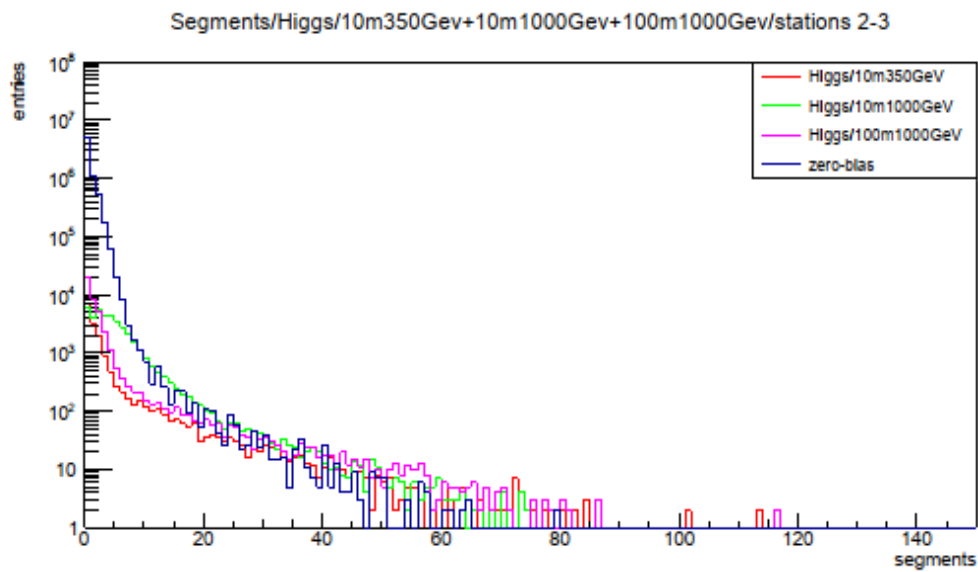
Πιο συγκεκριμένα, σε αυτήν την εργασία ορίζουμε ως rate το κλάσμα των γεγονότων που περνάνε το κατώφλι που έχουμε ορίσει ως προς όλα τα γεγονότα του θορύβου στους μιονικούς σταθμούς<sup>22</sup> 2 και 3 πολλαπλασιασμένο με έναν παράγοντα 30 MHz, ενώ αναζητάμε κατώφλι που να μας δίνει rate κάτω από 1 kHz. Μετά την επιλογή των κατωφλίων και την εύρεση των rate, χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο για τον υπολογισμό του FOM.

Πριν όμως εξετάσουμε τον αλγόριθμο για τον υπολογισμό του FOM, παρουσιάζουμε στο σχήμα 4.1 και στο σχήμα 4.2 τα συγκριτικά διαγράμματα, για τα σωματίδια Higgs που μελετάμε, του θορύβου με το σήμα των  $ItBmtfln$  triggers και των segments, αντίστοιχα.

<sup>22</sup>Κάθε μιονικός θάλαμος χωρίζεται σε τέσσερα μέρη που τα ονομάζουμε σταθμούς.



**Σχήμα 4.1:** Συγκριτικό διάγραμμα θορύβου με το σήμα των Higgs για τα ItBmtfIn Triggers



**Σχήμα 4.2:** Συγκριτικό διάγραμμα θορύβου με το σήμα των Higgs για τα Segments

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι για τα Triggers τα καλά κατώφλια μπορεί να αρχίζουν γύρω στην τιμή δέκα και για τα Segments γύρω στην τιμή εξήντα, καθώς εκεί βλέπουμε να έχουμε αρκετά παραπάνω σήμα των Triggers και των Segments από τον θόρυβο. Παρ'όλα αυτά το rate σε εκείνα τα σημεία έβγαине αρκετά μεγάλο.

Στους πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζουμε τα κατώφλια για τα Triggers και τα Segments που χρησιμοποιήσαμε σε αυτήν την εργασία, καθώς και τα αντίστοιχα rate.

Κατώφλι για Triggers	rate για Triggers (kHz)
12	1,21
13	1,067
14	0,89
15	0,78
16	0,67

**Πίνακας 4.1:** Αντιστοιχία κατωφλίου με rate για τα Triggers.

Κατώφλι για Segments	rate για Segments (kHz)
80	1,11
83	1
85	0,935
87	0,86
90	0,755

**Πίνακας 4.2:** Αντιστοιχία κατωφλίου με rate για τα Segments.

Τώρα που έχουμε ορίσει και παρουσιάσει τα διάφορα κατώφλια και rate, είμαστε έτοιμοι να παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο υπολογισμού του FOM. Το FOM ουσιαστικά είναι ένα κλάσμα, για τον υπολογισμό του οποίου, χρησιμοποιήσαμε έναν σχετικά απλό αλγόριθμο.

1) Εξετάζουμε αν μέσα στα γεγονότα που μελετάμε υπάρχει κάποιο LLP το οποίο παράγεται από την διάσπαση των σωματιδίων Higgs που αναφέραμε στο παραπάνω κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα ψάχνουμε τα σωματίδια S που περιγράψαμε στη παράγραφο 2.5.

2) Αν ανιχνεύσουμε κάποιο LLP κοιτάμε αν βρίσκεται μέσα στο βαρέλι. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε αν η τιμή της ψευδο-ωκύτητας ( $\eta$ ) βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές -0,8 και 0,8, που αντιστοιχούν στα όρια του βαρελιού.

3) Αν το LLP βρίσκεται μέσα στο βαρέλι, υπολογίζουμε ένα βάρος για το συγκεκριμένο LLP, το οποίο έχει να κάνει με την πιθανότητα να διασπαστεί στους σταθμούς 2 ή 3 του μιονικού θαλάμου (θα αναφέρουμε παρακάτω πώς υπολογίζουμε αυτό το βάρος).

4) Προσθέτουμε το βάρος που υπολογίσαμε στον παρονομαστή.

5) Για το γεγονός το οποίο έχουμε βρει LLP, κοιτάμε αν ο αριθμός των segments ή Trigs που έχει στους σταθμούς 2 και 3 του μιονικού θαλάμου, ξεπερνάει το threshold το οποίο έχουμε επιλέξει.

6) Αν ξεπεράσουμε το threshold στο βήμα 5. Τότε προσθέτουμε μια μονάδα στο αριθμητή

Ο αριθμός ο οποίος υπολογίζεται μέσω αυτού του κλάσματος ονομάζεται FOM.

Τέλος αναφέρουμε ότι, για να είναι πιο κοντά το FOM στην πραγματική απόδοση θα έπρεπε να είχαμε στα δεδομένα, από τις προσομοιώσεις Monte Carlo, την απόσταση στην οποία έγινε η διάσπαση του LLP μέσα στον ανιχνευτή, την οποία δυστυχώς δεν την είχαμε. Για αυτό υπολογίσαμε αυτό το βάρος το οποίο είναι η πιθανότητα να διασπαστεί το σωματίδιο, στην απόσταση που βρίσκονται οι μιονικοί σταθμοί στους οποίους μελετάμε το φαινόμενο. Η πιθανότητα να διασπαστεί το LLP δίνεται από το γνωστό εκθετικό νόμο

$$f(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \text{ όπου } \tau \text{ ο μέσος χρόνος ζωής του LLP}$$

Αυτός ο νόμος μας δίνει μια χρονική κατανομή για την διάσπαση του LLP, όμως εμείς χρειαζόμαστε μια κατανομή αποστάσεων για να υπολογίσουμε το βάρος. Για να μετατρέψουμε την χρονική κατανομή σε κατανομή αποστάσεων θα χρησιμοποιήσουμε

1) Τις κινηματικές σχέσεις τις ορμής του LLP:  $\mathbf{p} = \mathbf{p}_T \cosh \eta$ , όπου  $\mathbf{p}_T$  η εγκάρσια ορμή του LLP και  $\eta$  η ψευδο-ωκύτητα του

2) Την σχέση της σχετικής του ταχύτητας με την ταχύτητα του φωτός  $\beta = \frac{p}{E}$

3) Τον παράγοντα διαστολής του χρόνου  $\gamma = \frac{E}{m}$ , όπου  $E$  ενέργεια και  $m$  η μάζα του LLP

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω έχουμε ότι το μήκος που διανύει το σωματίδιο σε χρόνο  $t$  είναι

$l = \beta \gamma t = \frac{p t}{m} \rightarrow t = \frac{m l}{p} = \frac{m l}{p(T) \cosh \eta} = \frac{m l(T)}{p(T)}$  όπου  $l(T) \equiv l_T = l \cosh \eta$  η απόσταση που διανύει το LLP στο εγκάρσιο επίπεδο και  $\mathbf{p}(T) \equiv \mathbf{p}_T$ .

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στον εκθετικό νόμο για το χρόνο παίρνουμε ότι

$$f(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{m l(T)}{\tau p(T)}\right) \rightarrow \frac{1}{c} f(t) = \frac{1}{c \tau} \exp\left(-\frac{m c l(T)}{c \tau p(T)}\right) = \frac{e^{-l t / l_0}}{c \tau}$$

όπου  $l_0 \equiv \frac{c \tau p(T)}{m c}$

θέτουμε λοιπόν  $f(l_t) = (1/c) f(t) = \frac{e^{-l t / l_0}}{c \tau} = \frac{e^{-l t / l_0}}{\langle l \rangle}$ ,  $\langle l \rangle \equiv c \tau$

Το βάρος  $w(p_t)$  δίνεται από το ολοκλήρωμα αυτής της ποσότητας μεταξύ των αποστάσεων  $l_1=4m, l_2=6m$  όπου βρίσκονται ο δεύτερος και ο τρίτος θάλαμος μιονίων.

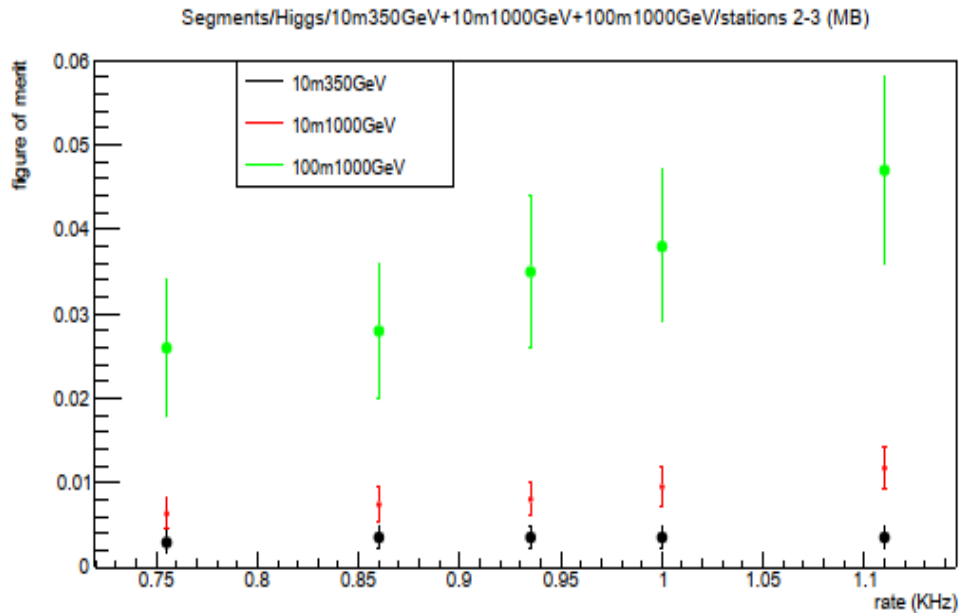
Έτσι  $w(p_t) \equiv \int_4^6 f(l(T)) dl(T) = \frac{e^{-\frac{4}{l_0}} - e^{-\frac{6}{l_0}}}{\langle l \rangle / l_0}$  όπου  $l_0 = \langle l \rangle p_t / m c$ .

Τέλος υπολογίζουμε το σφάλμα του FOM, με το παρακάτω τρόπο. Αρχικά παρατηρούμε ότι η στατιστική αβεβαιότητα του FOM κυριαρχείται από τον αριθμητή, καθώς το δείγμα διασπάσεων που περνάνε το threshold των triggers η segments είναι πολύ μικρότερο από το δείγμα διασπάσεων που συμβαίνουν στους θαλάμους 2 και 3 (δηλαδή μεταξύ των 4 και των 6 μέτρων). Υποθέτοντας λοιπόν ότι ο αριθμός των διασπάσεων που περνάει το κατώφλι ακολουθεί στατιστική Poisson και ότι το σφάλμα εξαρτάται εξολοκλήρου από τον αριθμητή μπορούμε να γράψουμε την στατιστική αβεβαιότητα του FOM ως

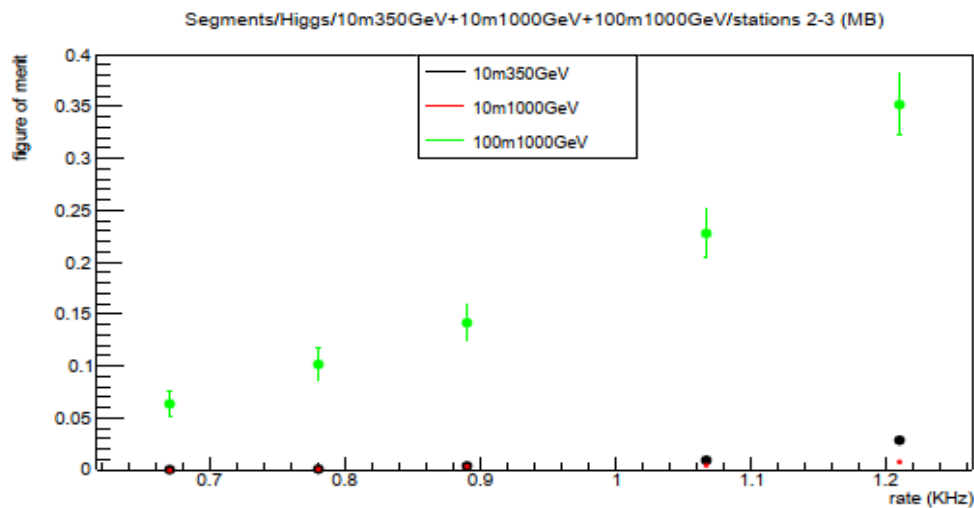
$\delta F = \frac{\delta N}{\Sigma w(p(T))}$  όπου  $\delta N = \sqrt{N}$ , με  $N$  των αριθμό των διασπάσεων που περνάει το κατώφλι και  $\Sigma w(p_t)$  ο παρονομαστής του κλάσματος έτσι όπως τον ορίσαμε παραπάνω.

### 4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Σε αυτό το σημείο είμαστε έτοιμοι να παραθέσουμε τα αποτελέσματά μας. Αρχικά παραθέτουμε συγκριτικά διαγράμματα των FOM σε σχέση με το rate για τα Segments και τα Triggers των σωματιδίων Higgs.



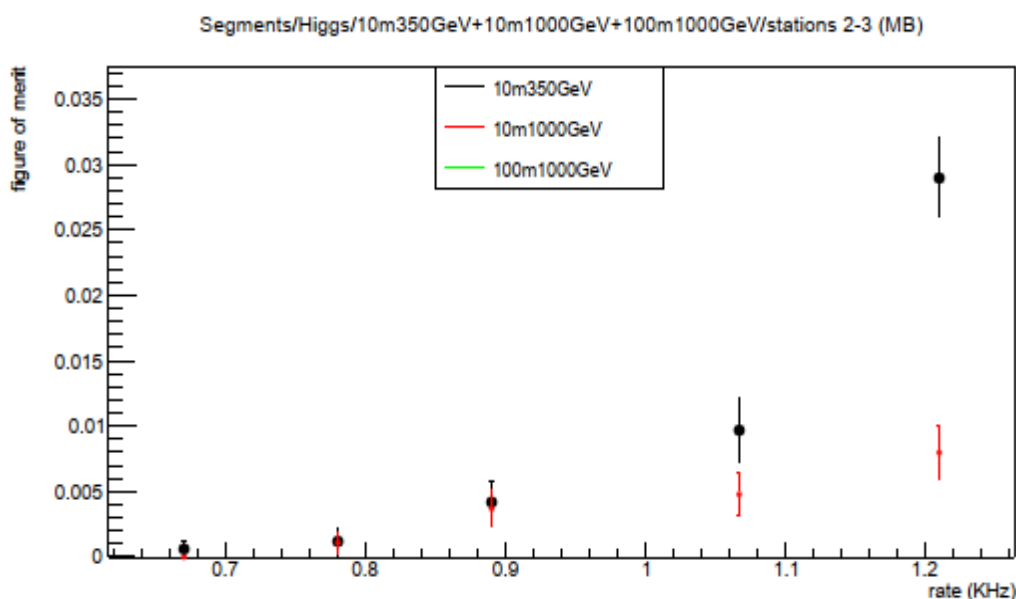
Σχήμα 4.3: Συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Segments



Σχήμα 4.4: Συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Triggers

Επειδή στο συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με τα rate, τα FOM του Higgs το οποίο έχει μάζα 1000GeV και η απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει είναι 100 μέτρα, είναι αρκετά μεγαλύτερο των άλλων δύο, παραθέτουμε παρακάτω και το ίδιο διάγραμμα, αλλά μεγεθυμένο ώστε αν φαίνονται τα υπόλοιπα δύο καλύτερα.





**Σχήμα 4.5:**Μεγεθυμένο συγκριτικό διάγραμμα του FOM σε σχέση με το rate για τα Triggers

Αρχικά παρατηρούμε ότι και στο διάγραμμα για τα Segments αλλά και στο διάγραμμα για τα  $l\bar{t}BmtfIn$  Triggers, το Higgs με μάζα 1000GeV και απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει 100 μέτρα έχει το μεγαλύτερο FOM. Αυτό υποθέτουμε ότι συμβαίνει επειδή το συγκεκριμένο Higgs έχει μεγαλύτερη απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει από τα άλλα δύο και σύμφωνα με τον τύπο της πιθανότητας διάσπασης που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 4.2 το βάρος του. Δηλαδή, η πιθανότητα να διασπαστεί μέσα του μιονικούς σταθμούς 2,3 (ανάμεσα στα 4 και τα 6 μέτρα) είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες πιθανότητες των άλλων δύο. Περαιτέρω, μπορεί να παίζει και έναν μικρό ρόλο η μάζα του σωματιδίου, καθώς μπορεί να δώσει πιο ενεργητικά LLPs που έχουν ακόμη μεγαλύτερη πιθανότητα να διασπαστούν στους σταθμούς 2 ή 3. Παρ' όλα αυτά βλέπουμε πως τον σημαντικότερο ρόλο στο FOM έχει η απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το σωματίδιο

Περαιτέρω, παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα για τα Segments, οι τιμές του FOM για το Higgs με μάζα 1000GeV και απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει 10 μέτρα είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του FOM για το Higgs που έχει μάζα 350GeV και απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει 10 μέτρα. Από την άλλη παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα για τα Triggers συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή οι τιμές του FOM για το Higgs που έχει μάζα 1000GeV και απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει 10 μέτρα είναι μικρότερες από αυτές του Higgs με μάζα 350GeV και απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει 10 μέτρα. Αυτό δεν είναι προφανές καθώς θα περιμέναμε πως αν οι τιμές του FOM ενός Higgs βγουν μεγαλύτερες από τις τιμές του FOM ενός άλλου Higgs για μια μεταβλητή, το ίδιο θα έπρεπε να ισχύει και για τις υπόλοιπες. Υποθέτουμε πως αυτή η περιέργη συμπεριφορά του FOM σε αυτές τις δυο περιπτώσεις, οφείλεται στο γεγονός ότι για τα δύο αυτά Higgs έχουμε πολύ μικρές τιμές για το FOM, μικρότερες του 1%. Αυτό σημαίνει ότι στο κλάσμα του FOM ο αριθμητής για τα δυο αυτά Higgs είναι μικρός, καθώς ο παρονομαστής είναι ίδιος για όλα.

Έτσι εφόσον ο αριθμητής είναι αρκετά μικρός δεν μπορούμε να έχουμε μια καλή στατιστική για αυτά τα δυο Higgs και παρατηρούμε αυτή την απροσδόκητη συμπεριφορά για το FOM.

Ανακεφαλαιώνοντας, από αυτή την εργασία μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν ότι για να έχουμε μια σχετικά καλή απόδοση ανίχνευσης των εξωτικών Higgs με την μέθοδο που προτείνουμε, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν, είναι η δυνατότητα να ταξιδεύουν αρκετά μακριά, πιο συγκεκριμένα γύρω στα 100 μέτρα. Δηλαδή η προτεινόμενη μέθοδος είναι περισσότερο ευαίσθητη σε LLPs με μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Αν τα LLPs έχουν μικρό χρόνο ζωής τότε, αυτή η μέθοδος σπάει καθώς δεν διασπώνται αρκετά σωματίδια στον χώρο που θέλουμε εμείς και δεν μπορούμε να έχουμε μια καλή στατιστική για αυτά.

## Βιβλιογραφία

- [1] W.N. COTIINGHAM και D.A GREENWOOD,Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική
- [2] DONALD H. PERKINS Εισαγωγή στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών
- [3] MORTEN DAM JØRGENSEN,EXOTIC LONG LIVED PARTICLES
- [4] Sidney Coleman and Jeffrey Mandula. All Possible Symmetries of the S Matrix. Physical Review,159(5):1251–1256, July 1967.
- [5] J Wess and B Zumino. Supergauge transformations in four dimensions. Nuclear Physics B, 70(1):39–50, February 1974.
- [6] Rudolf Haag, Jan T Łopuszanski, and Martin Sohnius. All possible generators of supersymmetries of the S-matrix. Nuclear Physics B, 88(2):257–274, 1975.
- [7] Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos,Gia Dvali The hierarchy problem and new dimensions at a milimeter.
- [8] <https://home.cern/science/accelerators>
- [9] <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- [10] <https://home.cern/science/experiments/atlas>
- [11] <https://home.cern/science/experiments/lhcf>
- [12] <https://home.cern/science/experiments/alice>
- [13] <https://cms.cern/detector>
- [14] <https://home.cern/science/experiments/totem>
- [15] <https://home.cern/science/experiments/lhcb>
- [16] <https://home.cern/science/experiments/moedal>
- [17] The CMS trigger system (CMS-TRG-12-001)
- [18] Search for decays of stopped exotic long-lived particles produced in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV (CMS-EXO-16-004)
- [19] C. Foudas, The CMS Level-1 Trigger at LHC and Super LHC
- [20] Biplob Bhattacharjee, Swagata Mukherjee,Rhitaja Sengupta and Prabhat Solankia, Triggering long-lived particles in HL-LHC and the challenges in the first stage of the trigger system
- [21] <https://home.cern/science/physics/higgs-boson>

