

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



**Συντήρηση και Βελτίωση του Κεντρικού
Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου του Ανιχνευτή
Compact Muon Solenoid**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΠΑΠΑΚΡΙΒΟΠΟΥΛΟΥ ΙΩΑΝΝΗ**

Επιβλέπων: Τσιπολίτης Γεώργιος
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Περιεχόμενα

Abstract	7
Περίληψη	9
1 Ο Ανιχνευτής Compact Muon Solenoid	11
1.1 The Large Hadron Collider	11
1.1.1 Το καθιερωμένο πρότυπο	12
1.1.2 Το επιταχυντικό σύστημα του LHC	14
1.1.3 Οι ανιχνευτικές διατάξεις του LHC	17
1.2 Compact Muon Solenoid	17
1.2.1 Ο ανιχνευτής τροχιών	20
1.2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (ECAL)	23
1.2.3 Το Αδρονικό Θερμιδόμετρο (HCAL)	25
1.2.4 Ο μαγνήτης	27
1.2.5 Οι ανιχνευτές μιονίων	27
1.2.6 Σύστημα σκανδαλισμού (Trigger)	30
2 Θερμιδομετρία	31
2.1 Αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με την ύλη	31
2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις	31
2.1.2 Αλληλεπιδράσεις φωτονίων με την ύλη	33
2.1.3 Ηλεκτρομαγνητικός καταγισμός	34
2.1.4 Οι αλληλεπιδράσεις των αδρονίων με την ύλη	35
2.2 Θερμιδόμετρα	37
2.3 Απόκριση του θερμιδόμετρου	38
2.4 Διακριτική ικανότητα των θερμιδομέτρων	40

3	The High Granularity Calorimeter	43
3.1	The High Luminosity LHC era	43
3.2	The detector design	45
3.3	Silicon Detectors	48
3.3.1	Semiconductors	48
3.3.2	The pn junction	50
3.4	Particle Flow Algorithm	51
4	Control Systems	55
4.1	SCADA systems	55
4.2	The supervisory layer	56
4.3	The front end layer	60
4.4	The communication layer	61
4.5	WinCC_OA SCADA Toolkit	62
4.5.1	Main Features	62
4.5.2	Structure	65
4.6	Joint Control Project Framework	68
4.6.1	Hardware and Logical view	68
4.6.2	Finite State Machine	69
4.6.3	Archiving Database	72
4.6.4	Configuration Database	72
4.6.5	Access Control Mechanism	73
5	The HGCal Test Beam Detector Control System	75
5.1	Introduction	75
5.2	System Structure	76
5.2.1	System setup	78
5.3	System operation	79
6	The CMS central DCS	87
6.1	The CMS Detector Control System	87
6.2	The CMS central DCS team	90
6.3	The Configuration Database in CMS	92
6.4	The CMS Installation Tool	95

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Αεροφωτογραφία του CERN	12
1.2	Τα στοιχειώδη σωματίδια του καθιερωμένου προτύπου	13
1.3	Εγκάρσια τομή ενός από τους μαγνήτες του LHC	14
1.4	Το σύμπλεγμα επιταχυντών του LHC	16
1.5	Ο ανιχνευτής Compact Muon Solenoid	19
1.6	Η pseudorapidity για διάφορες τιμές της γωνίας θ	21
1.7	Σχήμα της διάταξης του ανιχνευτή τροχιών του CMS	22
1.8	Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (ECAL) του ανιχνευτή CMS	24
1.9	Σχηματική αναπαράσταση του αδρονικού θερμιδόμετρου του CMS	26
1.10	Το μιονικό σύστημα του CMS	28
2.1	Γραφική παράσταση της απώλειας ενέργειας ενός μιονίου μέσα σε χαλκό	33
2.2	Απλή αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού . .	34
2.3	Σχηματική αναπαράσταση της ανάπτυξης ενός αδρονικού καταιγισμού	36
3.1	Schedule of the LHC operation	44
3.2	Diagram of the expected radiation doses for the CMS endcap during the operation of the HL-LHC.	45
3.3	Schematic representation of the CMS endcaps after the HGCAL upgrade	46
3.4	The layout of the HGCAL sensor modules	47
3.5	Band structure for the three types of materials in nature metals, semiconductors and insulators	48
3.6	A pn junction after equilibrium has been reached	51
3.7	Example of the two different approaches in calorimetry . . .	52
3.8	Example of cluster mismatching in Particle Flow Algorithm .	53

3.9	Particle Flow Algorithm	54
4.1	A schematic representation of a control system	57
4.2	Example of the alarm ranges defined for a data point	58
4.3	A schematic representation of the alert states and transitions of a control system.	59
4.4	A schematic representation of a data point	63
4.5	A schematic representation of a data point type	64
4.6	The structure of a system built with WinCC_OA	66
4.7	Picture of a distributed control system	67
4.8	The JCOP framework Device Editor Navigator (DEN)	69
4.9	A sample FSM diagram created using the JCOP framework component	70
5.1	Pictures of the hardware that will be used during the HGAL test beam	76
5.2	The structure of the HGAL FSM	77
5.3	A list of all the components required for the HGAL DCS to operate correctly.	80
5.4	The main panel of the HGAL DCS	80
5.5	The log in pop up	81
5.6	The main panel of the HGAL DCS enabled	82
5.7	The mainframe panel	83
5.8	Channel options panel	83
5.9	The channel panel	84
5.10	The DCS expert panel	85
6.1	The structure of the CMS control system	89
6.2	The main panel of the CMSfwInstallUtils component	93
6.3	The main panel used to define filters	94
6.4	The main screen of the comparison mechanism	95

Abstract

The Compact Muon Solenoid (CMS) is one of the four experiments that take place at the Large Hadron Collider (LHC) studying the interactions between elementary particles. One of the most important parts of the detector is its control system which is used for controlling it and monitoring its operation. This thesis was conducted under a collaboration between the high energy physics group of the National Technical University of Athens and the central Detector Control System (DCS) team of the CMS experiment. During that time, some of the tools of the central team were improved. On top of that, a control system that will be used in the test beams during the development of the High Granularity Calorimeter (HGCAL) was made.

In the beginning of the document the LHC particle accelerator as well as the CMS experiment are presented. Then after a brief introduction in the basic principles of calorimetry the basic characteristics of the HGCAL detector are given. Furthermore, an introduction to control systems as well as the tools used at CERN to develop them is made. Finally the structure of the control system in CMS is presented as well as the tools that were improved during this thesis

Περίληψη

Το πείραμα Compact Muon Solenoid (CMS) είναι το ένα από τα τέσσερα πειράματα που διεξάγονται στο μεγάλο επιταχυντή αδρονίων (Large Hadron Collider) με σκοπό την μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης. Ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια του πειράματος είναι το σύστημα αυτομάτου ελέγχου το οποίο χρησιμοποιείται για το έλεγχο και την παρακολούθηση της λειτουργίας του πειράματος. Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε κάτω από τη συνεργασία της ομάδας φυσικής υψηλών ενεργειών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και της κεντρικής ομάδας του συστήματος αυτομάτου ελέγχου του πειράματος CMS. Κατά το διάστημα της συνεργασίας αυτής βελτιώθηκαν κάποια από τα εργαλεία που διαθέτει το σύστημα αυτομάτου ελέγχου. Ακόμα αναπτύχθηκε ένα σύστημα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα test beams που θα πραγματοποιηθούν για την ανάπτυξη του ανιχνευτή High Granularity CALorimeter (HGAL).

Στην αρχή της εργασίας αυτής γίνεται μια παρουσίαση τους επιταχυντή σωματιδίων LHC καθώς και του πειράματος CMS. Στη συνέχεια μετά από μια αναφορά στις βασικές αρχές της θερμοδομετρίας παραθέτονται τα βασικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή HGAL. Έπειτα γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στο CERN για την κατασκευή τους και περιγράφεται το σύστημα που κατασκευάστηκε για το HGAL. Τέλος παρουσιάζεται η δομή του συστήματος αυτομάτου ελέγχου του CMS καθώς και τα διάφορα εργαλεία τα οποία βελτιώθηκαν.

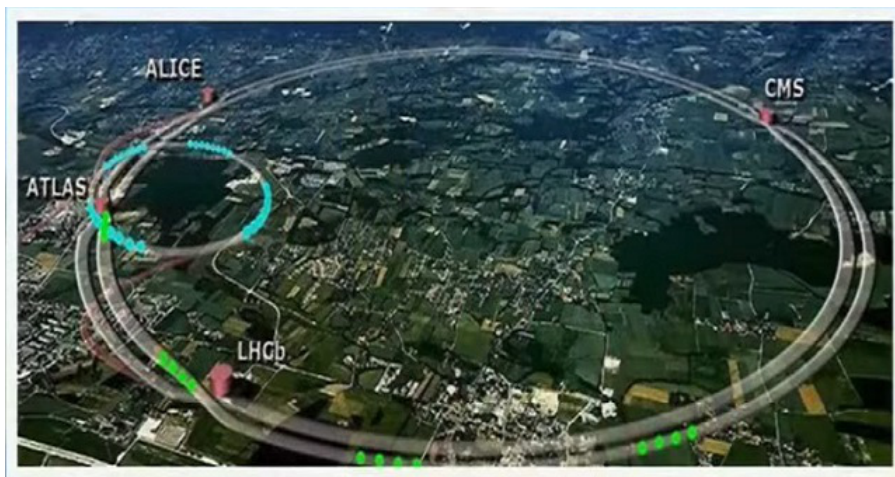
Κεφάλαιο 1

Ο Ανιχνευτής Compact Muon Solenoid

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στον μεγάλο επιταχυντή αδρονίων (Large Hadron Collider, LHC) καθώς και στον ανιχνευτή Compact Muon Solenoid (CMS) για την αναβάθμιση του οποίου κατασκευάζεται το High Granularity CALorimeter (HGCal) για σκοπό του οποίου έγινε η παρούσα εργασία.

1.1 The Large Hadron Collider

Ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων (Large Hadron Collider (LHC)) είναι ο μεγαλύτερος επιταχυντής σωματιδίων που έχει κατασκευαστεί ποτέ. Ο LHC βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του ευρωπαϊκού κέντρου έρευνας στην πυρηνική φυσική (CERN) (Εικόνα 1.1) όπου και τέθηκε σε λειτουργία το δεύτερο εξάμηνο του 2008. Είναι ένας επιταχυντής κυκλικού σχήματος με περίμετρο 27 χιλιόμετρα ο οποίος βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από τη γη στα Γαλλο-Ελβετικά σύνορα μεταξύ της λίμνης της Γενεύης και της οροσειράς Jura. Η λειτουργία του βασίζεται στην επιτάχυνση 2 δεσμών πρωτονίων η μια κατά τη φορά του ρολογιού ενώ η άλλη με αντίθετη φορά. Οι δέσμες αυτές, συγκρούονται σε 4 προκαθορισμένα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί ανιχνευτές σωματιδίων. Ο επιταχυντής αυτός είναι κατασκευασμένος ώστε να επιτυγχάνει συγκρούσεις με ενέργεια ίση με 14 TeV στο σύστημα κέντρου μάζας κάτι που τον κάνει πολύ ισχυρότερο από οποιονδήποτε άλλο επιταχυντή έχει κατασκευαστεί ποτέ. Στόχος της κατασκευής του είναι η μελέτη της δομής



Εικόνα 1.1: Αεροφωτογραφία του ευρωπαϊκού κέντρου έρευνας στην φυσική στοιχειωδών σωματιδίων (CERN). Στη φωτογραφία απεικονίζονται σχηματικά τα τούνελ στα οποία επιταχύνονται οι δέσμες καθώς και τα τέσσερα σημεία στα οποία βρίσκονται οι ανιχνευτές. Όλες οι διατάξεις βρίσκονται 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης.

και της συμπεριφοράς των στοιχειωδών σωματιδίων καθώς και των αλληλεπιδράσεών τους. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιταχυντή αυτού, δίνουν τη δυνατότητα μελέτης της φυσικής στην κλίμακα των 14 TeV.

1.1.1 Το καθιερωμένο πρότυπο

Το πληρέστερο μοντέλο που υπάρχει για την περιγραφή των στοιχειωδών σωματιδίων είναι το καθιερωμένο πρότυπο (Standard Model, SM). Μέχρι στιγμής το SM περιγράφει με πολύ καλή ακρίβεια όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν παρατηρηθεί. Σύμφωνα με το SM τα στοιχειώδη σωματίδια χωρίζονται σε 2 κατηγορίες (Εικόνα 1.2), τα μποζόνια και τα φερμιόνια. Τα φερμιόνια είναι τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται η ύλη και χωρίζονται σε 2 κατηγορίες τα λεπτόνια και τα κουάρκς. Η κατηγορία των λεπτονίων αποτελείται από το ηλεκτρόνιο, το μιονίο και το ταυ. Κάθε ένα από αυτά τα σωματίδια μπορεί να βρεθεί ελεύθερο στη φύση. Επίσης για κάθε ένα από τα σωματίδια αυτά, υπάρχει και ένα αντίστοιχο νετρίνο που τα "συνοδεύει". Τα κουάρκς είναι 6 και δεν μπορούν να βρεθούν ελεύθερα, αλλά σε συνδυασμούς των 2 ή των 3 δημιουργούν άλλα σωματίδια, τα αδρόνια.

Εκτός από την ύπαρξη των στοιχειωδών σωματιδίων, το SM περιγράφει

και τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλεπιδρούν. Στη φύση υπάρχουν 4 στοιχειώδεις δυνάμεις οι οποίες διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων. Η ισχυρή, η ασθενής, η ηλεκτρομαγνητική και η βαρύτητα. Η βαρύτητα ωστόσο είναι πολύ αδύναμη και δεν επηρεάζει τα στοιχειώδη σωματίδια και γι' αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στο καθιερωμένο πρότυπο. Για κάθε μια από αυτές τις δυνάμεις το SM προβλέπει την ύπαρξη σωματιδίων (μποζονίων) μέσω των οποίων εκφράζεται η κάθε δύναμη.

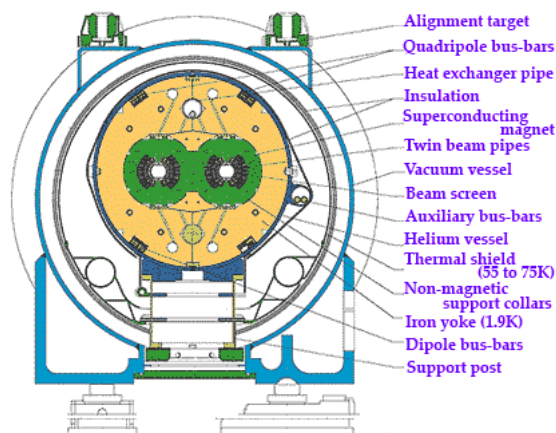
Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	0	0
name	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
Quarks					
mass	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
charge	-1/3	-1/3	-1/3	0	
spin	1/2	1/2	1/2	1	
name	d down	s strange	b bottom	g gluon	
Leptons					
mass	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²
charge	-1	-1	-1	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	0	1
name	e electron	μ muon	τ tau	Z ⁰ Z boson	W [±] W boson

Εικόνα 1.2: Ο πίνακας των στοιχειωδών σωματιδίων σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο. Τα σωματίδια χωρίζονται σε 2 κατηγορίες τα φερμιόνια και τα μποζόνια. Τα φερμιόνια είναι τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται η ύλη και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα λεπτόνια και τα κουάρκς. Τα λεπτόνια μπορούν να βρεθούν ελεύθερα στη φύση ενώ τα κουάρκς όχι. Τα κουάρκς σε συνδυασμό 2 ή 3 σχηματίζουν άλλα σωματίδια, τα αδρόνια.

Επιπρόσθετα, το μοντέλο αυτό προβλέπει την ύπαρξη ενός ακόμα σωματιδίου το οποίο ευθύνεται για την μάζα των υπολοίπων. Το σωματίδιο αυτό είναι το μποζόνιο του Higgs και δεν είχε παρατηρηθεί ποτέ. Ένας από τους στόχους των πειραμάτων που διεξάγονται στο LHC είναι η παρατήρηση του σωματιδίου αυτού. Το καλοκαίρι του 2012 ανακοινώθηκε από τα πειράματα του LHC η παρατήρηση του συγκεκριμένου σωματιδίου και έτσι ο LHC κατάφερε να επιτύχει έναν από τους σημαντικότερους στόχους του.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το SM δεν περιγράφει τη βαρύτητα. Είναι δεδομένο συνεπώς πως σαν μοντέλο είναι ελλιπές καθώς δεν περιλαμβάνει όλες τις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στη φύση. Ένας από τους στόχους του LHC είναι να προσπαθήσει να παρατηρήσει φυσικές διεργασίες που δεν περιγράφονται από το καθιερωμένο πρότυπο. Να ψάξει δηλαδή για ενδείξεις για καινούργια φυσική ή αλλιώς για φυσική πέρα από το καθιερω-



Εικόνα 1.3: Εγκάρσια τομή ενός από τους μαγνήτες του LHC. Στο εσωτερικό φαίνονται οι θάλαμοι κενού καθώς και οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται για την καμπύλωση αλλά και την εστίαση της δέσμης.

μένο πρότυπο (Beyond the Standard Model, BSM). Μια από τις πιο υποσχόμενες θεωρίες η ύπαρξη της οποίας θα προσπαθήσει να ελεγχθεί από τον LHC είναι αυτή της υπερσυμμετρίας (Supersymmetry).

1.1.2 Το επιταχυντικό σύστημα του LHC

Το LHC, όπως ειπώθηκε, βρίσκεται 100 μέτρα κάτω από τη γη. Κατασκευάστηκε στο τούνελ που χρησιμοποιούταν για τον επιταχυντή LEP (Large Electron Positron collider) το οποίο πραγματοποιούταν στο CERN. Αποτελείται από ένα σύνολο υπεραγωγίων μαγνητών που χρησιμοποιούνται για την καμπύλωση της δέσμης, αλλά και για την εστίαση της στα σημεία όπου πραγματοποιούνται οι συγκρούσεις. Χρησιμοποιούνται περίπου 1200 μαγνήτες για την καμπύλωση και περίπου 400 για την εστίαση της. Οι μαγνήτες διατηρούνται σε θερμοκρασία περίπου 1.9 K κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του επιταχυντή και για την ψύξη τους χρησιμοποιείται υγρό ήλιο. Στο εσωτερικό καθενός από τους μαγνήτες, βρίσκονται 2 θάλαμοι κενού μέσα στους οποίους κινείται η δέσμη (Εικόνα 1.3).

Για την επιτάχυνση της δέσμης, το CERN διαθέτει ένα ολόκληρο σύστημα από επιταχυντές. Η δέσμη περνάει διαδοχικά καθένα από τους επιταχυντές πριν εισέλθει στον LHC για το τελικό στάδιο της επιτάχυνσης και τη σύγκρουση των δύο δεσμών (Εικόνα 1.4). Τα πρωτόνια προέρχονται από μια φιάλη με αέριο υδρογόνο το οποίο εισέρχεται σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο όπου

αφαιρούνται τα ηλεκτρόνια από τους πυρήνες και έτσι προκύπτουν πρωτόνια. Αφού τα πρωτόνια παραχθούν, στη συνέχεια εισέρχονται στον πρώτο επιταχυντή τον LINAC 2 ο οποίος είναι ένας γραμμικός επιταχυντής και επιταχύνει τα πρωτόνια σε ενέργεια 50 MeV. Στη συνέχεια η δέσμη εισέρχεται στον Proton Synchrotron Booster (PSB) και έπειτα στο Proton Synchrotron που τα πρωτόνια επιταχύνονται σε ενέργεια 26 GeV. Το επόμενο στάδιο επιτάχυνσης, περιλαμβάνει το Super Proton Synchrotron (SPS) που επιτυγχάνεται ενέργεια 450 GeV και τέλος η δέσμη, εισέρχεται στον LHC για το τελικό στάδιο επιτάχυνσης. Η δέσμη του LHC αποτελείται από πακέτα πρωτονίων (bunches) κάθε ένα από τα οποία περιέχει 1.15×10^{11} πρωτόνια.

Οι 2 κύριες παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η λειτουργία του LHC είναι η ενέργειες των 2 δεσμών και η φωτεινότητα τους (luminosity). Ο ρυθμός των γεγονότων (συγκρούσεων) που προκύπτουν από την λειτουργία του επιταχυντή, προέρχεται από τη σχέση:

$$R = \sigma \mathcal{L} \quad (1.1)$$

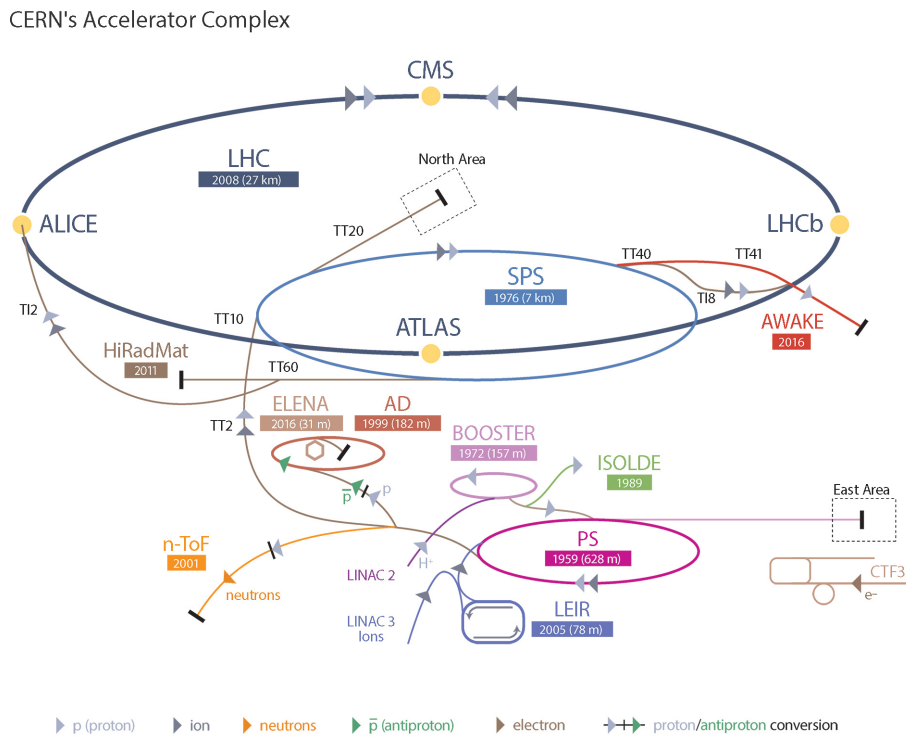
Όπου σ είναι η ενεργός διατομή της φυσικής διεργασίας και \mathcal{L} η φωτεινότητα. Για να διατηρηθεί η αποδοτικότητα του πειράματος για μια δεδομένη ενέργεια E , η φωτεινότητα του ανιχνευτή πρέπει να αυξάνεται ανάλογα με το E^2 , καθώς η ενεργός διατομή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας αυτής ($\sigma \propto 1/E^2$). Η φωτεινότητα ενός επιταχυντή ο οποίος συγκρούει 2 πακέτα με αριθμό σωματιδίων n_1, n_2 με συχνότητα f , δίνεται από τη σχέση:

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (1.2)$$

Όπου σ_x, σ_y τα εγκάρσια προφίλ της δέσμης. Η προβλεπόμενη φωτεινότητα του LHC είναι $\mathcal{L} = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως εκτός από συγκρούσεις πρωτονίων, στα πλαίσια των πειραμάτων θα γίνονται και συγκρούσεις ιόντων μολύβδου, με φωτεινότητα $\mathcal{L} = 10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ και ενέργεια 1312 GeV στο σύστημα κέντρου μάζας.

Για να επιτευχθεί τόση μεγάλη φωτεινότητα, θα πρέπει η συχνότητα συγκρούσεων καθώς και ο αριθμός πρωτονίων σε κάθε πακέτο να είναι πολύ μεγάλος. Για το λόγο αυτό κάθε δέσμη πρωτονίων αποτελείται από 2808 πακέτα πολύ κοντά μεταξύ τους. Κάθε πακέτο περιέχει περίπου 10^{11} και τα οποία συγκρούονται περίπου κάθε 25 ns. Αυτό δίνει συχνότητα συγκρούσεων ίση με 40 MHz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ COMPACT MUON SOLENOID



Εικόνα 1.4: Το σύμπλεγμα επιταχυντών του LHC. Οι δέσμες πρωτονίων εισέρχονται αρχικά στον γραμμικό επιταχυντή LINAC 2, στη συνέχεια περνούν διαδοχικά από τους επιταχυντές Proton Synchrotron Booster (BSB), Proton Synchrotron και Super Proton Synchrotron (SPS), πριν καταλήξουν στον LHC για το τελικό στάδιο επιτάχυνσης. Εκτός από τον LHC, με δέσμη από τα προηγούμενα στάδια επιτάχυνσης τροφοδοτούνται μικρότερα πειράματα στο CERN όπως το n-TOF, ISOLDE, ELEN κ.α.

1.1.3 Οι ανιχνευτικές διατάξεις του LHC

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, οι 2 επιταχυνόμενες δέσμες συγκρούονται μεταξύ τους με σκοπό την παρατήρηση φυσικών διεργασιών. Οι συγκρούσεις αυτές γίνονται σε 4 προκαθορισμένα σημεία πάνω στο δακτύλιο του επιταχυντή στα οποία είναι τοποθετημένοι ανιχνευτές (Εικόνα 1.4). Συνολικά ο δακτύλιος του LHC έχει 8 σημεία πρόσβασης στα 4 από τα οποία είναι τοποθετημένοι ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι οι εξής:

- **A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)**, Point 1.
- **Compact Muon Solenoid (CMS)**, Point 5.
- **LHC beauty (LHCb)**, Point 2.
- **A Large Ion Collider Experiment (ALICE)**, Point 8.

Οι 2 πρώτοι ανιχνευτές ATLAS και CMS, είναι πειράματα γενικού ενδιαφέροντος στη φυσική υψηλών ενεργειών. Αντίθετα οι ανιχνευτές LHCb και ALICE είναι κατασκευασμένοι για τη μελέτη συγκεκριμένων φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα το LHCb έχει σαν σκοπό την παρατήρηση του b (beauty) κουάρκ καθώς και τη μέτρηση της παραβίασης της συμμετρίας CP (CP-violation). Το πείραμα ALICE είναι σχεδιασμένο για να μελετήσει τις συγκρούσεις βαρέων ιόντων αλλά και βαρέων ιόντων - πρωτονίων οι οποίες θα πραγματοποιούνται εκτός από αυτές των πρωτονίων. Εκτός από τα 4 αυτά πειράματα υπάρχουν και άλλα μικρότερα, όπως το TOTEM και το CASTOR τα οποία μοιράζονται το σημείου σύγκρουσης με τον ανιχνευτή CMS. Τέλος, στην Εικόνα 1.4 μπορεί κανείς να δει άλλα μικρότερα πείραμα τα οποία τροφοδοτούνται με δέσμες από κάποιον από τους μικρότερους επιταχυντές του συμπλέγματος επιταχυντών. Ορισμένα από αυτά τα πειράματα είναι το ISOLDE (**I**sotope **S**eparator **O**n **L**ine **D**Evice), το nTOF (**n**eutron **T**ime **O**f **F**light) το ELENA (**E**xtra **L**ow **E**Nergy **A**ntiproton) και άλλα.

1.2 Compact Muon Solenoid

Ο ανιχνευτής CMS, είναι ένα πείραμα γενικού ενδιαφέροντος. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ακολουθώντας τις γενικές προδιαγραφές για έναν ανιχνευτή σωματιδίων. Είναι κυλινδρικού σχήματος με διάφορα επίπεδα ομοαξονικά στο άξονα της δέσμης σαν ένα "βαρέλι" (barrel). Για να μπορέσει να ανιχνεύσει όλα τα σωματίδια που παράγονται κατά

τις συγκρούσεις θα πρέπει να είναι ερμητικά κλειστός και για το λόγο αυτό στα δύο άκρα του υπάρχουν δύο δίσκοι κάθετοι στο άξονα της δέσμης οι οποίοι κλείνουν τον ανιχνευτή (endcaps). Ο ανιχνευτής, έχει μήκος 28.7 m και ακτίνα 15 m ενώ ζυγίζει περίπου 14.000 τόνους και είναι αρκετά μικρός για το βάρος του και την ποσότητα υλικού που περιέχει. Από εκεί προέρχεται η λέξη compact στο όνομα του.

Ένα από τα σωματίδια με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την ανίχνευση τους είναι τα μίονια. Αυτό συμβαίνει διότι η ανίχνευση τους είναι μια αρκετά ξεκάθαρη ένδειξη για την πραγματοποίηση διεργασιών οι οποίες είναι υψίστης σημασίας για την λειτουργία του πειράματος. Για το λόγο αυτό το CMS είναι κατασκευασμένο ώστε να ανιχνεύει με μεγάλη ακρίβεια μίονια και από εκεί προκύπτει η λέξη muon στο όνομα του ανιχνευτή. Τέλος πολύ σημαντικό μέρος του όλου ανιχνευτή, είναι ο μαγνήτης ο οποίος θα επιτρέψει την ακριβή μέτρηση της ορμής των σωματιδίων που παράγονται. Στο CMS επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση ενός σωληνοειδούς, εξού και το solenoid, ο οποίος θα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο ύψους 4 T παράλληλα στον άξονα της δέσμης και συνεπώς θα καμπυλώνει τις τροχιές των σωματιδίων, κάθετα στον άξονα αυτής.

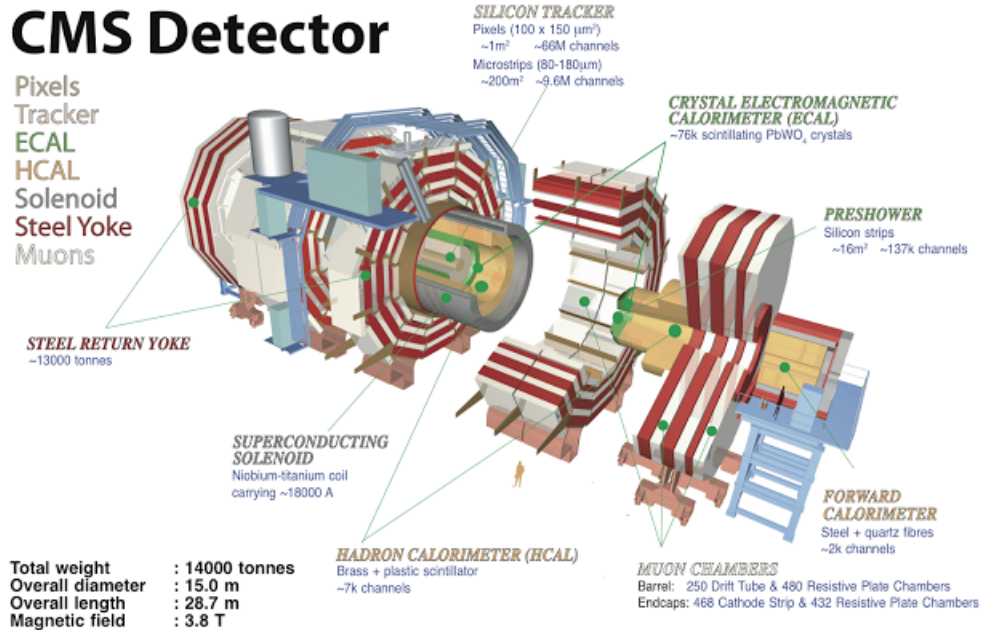
Μπορεί να αποδειχθεί πως η δυνατότητα ανακατασκευής της ορμής ενός μιονίου από έναν ανιχνευτή, εξαρτάται από την ισχύ του μαγνητικού αλλά και το μήκος αυτού, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \sigma_s \frac{8p_T}{0.3BL^2} \quad (1.3)$$

Όπου p_T η εγκάρσια συνιστώσα της ορμής του σωματιδίου, s η καμπύλωση της τροχιάς του από το μαγνητικό πεδίο του ανιχνευτή, B η ένταση του μαγνητικού πεδίου και L το μήκος του ανιχνευτή. Η λογική κατασκευής του CMS είναι τέτοια ώστε να έχει μεγάλο μαγνητικό πεδίο και μικρό μέγεθος, σε αντίθεση με το ATLAS που επέλεξε να έχει ένα όχι τόσο δυνατό μαγνητικό πεδίο και μεγαλύτερο μέγεθος.

Για να μπορέσει το CMS να επιτύχει τους στόχους του, θα πρέπει να διαθέτει:

- Ένα υψηλής ποιότητας σύστημα ανίχνευσης τροχιών, το οποίο θα δίνει επίσης και πληροφορία για την ορμή των σωματιδίων.
- Ένα ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, υψηλής ανάλυσης για την ανίχνευση φωτονίων και ηλεκτρονίων.



Εικόνα 1.5: Ο ανιχνευτής Compact Muon Solenoid. Ο ανιχνευτής αποτελείται από 4 επιμέρους υποανιχνευτές, τον Tracker, το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, το αδρονικό θερμιδόμετρο και τους ανιχνευτές μιονίων. Για τη λειτουργία του ανιχνευτή χρησιμοποιείται επίσης ένας σωληνοειδής μαγνήτης ο οποίος παράγει ένα μαγνητικό πεδίου έντασης 4 T.

- Ένα αδρονικό θερμιδόμετρο ικανό να ανιχνεύσει όλα τα ουδέτερα αλλά και τα φορτισμένα αδρόνια που δημιουργούνται από τις συγκρούσεις στο κέντρο του ανιχνευτή.
- Ένα υψηλής απόδοσης μιονικό σύστημα, ικανό να ανιχνεύσει τα μιονία αλλά και να μετρήσει τα χαρακτηριστικά τους, όπως ορμή κ.α.

Για να επιτύχει αυτές τις προδιαγραφές, το CMS σχεδιάστηκε σε διάφορα επίπεδα καθένα από τα οποία έχει ένα ξεχωριστό ρόλο. Κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα είναι ένας υποανιχνευτής (subdetector) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συλλογή ενός συγκεκριμένου κομματιού πληροφορίας. Όλα τα κομμάτια αυτά συλλέγονται και ο συνδυασμός τους δίνει τη δυνατότητα ταυτοποίησης των σωματιδίων που δημιουργήθηκαν κατά τη σύγκρουση των

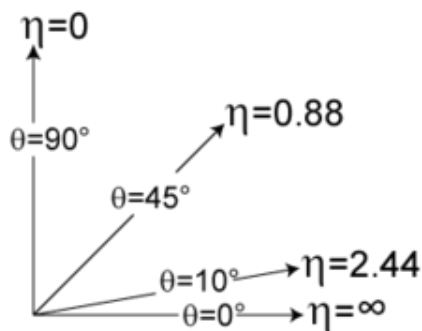
πρωτονίων. Το CMS αποτελείται από 4 υποανιχνευτές, τον Tracker ο οποίος είναι ανιχνευτής τροχιάς, το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (Electromagnetic Calorimeter, ECAL), το αδρονικό θερμιδόμετρο (Hadronic Calorimeter, HCAL) και τους ανιχνευτές μιονίων (Muon Detectors). Εκτός από τους ανιχνευτές αυτούς, το CMS διαθέτει και ένα σωληνοειδές, το οποίο παράγει ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Το σωληνοειδές, δεν είναι ανιχνευτής αλλά είναι απαραίτητο για τη σωστή λειτουργία των υπολοίπων ανιχνευτών.

Η διάταξη που ακολουθείται στο CMS είναι πως τα 3 ανιχνευτικά συστήματα Tracker, ECAL και HCAL βρίσκονται στο εσωτερικό του μαγνήτη ενώ το μιονικό σύστημα βρίσκεται έξω από τον μαγνήτη. Κάθε ένα από τα συστήματα αυτά, διαθέτει ένα κομμάτι του στο κύριο μέρος του ανιχνευτή, στο barrel δηλαδή, αλλά και ένα στα καπάκια αυτού.

Στις επόμενες ενότητες, θα γίνει ξεχωριστή αναφορά και περιγραφή του καθενός από τα ανιχνευτικά συστήματα του CMS. Πριν από αυτό όμως είναι σημαντικό να γίνει μια αναφορά στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στα πειράματα του LHC. Για την περιγραφή του ανιχνευτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με το οποίο ο άξονας x δείχνει προς το κέντρο του δακτυλίου του LHC, ο άξονας y να δείχνει προς τα πάνω κάθετα στο άξονα της δέσμης, ενώ άξονας z είναι παράλληλος προς τον άξονα της δέσμης. Ωστόσο επειδή το σχήμα του ανιχνευτή είναι κυλινδρικό, η περιγραφή του γίνεται πιο εύκολη αν χρησιμοποιηθεί ένα άλλο σύστημα αναφοράς το οποίο χαρακτηρίζεται από την τριπλέτα (r, ϕ, η) . Όπου r είναι η απόσταση από τον άξονα z , ϕ είναι η αζιμουθιακή γωνία από τον άξονα x και η είναι μια ποσότητα που ονομάζεται pseudo-rapidity και δίνεται από τη σχέση $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$. Όπου θ είναι η γωνία από τον θετικό ημιάξονα z . Στην εικόνα 1.6 φαίνεται η psueudo-rapidity για διάφορες τιμές της γωνίας θ .

1.2.1 Ο ανιχνευτής τροχιών

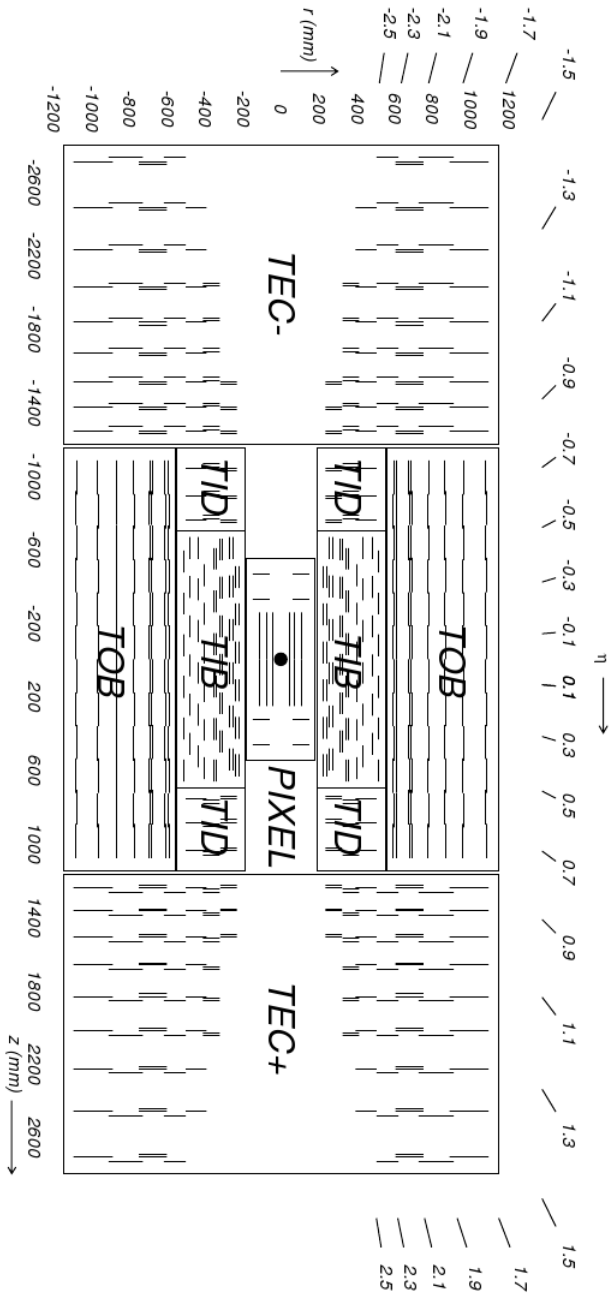
Ο ανιχνευτής τροχιών του CMS είναι το πρώτο ανιχνευτικό σύστημα που διαθέτει το πείραμα και βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο αλληλεπίδρασης των 2 δεσμών. Ο ρόλος του είναι η ανακατασκευή της τροχιάς καθώς και η μέτρηση της ορμής των παραγόμενων σωματιδίων. Μπορεί να μετρήσει με μεγάλη ακρίβεια την ορμή μιονίων, ηλεκτρονίων αλλά και φορτισμένων αδρονίων. Έχει επίσης τη δυνατότητα ανακατασκευής των κορυφών (vertices) στις οποίες γίνεται η παραγωγή δευτερευόντων σωματιδίων. Ο ανιχνευτής αυτός,



Εικόνα 1.6: Η pseudorapidity ($\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$) ως συνάρτηση της γωνίας θ . Η γωνία θ είναι η γωνία από τον θετικό ημιάξονα z . Ως άξονας z έχει οριστεί ο άξονας της δέσμης του LHC.

έχει μήκος 5.4 m και καλύπτει μια περιοχή $r < 1.2\text{m}$ και $|\eta| < 2.5$.

Λόγω της μεγάλης φωτεινότητας του επιταχυντή και της θέσης του, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής θα πρέπει να διαθέτει πολύ καλή διακριτική ικανότητα αλλά και μεγάλη αντοχή στην ακτινοβολία. Επίσης θα πρέπει να έχει πολύ καλό χρόνο απόκρισης για να καταγράφει όσο το δυνατόν περισσότερα γεγονότα. Το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή του είναι το πυρίτιο. Για τους ανιχνευτές τροχιών, είναι πολύ σημαντικό να είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχουν τη μικρότερη δυνατή ποσότητα υλικού. Ο λόγος είναι πως τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με το υλικό του ανιχνευτή και χάνουν ενέργεια. Αν ο ανιχνευτής περιέχει μεγάλη ποσότητα υλικού, είναι πιθανό τα σωματίδια να εναποθέσουν όλη τους την ενέργεια στον ανιχνευτή, να σταματήσουν σ' αυτόν και να μην προχωρήσουν στα υπόλοιπα ανιχνευτικά συστήματα χάνοντας έτσι πολύτιμη πληροφορία για την ανίχνευση τους. Για το λόγο αυτό για την υλοποίηση του ανιχνευτή τροχιών χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές τεχνολογίες. Το πρώτο στάδιο του είναι ένας ανιχνευτής pixel και διάφορα στρώματα με ανιχνευτές από strips πυριτίου στο εξωτερικό του pixel detector. Χωρικά ο ανιχνευτής χωρίζεται στα εξής τμήματα, pixel detector, στους ανιχνευτές στο εσωτερικό του κυλίνδρου (Tracker Inner Barrel, TIB), σε αυτούς που βρίσκονται στο εξωτερικό στρώμα του tracker (Tracker Outer Barrel TOB), στους εσωτερικούς δίσκους (Tracker Inner Disks, TID) και στους ανιχνευτές που βρίσκονται στα endcaps (Tracker Endcaps). Στην εικόνα 1.7 φαίνονται τα διάφορα τμήματα του ανιχνευτή τροχιών καθώς και η περιοχή που αυτός καλύπτει.



Εικόνα 1.7: Σχήμα της διάταξης του ανιχνευτής τροχιών του CMS. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές τεχνολογίες ανιχνευτών. Το πρώτο στάδιο στο εσωτερικό του ανιχνευτή, είναι ένας ανιχνευτής από pixel πυριτίου. Στο εξωτερικό αυτού υπάρχουν διάφορα στρώματα από ανιχνευτές με strips πυριτίου. Τα στρώματα αυτά είναι τα: Tracker Inner Barrel (TIB), Tracker Outer Barrel (TOB), Tracker Inner Disks (TID) και Tracker Endcaps (TEC). Στην εικόνα φαίνεται επίσης η χωρική κάλυψη του ανιχνευτή τροχιών.

1.2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (ECAL)

Το δεύτερο σύστημα ανιχνευτών του CMS είναι το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (Εικόνα 1.8). Σκοπός του είναι η μέτρηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων και των φωτονίων που παράγονται από τις συγκρούσεις. Το ECAL σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να μετρήσει με μεγάλη ακρίβεια τις ενέργειες των φωτονίων, διότι ένας από τους επικρατέστερους τρόπους διάσπασης του μποζονίου του Higgs είναι μέσω της αντίδρασης $H \rightarrow \gamma\gamma$ δύο πολύ ενεργητικά φωτόνια. Επιπλέον το θερμιδόμετρο αυτό, σχεδιάστηκε ώστε να διαθέτει πολύ καλή διακριτική ικανότητα για την ανίχνευση των δύο φωτονίων διότι δύο φωτόνια παράγονται επίσης από τη διάσπαση του ουδέτερου πιονίου $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Συνεπώς ο διαχωρισμός των δύο αυτών διεργασιών είναι πολύ μεγάλης σημασίας για την ανίχνευση του μποζονίου Higgs

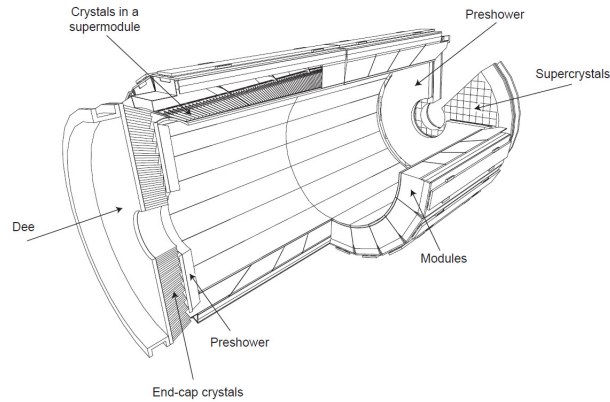
Για την κατασκευή του ECAL χρησιμοποιήθηκαν κρύσταλλοι μολύβδου-βολφραμίου ($PbWO_4$). Το υλικό αυτό επιλέχθηκε καθώς είναι πολύ πυκνό ($8.28g/cm^3$) και διαθέτει μικρό μήκος ακτινοβολίας¹ ($X_0 = 0.89\text{ cm}$) και ακτίνα Moliere² ($R_m = 0.89\text{ cm}$). Για να μπορέσουν να κατασκευασθούν οι συγκεκριμένοι κρύσταλλοι ώστε να μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες του LHC έγινε μεγάλη έρευνα στον τομέα παραγωγής κρυστάλλων. Για να παραχθεί ένας τέτοιος κρύσταλλος χρειάζονται δύο ημέρες.

Η ανίχνευση της ενέργειας των σωματιδίων από τον ανιχνευτή αυτό βασίζεται στον σπινθηρισμό. Όταν ένα σωματίδιο που αλληλεπιδρά ηλεκτρομαγνητικά περάσει μέσα από το υλικό παράγει φως το οποίο ανιχνεύεται και έτσι μπορεί να μετρηθεί η ενέργεια του σωματιδίου. Ένας λόγος επιλογής αυτών των κρυστάλλων, είναι πως η απόκριση τους είναι πολύ γρήγορη. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή του 80% του συνολικού φωτός που παράγει το εισερχόμενο σωματίδιο γίνεται σε διάστημα 25ns σε χρόνο δηλαδή συγκρίσιμο με τη συχνότητα που συγκρούονται οι δέσμες των πρωτονίων. Ένα μειονέκτημα των συγκεκριμένων κρυστάλλων είναι πως παράγουν λίγο φως κάνοντας έτσι δύσκολη την ανίχνευση του. Για το λόγο αυτό το φως που παράγεται συλλέγεται από φωτοδιόδους οι οποίες το ενισχύουν. Δύο είδη φωτοδιόδων χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, οι φωτοδιόδοι χιονοσιβάδας (Avalanche PhotoDiodes, APD) και οι φωτοτρίοδοι κενού (Vacuum PhotoTriodes, VPT).

¹Ως μήκος ακτινοβολίας, ορίζεται η απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα σωματίδιο μέσα στο υλικό μέχρι η ενέργεια του να μειωθεί στο $1/e$ της αρχικής, λόγω ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων.

²Η ακτίνα Moliere είναι ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει τον ηλεκτρομαγνητικό καταϊγισμό που δημιουργείται από ένα φωτόνιο ή ηλεκτρόνιο. Ορίζεται ως η ακτίνα ενός κυλίνδρου μέσα στον οποίο περιέχεται το 90% της ενέργειας του καταϊγισμού

Εκτός από το κυρίως κομμάτι του ECAL, το CMS διαθέτει και ένα άλλο είδους ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο. Αυτό ονομάζεται Preshower και βρίσκεται μόνο στα καπάκια (endcaps) του CMS. Ο λόγος ύπαρξης του είναι η διάσπαση του ουδέτερου πιονίου ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$). Εάν τα δύο φωτόνια που προέρχονται από τη διάσπαση αυτή φύγουν σε πολύ μικρές γωνίες, μπορεί να μην ταυτοποιηθούν σαν ξεχωριστά σωματίδια αλλά σαν ένα πολύ ενεργητικό. Συνεπώς το preshower είναι ένα θερμιδόμετρο με χωρική διακριτική ικανότητα πολύ καλύτερη από το κυρίως θερμιδόμετρο του CMS με σκοπό την ταυτοποίηση και απόρριψη των γεγονότων που προέρχονται από τη διάσπαση του ουδέτερου πιονίου.



Εικόνα 1.8: Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο (ECAL) του ανιχνευτή CMS. Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο είναι φτιαγμένο από κρυστάλλους μολύβδου βολφραμίου ($PbWO_4$) και χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 61200 κρυσταλλοί για την κατασκευή του. Το ECAL αποτελείται από το ECAL barrel (EB), το ECAL endcap (EE) και τον ανιχνευτή preshower.

Όπως όλοι οι υποανιχνευτές του CMS έτσι και το ECAL χωρίζεται σε 2 περιοχές. Το κομμάτι που βρίσκεται στο barrel (ECAL Barrel, EB) και αυτό που βρίσκεται στα endcaps (EE). Συνολικά το ECAL καλύπτει την περιοχή $1.2m < r < 1.8m$, $|\eta| < 3$.

Το EB καλύπτει την περιοχή $|\eta| < 0.1479$ και αποτελείται από κομμάτια τα οποία ονομάζονται supermodules. Κάθε supermodule αποτελείται από 4 modules, στα οποία το πρώτο περιέχει 500 κρυστάλλους και τα υπόλοιπα 400 κρυστάλλους. Συνολικά υπάρχουν 26 supermodules και 61200 κρυσταλλοί στο EB. Τέλος το κομμάτι του ανιχνευτή στο endcap καλύπτει την περιοχή $0.1479 < |\eta| < 3$. Το EE αποτελείται από 2 ημικύκλια η δομική

μονάδα του καθενός, περιέχει 5×5 κρυστάλλους που ονομάζονται "super-crystals". Έτσι κάθε ΕΕ περιέχει 7324 κρυστάλλους.

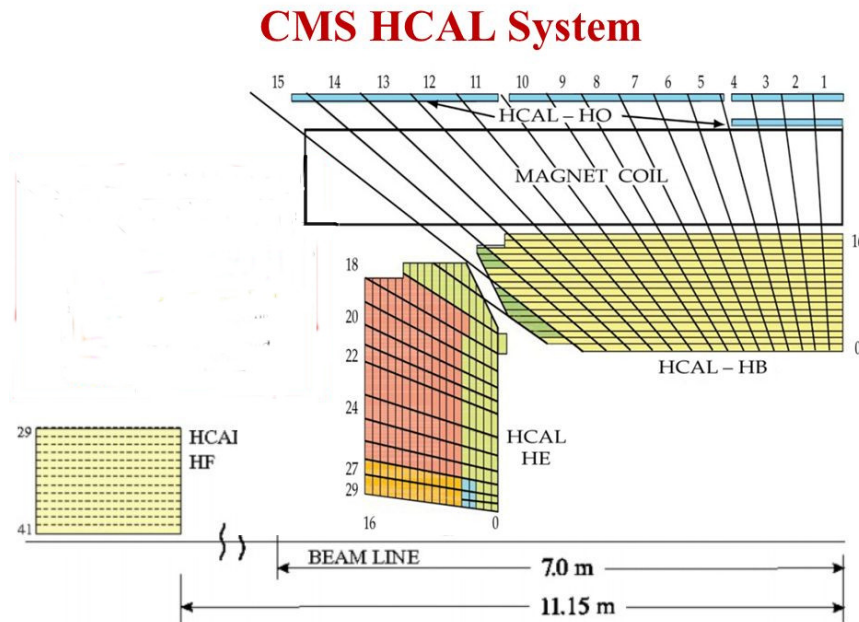
1.2.3 Το Αδρονικό Θερμιδόμετρο (HCAL)

Το τρίτο επίπεδο ανίχνευσης του CMS αποτελείται από το αδρονικό θερμιδόμετρο (Hadronic Calorimeter, HCAL). Το ανιχνευτικό σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την μέτρηση της ενέργειας των αδρονίων καθώς και των προϊόντων τους. Εκτός από την ανίχνευση σωματιδίων το HCAL σε συνδυασμό με το ECAL έχει και το ρόλο τη έμμεσης ανίχνευσης σωματιδίων. Αυτό γίνεται με την ανίχνευσή έλλειψης ορμής. Κάποια από τα σωματίδια που έχουν ενδιαφέρον στη σύγχρονη φυσική όπως τα νετρίνα ή τα υπερσυμμετρικά σωματίδια αλληλεπιδρούν σπάνια ή και καθόλου με την ύλη. Συνεπώς δεν θα αντιδράσουν με το ενεργό υλικό του ανιχνευτή και άρα η ανίχνευση τους είναι αδύνατη. Από την έλλειψη ορμής όμως μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι υπήρξε κάποιο σωματίδιο σαν προϊόν της αντίδρασης και το οποίο δεν ανιχνεύθηκε. Για το λόγο αυτό, το HCAL πρέπει να είναι ερμητικά κλειστό καθώς δεν πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να διαφύγουν χωρίς να ανιχνευθούν ήδη γνωστά σωματίδια και αυτό να ερμηνευθεί σαν έλλειψη ορμής από την πραγματοποίηση κάποιας αντίδρασης.

Η λειτουργία του αδρονικού θερμιδόμετρου βασίζεται στη δημιουργία αδρονικών καταιγιισμών, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των αδρονίων με τον πυρήνα του υλικού του ανιχνευτή. Το ενεργό υλικό του ανιχνευτή είναι φθορίζων πλαστικό. Το HCAL είναι ένα "sampling" θερμιδόμετρο δηλαδή αποτελείται από στρώματα ενεργού υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται για ανίχνευση και από στρώματα απορροφητή. Σαν απορροφητής χρησιμοποιήθηκε κυρίως ορείχαλκος γιατί είναι μη μαγνητικό υλικό αλλά και ατσάλι. Η κατασκευή του συγκεκριμένου ανιχνευτή ήταν μεγάλη πρόκληση, καθώς έπρεπε να χωρέσει μεγάλη ποσότητα υλικού ανάμεσα το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο και στο μαγνήτη.

Όταν ένα σωματίδιο περάσει από το ενεργό υλικό του ανιχνευτή, αυτό φθορίζει. Το φως το οποίο παράγεται είναι χρώματος μπλε και συλλέγεται από ίνες μετατόπισης μήκους κύματος και μετατρέπεται σε πράσινο. Στη συνέχεια οδηγείται σε ειδικούς ανιχνευτές οι οποίοι ονομάζονται Hybrid Photodiodes (HPD) με σκοπό την ενίσχυση του και τη μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα και τέλος τη μεταφορά του στη μονάδα συλλογής δεδομένων.

Το HCAL (Εικόνα 1.9) καλύπτει μια περιοχή $1.8 < r < 2.9$, $|\eta| < 5$. Όπως και οι υπόλοιποι ανιχνευτές έτσι και αυτός αποτελείται από 2 κομμάτια, αυτό



Εικόνα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση του αδρονικού θερμιδόμετρου του CMS. Το HCAL χωρίζεται σε 2 κομμάτια, στο barrel και στο endcap. Το κομμάτι στο barrel αποτελείται από το HCAL barrel και το HCAL outer. Στα endcaps υπάρχει το HCAL endcap καθώς και το HCAL forward detector.

που βρίσκεται στο κυρίως μέρος του CMS, το HCAL barrel (HB) και αυτό που βρίσκεται στα endcaps, HCAL endcaps (HE). Τα δύο αυτά κομμάτια, δίνουν κάλυψη $|\eta| < 3$. Το HCAL συμπληρώνεται από το HF, HCAL forward detector, το οποίο έχει το ρόλο ανίχνευσης των αδρονίων που φεύγουν σε πολύ μικρές γωνίες σε σχέση με τον άξονα της δέσμης. Όπως είναι λογικό αυτό το κομμάτι του CMS δέχεται πολύ μεγάλη ακτινοβολία καθώς όταν οι δέσμες διασταυρώνονται το μεγαλύτερο μέρος των πρωτονίων δεν συγκρούονται μεταξύ τους και απλά εκτρέπονται με σκοπό να καταλήγουν πάνω στους ανιχνευτές των endcaps. Για το λόγο αυτό, στο HF χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες που εκπέμπουν ακτινοβολία Cherenkov και είναι πολύ ανθεκτικές στην ακτινοβολία. Τέλος, ενώ το HCAL βρίσκεται στο εσωτερικό του μαγνήτη τα αδρόνια που φεύγουν σε πολύ μεγάλες γωνίες, σχεδόν κάθετα στον άξονα της δέσμης, δεν διανύουν μεγάλη απόσταση μέσα στο θερμιδόμετρο. Έτσι η πληροφορία για μέτρηση της ενέργειάς τους δεν είναι αρκετή. Για το λόγο αυτό, ένα ακόμα επίπεδο του HCAL έχει τοποθετηθεί εκτός του μαγνήτη, το

οποίο ονομάζεται HCAL outer (HO) και καλύπτει μια περιοχή $|\eta| < 1.26$

1.2.4 Ο μαγνήτης

Ένα από τα κυριότερα θέματα στην κατασκευή του CMS ήταν η επιλογή του μαγνήτη, το είδος καθώς και η ισχύς του. Στο CMS επιλέχθηκε η χρήση ενός υπεραγωγίμου σωληνοειδούς ($L = 13\text{m}$) παράλληλα στον άξονα της δέσμης, το οποίο παράγει μαγνητικό πεδίο 4 T. Ο μαγνήτης είναι αρκετά μεγάλος, ώστε τα 3 από τα 4 υποανιχνευτικά συστήματα του CMS να βρίσκονται στο εσωτερικό του. Ο ρόλος του είναι η καμπύλωση των τροχιών των σωματιδίων έτσι ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια η ορμή τους. Το σωληνοειδές του CMS καλύπτει μια περιοχή $|\eta| < 1.5$

1.2.5 Οι ανιχνευτές μιονίων

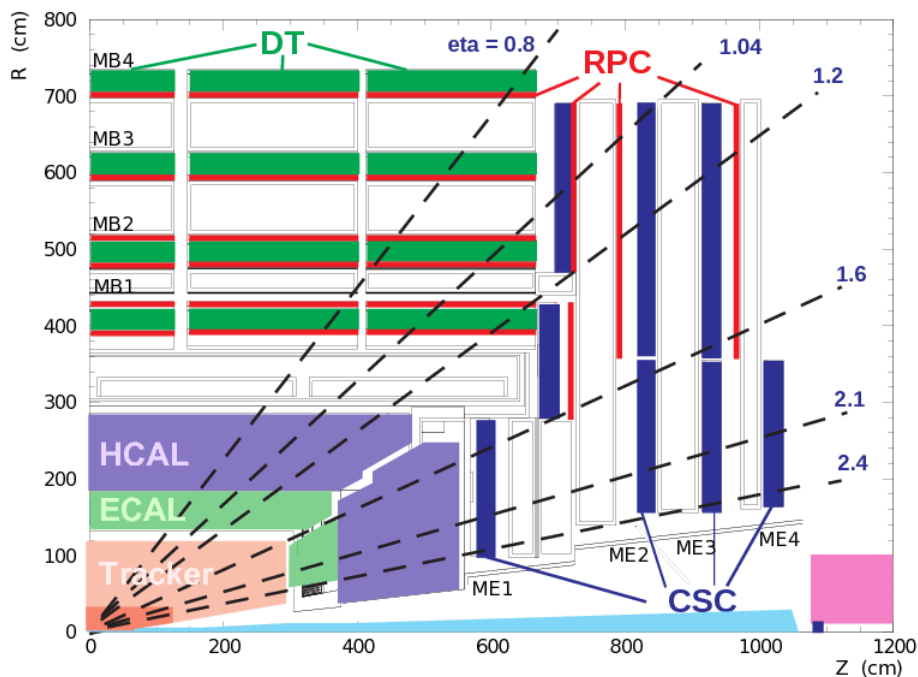
Το τελευταίο στρώμα του CMS είναι το ανιχνευτικό σύστημα μιονίων. Όπως ειπώθηκε και πιο πάνω, η ανίχνευση των μιονίων είναι υψίστης σημασίας στα πειράματα που διεξάγονται στον LHC. Εκτός από αυτό, τα μίονια είναι ιδιαίτερα διεισδυτικά σωματίδια και μπορούν να διανύσουν πολλά μέτρα μέσα σε κάποιο υλικό χωρίς να αλληλεπιδράσουν και άρα να ανιχνευτούν. Έτσι για την ανίχνευση τους χρησιμοποιείται ένα ολόκληρο ξεχωριστό σύστημα ανιχνευτών. Το μιονικό σύστημα εκτός από την ανίχνευση των μιονίων, παίζει κύριο ρόλο στο σύστημα σκανδαλισμού (Ενότητα 1.2.6) του CMS.

Το μιονικό σύστημα, αποτελείται από 4 σταθμούς και καλύπτει συνολικά μια έκταση 25000 m^2 ενεργής περιοχής³. Λόγω της μεγάλης έκτασης του καθώς και της διαφορετικής έντασης της ακτινοβολίας στις διάφορες περιοχές του ανιχνευτή, για το μιονικό σύστημα χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά είδη ανιχνευτών:

- Drift Tubes (DT).
- Cathode Strip Chambers (CSC).
- Resistive Plate Chambers (RPC).

Το καθένα από αυτά χρησιμοποιείται για διαφορετικό σκοπό, με τα δύο πρώτα να διαθέτουν πολύ καλή χωρική διακριτική ικανότητα και οι RPC

³Περιοχής στην οποία μπορεί να ανιχνευθεί ένα σωματίδιο



Εικόνα 1.10: Το μιονικό σύστημα του CMS. Συνολικά χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά είδη ανιχνευτών για την ανίχνευση των μιονίων στο CMS. Οι drift tubes (DT) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο barrel, οι cathode strip chambers (CSC) οι οποίοι είναι στα endcaps και τέλος οι resistive plate chambers (RPC) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι και στα δύο κομμάτια του ανιχνευτή.

καλή χρονική διακριτική ικανότητα. Το μιονικό σύστημα καλύπτει μια περιοχή $4 < r < 7.4$, $|\eta| < 2.4$.

Οι **drift tubes (DT)** είναι τοποθετημένοι στο κύριο σώμα του CMS, στο barrel, όπου η ροή σωματιδίων είναι χαμηλή και το μαγνητικό πεδίο ομογενές και όχι τόσο ισχυρό. Το σύστημα των drift tubes αποτελείται από 5 κυλίνδρους ομόκεντρους με τον άξονα της δέσμης που καλύπτουν όλο το barrel. Κάθε δίσκος αποτελείται από 4 stations διαφορετικής ακτίνας το καθένα (MB1 - MB4). Κάθε σωλήνας (tube) έχει διάμετρο 4 εκατοστά και στο κέντρο του υπάρχει ένα σύρμα και μείγμα αερίων αργού και διοξειδίου του άνθρακα. Όταν ένα μίονιο περάσει μέσα από το αέριο, ιονίζει τα μόρια του αερίου. Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από τον ιονισμό κατευθύνονται προς το σύρμα λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει στο εσωτερικό του σωλήνα.

Ανιχνεύοντας το σημείο που τα ηλεκτρόνια έπεσαν πάνω στο σύρμα καθώς και το χρόνο ολίσθησης (drift) μέχρι να φτάσουν στο σύρμα υπολογίζεται η τροχιά του μιονίου. Κάθε ανιχνευτής τύπου DT, έχει μέγεθος περίπου 2×2.5 m και αποτελείται από 12 στρώματα χωρισμένα σε 3 ομάδες με συνολικά 60 tubes. Η μεσαία ομάδα, ανιχνεύει την συντεταγμένη της τροχιάς κατά τον άξονα της δέσμης, ενώ οι άλλες 2 ομάδες τις συντεταγμένες στο επίπεδο κάθετο στον άξονα της δέσμης.

Οι **cathode strip chambers (CSC)**, είναι τοποθετημένοι στα endcaps κάθετα στη διεύθυνση της δέσμης, όπου η ροή σωματιδίων είναι μεγάλη και το μαγνητικό πεδίο ανομοιογενές. Οι CSC έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον με τόση μεγάλη ακτινοβολία. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το χρόνο διέλευσης του σωματιδίου. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε ένα πλέγμα συρμάτων. Διαθέτουν θετικά φορτισμένα σύρματα τα οποία λειτουργούν σαν άνοδοι και αρνητικά φορτισμένα κάθετα στις ανόδους που λειτουργούν σαν κάθοδοι. Το πλέγμα βρίσκεται μέσα σε ένα μείγμα αερίου. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο περάσει μέσα από την ενεργή περιοχή του ανιχνευτή τα μόρια του αερίου ιονίζονται και τα ηλεκτρόνια που παράγονται από τον ιονισμό οδηγούνται προς τις καθόδους δημιουργώντας χιονοστιβάδα. Το σήμα που παράγεται από την χιονοστιβάδα δίνει πληροφορία για την τροχιά του σωματιδίου που πέρασε.

Οι ανιχνευτές **resistive plate chambers (RPC)**, είναι τοποθετημένοι τόσο στο barrel αλλά και στα endcaps του CMS και λειτουργούν συμπληρωματικά για τους DT και τους CSC παρέχοντας πληροφορίες για το σκανδαλισμό. Αποτελούνται από δύο πλάκες, μια θετικά φορτισμένη που λειτουργεί σαν άνοδος και μια αρνητικά φορτισμένη που έχει το ρόλο της καθόδου και στο ενδιάμεσο (2 mm περίπου) τους υπάρχει αέριο. Όταν ένα μίονιο περάσει από το αέριο προκαλεί ιονισμό. Λόγω των φορτισμένων πλακών στην περιοχή του αερίου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι τα ηλεκτρόνια που παράγονται από τον ιονισμό επιταχύνονται και δημιουργούν χιονοστιβάδα. Τα προϊόντα της χιονοστιβάδας οδηγούνται προς την άνοδο όπου και συλλέγονται δίνοντας έτσι πληροφορία για το μίονιο που πέρασε. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο ώστε το σήμα να έρχεται σε πολύ μικρότερο χρόνο από την συχνότητα των συγκρούσεων. Λόγω της πολύ γρήγορης απόκρισης αλλά και της καλής διακριτικής τους ικανότητας οι RPC χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία του triggering.

1.2.6 Σύστημα σκανδαλισμού (Trigger)

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του LHC οι ανιχνευτές θα καταγράφουν γεγονότα με συχνότητα 10^9 Hz. Κατά τη διαδικασία αυτή, κάθε ένας από τους ανιχνευτές του LHC θα παράγει περίπου 100 TeraByte δεδομένων το δευτερόλεπτο. Όλη αυτή η πληροφορία είναι αδύνατο να αποθηκευθεί πρώτον διότι δεν υπάρχουν τα μέσα για την αποθήκευση τόσο μεγάλου όγκου δεδομένων και δεύτερον διότι ένα πολύ μικρό κομμάτι από αυτά τα δεδομένα είναι ενδιαφέροντα από πλευράς φυσικής ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω ανάλυση. Για το λόγο αυτό όλοι οι ανιχνευτές χρησιμοποιούν συστήματα με σκοπό τη μείωση του όγκου των δεδομένων. Στο CMS το συγκεκριμένο σύστημα ονομάζεται **Trigger and Data Acquisition System (TRIDAS)**. Στο CMS η διαδικασία αυτή γίνεται σε 2 στάδια. Πρώτα τα δεδομένα περνούν από τον Level-1 trigger και στη συνέχεια από τον High Level Trigger (HLT).

Ο Level-1 Trigger είναι το πρώτο στάδιο του συστήματος σκανδαλισμού του CMS. Ο συνολικός χρόνος συλλογής των δεδομένων και της ανάλυσης τους από το σύστημα είναι περίπου 3.2 μ s. Λόγω προβλημάτων καθυστέρησης, ο trigger έχει στην πραγματικότητα περίπου 1 μ s για να "αποφασίσει". Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε buffers μέχρι ο trigger να "αποφασίσει" αν θα κρατήσει ή όχι τα δεδομένα. Ο Level-1 trigger αποτελείται αποκλειστικά από hardware το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο όσο το δυνατόν πιο κοντά στον ανιχνευτή για να μειωθούν φαινόμενα καθυστέρησης λόγω μεταφοράς της πληροφορίας. Εξαιτίας του πολύ μικρού χρόνου που έχει στη διάθεση του το σύστημα αυτό, τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιεί προέρχονται αποκλειστικά από τα θερμιδόμετρα και το σύστημα μιονίων. Μετά το στάδιο αυτό ο συνολικός όγκος των δεδομένων έχει μειωθεί σε 50 kHz και τα δεδομένα που διαλέγονται μεταφέρονται στον HLT για περαιτέρω ανάλυση.

Ο HLT αποτελείται αποκλειστικά από software. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί αλγορίθμους ανάλογους με αυτούς που χρησιμοποιούνται από τους φυσικούς για την offline ανάλυση και το φιλτράρισμα των γεγονότων γίνεται σε 3 στάδια. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται δεδομένα μόνο από τα θερμιδόμετρα και το μιονικό σύστημα ανάλογα με τον L1 trigger αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται δεδομένα και από τον tracker. Τέλος χρησιμοποιείται όλη η πληροφορία και γίνεται ανακατασκευή ολόκληρου του γεγονότος. Μόλις η διαδικασία του triggering έχει ολοκληρωθεί τα δεδομένα θα έχουν μειωθεί σε 100 Hz. Τα γεγονότα που έχουν περάσει και τα δύο επίπεδα του trigger αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται για offline ανάλυση.

Κεφάλαιο 2

Θερμιδομετρία

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της θερμιδομετρίας καθώς και στις αρχές λειτουργίας των θερμιδόμετρων. Μετά από μια εισαγωγή στις αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ύλη θα παρουσιαστούν τα βασικότερα είδη θερμιδομέτρων καθώς και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή τους.

2.1 Αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με την ύλη

Κατά τις συγκρούσεις των δεσμών του επιταχυντή, παράγονται σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά διαπερνούν τον ανιχνευτή με σκοπό την ανίχνευση και ταυτοποίηση τους. Οι αρχές λειτουργίας των ανιχνευτών καθώς και η δυνατότητα τους για ανίχνευση των διαφόρων σωματιδίων, βασίζεται στην αλληλεπίδραση των εισερχόμενων σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή.

2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

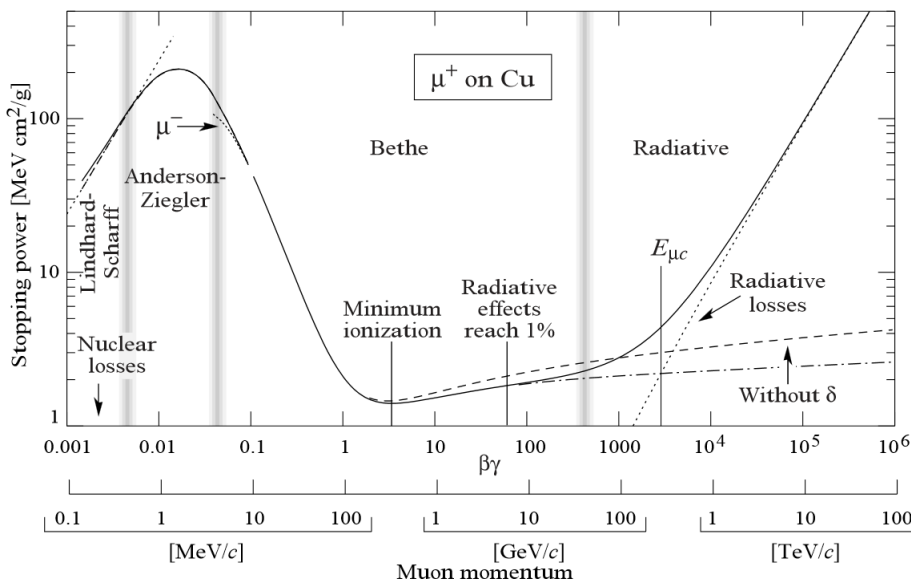
Ως ηλεκτρομαγνητικές (H/M), χαρακτηρίζονται οι αλληλεπιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν φορτισμένα σωματίδια. Από τη σκοπιά των αντιδράσεων αυτών, τα σωματίδια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με βάση τις μάζες τους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο ενώ στη δεύτερη όλα τα υπόλοιπα βαρύτερα σωματίδια. Τα βαριά σωματίδια χάνουν ενέργεια κυρίως μέσα από διαδικασίες ιονισμού, ενώ για τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια επικρατεί η απώλεια ενέργειας μέσω εκπομπής ακτινοβολίας Bremsstrahlung.

Καθώς τα σωματίδια διαπερνούν το υλικό του ανιχνευτή, σκεδάζονται ανελαστικά με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού του ανιχνευτή. Σε κάποιες περιπτώσεις η ενέργεια που μεταφέρεται από το εισερχόμενο σωματίδιο στα ηλεκτρόνια του ατόμου είναι αρκετή ώστε να ελευθερώσει τα ηλεκτρόνια από τον πυρήνα. Σαν αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, υπάρχει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και ένα ιόν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ιονισμός και περιγράφεται από την εξίσωση Bether-Bloch.

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (2.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη μέση απώλεια ενέργειας (dE) ανά απόσταση (dx) για ένα σωματίδιο. Όπου K είναι μια σταθερά με τιμή $0.307 \text{ MeV cm}^2 \text{ mol}^{-1}$, Z και A είναι ο ατομικός και μαζικός αριθμός του απορροφητή, T_{\max} είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί κατά μια σύγκρουση και I είναι η σταθερά ιονισμού του απορροφητή. Ο όρος m_e εκφράζει τη μάζα του ηλεκτρονίου και δ είναι ένα όρος για διόρθωση στις πολύ μεγάλες ενέργειες. Για πολύ χαμηλές ενέργειες, ο όρος $1/\beta^2$ υπερισχύει, ενώ σε πολύ υψηλές ο όρος $\ln \gamma^2$ είναι κυρίαρχος. Στη Εικόνα 2.1 απεικονίζεται η απώλεια ενέργεια ενός μιονίου μέσα σε χαλκό. Για τιμές $\beta\gamma \approx 3 - 4$ υπάρχει ένα ελάχιστο στην απώλεια ενέργειας και τα σωματίδια μπορούν να ταξιδεύουν χάνοντας την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται minimum ionizing particles (MIP) και μπορούν να ταξιδεύσουν σε πολύ μεγάλο βάθος μέσα στον ανιχνευτή. Διαφορετικά σωματίδια σε διαφορετικά υλικά θα παρουσιάζουν παρόμοια καμπύλη dE/dx με αυτή της Εικόνας 2.1 αλλά μετατοπισμένη, καθώς ο όρος $\beta\gamma$ περιέχει την μάζα του σωματιδίου.

Για ελαφρά σωματίδια, ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια δηλαδή, η ενέργεια χάνεται κυρίως μέσω ακτινοβολίας Bremsstrahlung. Η ακτινοβολία αυτή παράγεται όταν εισερχόμενα σωματίδια αλληλεπιδρούν με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του πυρήνα ενός ατόμου και χάνουν ενέργεια εκπέμποντας φωτόνια. Η ενεργός διατομή της διαδικασίας αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας του σωματιδίου. Συνεπώς, για βαριά σωματίδια, η διαδικασία αυτή συμβαίνει μόνο σε πολύ υψηλές ενέργειες. Σε κάποια συγκεκριμένη ενέργεια, η οποία ονομάζεται κρίσιμη ενέργεια E_c ή $E_{\mu c}$ για το μόνιο (Εικόνα 2.1), ο ρυθμός απώλειας ενέργειας μέσω ιονισμού και ακτινοβολίας Bremsstrahlung είναι ίδιος. Η τιμή της κρίσιμης ενέργειας εξαρτάται όχι μόνο από το εισερχόμενο σωματίδιο αλλά και από το υλικό. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω σε χαμηλές ενέργειες, κυριαρχούν οι διαδικασίες ιονισμού ενώ σε υψηλές η εκπομπή ακτινοβολίας Bremsstrahlung. Η απώλεια ενέργειας αυξάνεται λογαριθμικά



Εικόνα 2.1: Γραφική παράσταση της απώλειας ενέργειας ενός μιονίου μέσα σε χαλκό.

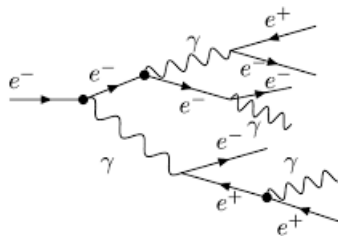
ενέργεια με την για τον ιονισμό ενώ γραμμικά για την εκπομπή ακτινοβολίας Bremsstrahlung.

2.1.2 Αλληλεπιδράσεις φωτονίων με την ύλη

Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη με τρεις τρόπους, μέσω σκέδασης Compton, φωτοηλεκτρικού φαινομένου και δίδυμης γένεσης. Κατά τη σκέδαση Compton, ένα εισερχόμενο φωτόνιο σκεδάζεται ελαστικά από τα ηλεκτρόνια της εξωτερική στιβάδας ενός πυρήνα και σαν αποτέλεσμα μεταφέρει ενέργεια σε αυτά. Με τον τρόπο αυτό, το μήκος κύματος του φωτονίου αυξάνεται. Η ενεργός διατομή της διαδικασίας αυτή εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του υλικού στο οποίο διαδίδεται.

Στις χαμηλές ενέργειες τα φωτόνια χάνουν ενέργεια κυρίως μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα από τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου. Εάν το φωτόνιο έχει αρκετή ενέργεια, το ηλεκτρόνιο ελευθερώνεται από τον πυρήνα και αποκτά κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια του φωτονίου μείον την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα.

Από την πλευρά της θερμιδομετρίας, η πιο σημαντική διαδικασία είναι



Εικόνα 2.2: Απλή αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού καταϊγισμού ο οποίος ξεκινάει με την εκπομπή ακτινοβολίας Bremsstrahlung από ένα ηλεκτρόνιο.

αυτή της δίδυμης γένεσης. Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο ενός ατόμου και, αν έχει αρκετή ενέργεια, μετατρέπεται σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου ποζιτρονίου. Για να συμβεί αυτό, το φωτόνιο θα πρέπει να έχει ενέργεια περισσότερη από την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μόνο από πολύ ενεργητικά φωτόνια.

2.1.3 Ηλεκτρομαγνητικός καταϊγισμός

Μια έννοια υψίστης σημασίας για την θερμιδομετρία είναι αυτή των ηλεκτρομαγνητικών καταϊγισμών. Τα υψηλοενεργειακά σωματίδια που διαδίδονται μέσα στο υλικό του ανιχνευτή, χάνουν την ενέργεια τους κυρίως εκπέμποντας ακτινοβολία Bremsstrahlung, εκπέμποντας δηλαδή φωτόνια υψηλής ενέργειας. Τα φωτόνια αυτά με τη σειρά τους πραγματοποιούν δίδυμη γένεση δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίων ποζιτρονίων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται διαδοχικά δημιουργώντας μια χιονοστιβάδα σωματιδίων που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικός καταϊγισμός (Εικόνα 2.2). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι τα φωτόνια να μην έχουν αρκετή ενέργεια για να πραγματοποιήσουν δίδυμη γένεση και τα φορτισμένα σωματίδια να χάνουν ενέργεια μόνο μέσω ιονισμού, να έχουν δηλαδή φτάσει στην κρίσιμη τους ενέργεια E_c . Κατά προσέγγιση, η κρίσιμη ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$E_c = \frac{800 \text{ MeV}}{Z + 1.2} \quad (2.2)$$

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών καταϊγισμών είναι το μήκος ακτινοβολίας X_0 και η οποία ορίζεται με δύο

τρόπους. Πρώτον ως η μέση απόσταση την οποία πρέπει να διανύσει ένα ηλεκτρόνιο για να χάσει όλη της ενέργεια εκτός από το $1/e$ της αρχικής του ενέργειας. Επιπλέον μπορεί να οριστεί ως τα $7/9$ της μέσης απόστασης που πρέπει να διανύσει ένα υψηλοενεργειακό φωτόνιο για να υποστεί δίδυμη γένεση. Για την διαμήκη συνιστώσα του καταγισμού το μέγιστο βάθος που μπορεί ένας καταγισμός να φτάσει, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$X = X_0 \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2} \quad (2.3)$$

όπου X_0 είναι το μήκος ακτινοβολίας, E_c είναι η κρίσιμη ενέργεια και E_0 η αρχική ενέργεια του σωματιδίου που ξεκίνησε τον καταγισμό.

Όσον αφορά την διαμήκη συνιστώσα του καταγισμού, δύο διαδικασίες παίζουν σημαντικό ρόλο, η σκέδαση Coulomb των ηλεκτρονίων και η μεγάλη μέση διαδρομή των φωτονίων χαμηλής ενέργειας. Μπορεί να υπολογιστεί ότι το 95% ενέργειας του καταγισμού βρίσκεται μέσα σε έναν κύλινδρο ακτίνας $2R_M$, όπου R_M είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται ακτίνα Molière. Η ακτίνα αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

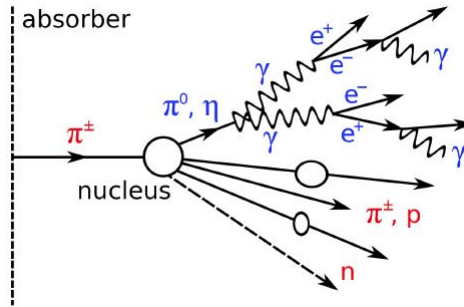
$$R_M = \frac{21.2 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad (2.4)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι φανερό πως η παραμέτρος αυτή του καταγισμού εξαρτάται από το υλικό.

2.1.4 Οι αλληλεπιδράσεις των αδρονίων με την ύλη

Εκτός από τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, μέσα στο υλικό του ανιχνευτή συμβαίνουν και αδρονικές αλληλεπιδράσεις. Τα αδρόνια, φορτισμένα ή αφόρτιστα, αποτελούνται από κουάρκς και γλουόνια κάτι που σημαίνει ότι αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Γενικά τα αδρόνια μπορούν να σκεδαστούν τόσο ελαστικά όσο και ανελαστικά με τους πυρήνες του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδονται. Κατά τις ελαστικές σκεδάσεις, τα αδρόνια μεταφέρουν ένα μέρος της ενέργειας τους στον πυρήνα και αλλάζουν την πορεία τους. Για την μέτρηση της ενέργειας ενός αδρονίου από τον ανιχνευτή, οι ανελαστικές σκεδάσεις παίζουν σημαντικότερο ρόλο από τις ανελαστικές.

Κατά τις ανελαστικές σκεδάσεις, το αδρόνιο χτυπά τον πυρήνα και ένα από αυτά ή και τα δύο αλλάζουν ταυτότητα δηλαδή δημιουργούνται καινούργια σωματίδια. Καθώς αδρόνια υψηλής ενέργειας περνούν μέσα από το υλικό του ανιχνευτή σκεδάζονται πολλές φορές, δημιουργώντας αδρονικούς



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της ανάπτυξης ενός αδρονικού καταίγιου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα κάποια στιγμή κατά της ανάπτυξη του καταίγιου, δημιουργείται ένα ουδέτερο πιόνιο (π^0). Αυτό έχει σαν συνέπεια την ύπαρξη ενός ηλεκτρομαγνητικού κομματιού μέσα στον αδρονικό καταίγιο. Όλοι οι αδρονικοί καταίγιοι περιέχουν ένα ηλεκτρομαγνητικό κομμάτι.

καταίγιους (Εικόνα 2.3) όπως ακριβώς συμβαίνει και τους ηλεκτρομαγνητικούς καταίγιους. Οι αδρονικοί καταίγιοι είναι πολύ πιο πολύπλοκοι από τους ηλεκτρομαγνητικούς, μεγαλύτεροι σε μήκος και πιο πυκνοί. Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά της δημιουργία τους υπόκεινται σε στατιστικές διακυμάνσεις και η περιγραφή των καταίγιων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Μια ποσότητα που χρησιμοποιείται για την διαμήκη ανάπτυξη τους είναι το μήκος αλληλεπίδρασης το οποίο ορίζεται ως η μέση απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα αδρόνιο για να αντιδράσει μέσω ισχυρής αλληλεπίδρασης, και δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_{\text{had}} = \frac{A}{\sigma_{\text{inel}} N_L \cdot \rho} \quad (2.5)$$

Όπου A είναι ο ατομικός αριθμός του υλικού που διαδίδεται το αδρόνιο, N_A είναι ο αριθμός Avogadro, σ_{inel} είναι η ενεργός διατομή των ανελαστικών διαδικασιών και ρ είναι η πυκνότητα του υλικού.

Κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των ηλεκτρομαγνητικών καταίγιων, ένα από τα σωματίδια που παράγεται είναι το ουδέτερο πιόνιο (π^0). Το σωματίδιο αυτό διασπάται με μεγάλη πιθανότητα μέσω της αλληλεπίδρασης $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ σε δύο φωτόνια. Εάν τα φωτόνια αυτά έχουν αρκετή ενέργεια θα δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό καταίγιο όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Συνεπώς κάθε αδρονικός καταίγιο έχει ένα ηλεκτρομαγνητικό κομμάτι. Τα δυο κομμάτια του καταίγιου συμβολίζονται ως f_{had} για το αδρονικό κομμάτι και f_{em} για

το ηλεκτρομαγνητικό. Για τα δύο αυτά κομμάτια ισχύει $f_{\text{had}} + f_{\text{em}} = 1$. Κατά μέσο όρο το κομμάτι της ενέργειας του αδρονίου που εναποτίθεται στον ηλεκτρομαγνητικό καταϊγισμό μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ενέργειας με τη σχέση:

$$f_{\text{em}} \simeq f_{\pi^0} \simeq 0.1 \cdot \ln \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right) \quad (2.6)$$

Κατά της διάρκεια ανάπτυξης του καταϊγισμού φορτισμένα σωματίδια μπορούν να χάσουν ενέργεια μέσω ιονισμού. Επιπρόσθετα, ενέργεια μπορεί να εναποτεθεί στο υλικό με τρόπους που δεν μπορεί να μετρήσει ο ανιχνευτής. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται αόρατη ενέργεια και μπορεί να εκφραστεί σαν μη ανιχνεύσιμα σωματίδια όπως νετρίνα αλλά και σαν ενέργεια που ξοδεύεται για απελευθέρωση νουκλεονίων από τον πυρήνα.

2.2 Θερμιδόμετρα

Σκοπός των θερμιδόμετρων είναι η μέτρηση της συνολικής ενέργειας των σωματιδίων που διαδίδονται στο υλικό του ανιχνευτή. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο ότι σωματίδια αντιδρούν με το υλικό του ανιχνευτή και αφήνουν την ενέργεια τους σε αυτόν, δημιουργώντας καταϊγισμούς. Στη συνέχεια η ενέργεια που εναποτέθηκε στον ανιχνευτή μπορεί να μετρηθεί και έτσι να προσδιοριστεί η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου. Για να μετρηθεί η ολική ενέργεια του σωματιδίου, πρέπει αυτό να εναποθέσει όλη του την ενέργεια και να σταματήσει μέσα στον ανιχνευτή. Συνήθως στα πειράματα φυσικής χρησιμοποιούνται δύο ειδών θερμιδόμετρα, ένα ηλεκτρομαγνητικό και ένα αδρονικό. Αυτό γίνεται διότι η δημιουργία αλλά και η ανίχνευση των δύο ειδών καταϊγισμών είναι διαφορετικές διαδικασίες. Τα θερμιδόμετρα χωρίζονται σε δύο είδη ανάλογα με τα είδη των υλικών που χρησιμοποιούνται σαν απορροφητές και σαν ενεργό υλικό του ανιχνευτή.

Η πρώτη κατηγορία είναι τα **ομοιογενή** θερμιδόμετρα. Όπως δηλώνει το όνομα τους, αποτελούνται από ένα και μοναδικό υλικό το οποίο είναι υπεύθυνο τόσο για την απορρόφηση του σωματιδίου, δηλαδή τη δημιουργία καταϊγισμών, όσο και για την δημιουργία της ενέργειας που εναποτέθηκε σε μετρήσιμο σήμα. Οι ανιχνευτές αυτού του είδους έχουν πολύ καλή διακριτική ικανότητα αλλά έχουν μεγάλο κόστος. Ένα παράδειγμα ομοιογενούς θερμιδόμετρου είναι αυτό του ηλεκτρομαγνητικού θερμιδόμετρου του CMS το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους μολύβδου βολφραμίου (PbWO_4).

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα **δειγματοληπτικά** θερμιδόμετρα. Σε αυτό το είδος ανιχνευτών, οι δύο ξεχωριστές λειτουργίες, απορρόφηση και ανίχνευση, γίνεται από διαφορετικά υλικά. Το υλικό-απορροφητής είναι υπεύθυνο για την δημιουργία των καταγισμών και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πολύ πυκνά υλικά όπως μόλυβδος και σίδηρος. Το ενεργό υλικό του ανιχνευτή είναι υπεύθυνο για την παραγωγή μετρήσιμου σήματος. Εφόσον μόνο ένα κομμάτι του ανιχνευτή παράγει σήμα, ένα δείγμα της ενέργειας του σωματιδίου μετράται και γι' αυτό οι ανιχνευτές αυτοί ονομάζονται δειγματοληπτικοί. Σαν ενεργό υλικό χρησιμοποιούνται οργανικοί ή ανόργανοι σπινθηριστές, πυρίτιο και πολλά άλλα. Η επιλογή αυτή εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο ανιχνευτής όπως διακριτική ικανότητα, αντοχή στην ακτινοβολία και άλλα.

Για την κατασκευή δειγματοληπτικών θερμιδόμετρων χρησιμοποιούνται διάφορες γεωμετρίες. Η πιο συνηθισμένη είναι η παράθεση επιπέδων απορροφητή και ενεργού υλικού εναλλάξ. Τα δειγματοληπτικά θερμιδόμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως σαν αδρονικά θερμιδόμετρα. Αυτό συμβαίνει διότι πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ηλεκτρομαγνητικά λόγω του μεγάλου μήκους των αδρονικών καταγισμών και τα δειγματοληπτικά καλορίμετρα είναι πολύ πιο συμπαγή από τα ομογενή. Οι ανιχνευτές αυτοί ανιχνεύουν μόνο το ποσό της ενέργειας που εναποτίθεται στο ενεργό υλικό. Για το λόγο αυτό η απόδοση τους επηρεάζεται από διακυμάνσεις οι οποίες ονομάζονται δειγματοληπτικές διακυμάνσεις. Αυτό σημαίνει ότι το ποσό ενέργειας που εναποτίθεται στον ανιχνευτή ποικίλει από γεγονός σε γεγονός και αυτού του είδους οι ανιχνευτές έχουν χαμηλότερη διακριτική ικανότητα από τους ομοιογενείς.

2.3 Απόκριση του θερμιδόμετρου

Στο σημείο αυτό του κειμένου, μόνο η απόκριση του ενός δειγματοληπτικού θερμιδόμετρου θα αναλυθεί, καθώς το HGAL είναι αυτού του είδους.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ανίχνευση της ενέργειας των σωματιδίων βασίζεται στη δημιουργία καταγισμών. Καθώς ο καταγισμός αναπτύσσεται, κάποια από τα σωματίδια που παράγονται στο ενεργό υλικό δημιουργούν σήμα, το οποίο στη συνέχεια ανιχνεύεται και με βάση αυτό μπορεί να μετρηθεί η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται και ορατή ενέργεια και είναι ένα κλάσμα της αρχικής ενέργειας του σωματιδίου:

$$\epsilon_{vis} \propto E \quad (2.7)$$

Αυτή είναι μια από τις βασικές αρχές της θερμιδομετρίας, ότι δηλαδή η απόκριση του ανιχνευτή εξαρτάται γραμμικά από την ενέργεια του εισερχόμενου σωματιδίου και είναι ανεξάρτητη από το είδος του σωματιδίου. Αυτό ισχύει για ένα ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο, αφού όλη η ενέργεια εναποτίθεται στον ανιχνευτή.

Ως απόκριση του ανιχνευτή ορίζεται η μέση παραγωγή σήματος ανά μονάδα εναποτιθέμενης ενέργειας σε αυτόν. Γενικά, οι ανιχνευτές αποκρίνονται διαφορετικά ειδικά τα αδρονικά θερμιδόμετρα λόγω διακυμάνσεων στην ανάπτυξη του καταγισμού και η απόκριση τους εξαρτάται από το σωματίδιο. Για να μπορέσει κανείς να συγκρίνει την απόκριση τους θα πρέπει να υπολογίσει τα κλάσματα αυτής (Sampling Fractions). Το κλάσμα αυτό ορίζεται ως η ενέργεια που μετράται από τον ανιχνευτή προς αυτήν που άφησε το σωματίδιο σε αυτόν.

$$\text{Sampling Fraction} = \frac{\text{μετρούμενη ενέργεια}}{\text{εναποτιθέμενη ενέργεια}} \quad (2.8)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των καταγισμών, πραγματοποιούνται διάφορες διεργασίες. Ειδικά για τους αδρονικούς καταγισμούς, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από τον ατομικό αριθμό A του υλικού, και κατά την ανάπτυξη τους ενέργεια ξοδεύεται για την ελευθέρωση νουκλεονίων από τους πυρήνες η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί (αόρατη ενέργεια). Για τους ηλεκτρομαγνητικούς καταγισμούς δεν υπάρχει κάτι ανάλογο, συνεπώς η απόκριση του ανιχνευτή είναι πολύ καλύτερη για ένα ηλεκτρόνιο (ή φωτόνιο) e από ότι για ένα αδρόνιο (ιδανικό αδρόνιο) h της ίδιας ενέργειας. Ως ιδανικό χαρακτηρίζεται ένα αδρόνιο το οποίο δαπανά όλη του την ενέργεια για τη δημιουργία καθαρά αδρονικού καταγισμού. Το κλάσμα των αποκρίσεων είναι:

$$\frac{e}{h} \equiv \frac{\varepsilon_{\text{vis}}(e)}{\varepsilon_{\text{vis}}(h)} \quad (2.9)$$

όπου $\varepsilon_{\text{vis}}(e)$, και $\varepsilon_{\text{vis}}(h)$ είναι οι ορατές ενέργειες για ένα ηλεκτρόνιο (ή φωτόνιο) και ένα αδρόνιο αντίστοιχα. Αυτός ο όρος είναι συνήθως μεγαλύτερος της μονάδας μιας και οι ανιχνευτές αποκρίνονται καλύτερα στα ηλεκτρομαγνητικά σωματίδια. Η ορατή ενέργεια για έναν ηλεκτρομαγνητικό καταγισμό είναι ανάλογη της ενέργειας του εισερχόμενου σωματιδίου. Το ίδιο ισχύει και για ένα ιδανικό αδρόνιο. Συνεπώς ο λόγος των αποκρίσεων e/h , μία ποσότητα η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί μιας και το είναι υποθετικό σωματίδιο, είναι ανεξάρτητος της ενέργειας και αποτελεί μια χαρακτηριστική ιδιότητα του ανιχνευτή.

Για να μετρηθεί η απόκριση του ανιχνευτή, χρησιμοποιείται ένα άλλο κλάσμα. Το κλάσμα αυτό είναι το e/h το οποίο εξαρτάται από την ενέργεια. Η μετρήσιμη ενέργεια για ένα πόνιο είναι:

$$\varepsilon_{\text{vis}}(\pi) = f_{\text{em}}\varepsilon_{\text{vis}}(e) + (1 - f_{\text{em}})\varepsilon_{\text{vis}}(h) \quad (2.10)$$

Έτσι ο λόγο e/h γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{e}{h} &\equiv \frac{\varepsilon_{\text{vis}}(e)}{\varepsilon_{\text{vis}}(\pi)} = \frac{\varepsilon_{\text{vis}}(e)}{f_{\text{em}}\varepsilon_{\text{vis}}(e) + (1 - f_{\text{em}})\varepsilon_{\text{vis}}(h)} \Rightarrow \\ \frac{e}{h} &= \frac{e}{h} \cdot \frac{1}{1 - f_{\text{em}}(1 - e/h)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ο λόγος αυτός, εξαρτάται από την ενέργεια αφού περιέχει τον όρο f_{em} (Εξίσωση 2.6). Μετρώντας δηλαδή την απόκριση του ανιχνευτή για ηλεκτρόνια και πόνια ίδιας ενέργειας μπορεί κανείς να προσδιορίσει τον λόγο e/h .

Για να λειτουργεί ο ανιχνευτής ικανοποιητικά, θα πρέπει ο λόγος e/h να είναι ίσος με 1 ή όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μονάδα. Όταν αυτό έχει επιτευχθεί το θερμιδόμετρο ονομάζεται αντισταθμισμένο (compensating calorimeter). Ένα θερμιδόμετρο στο οποίο δεν ισχύει το παραπάνω, έχει πολύ χειρότερη διακριτική ικανότητα. Αυτό συμβαίνει διότι οι στατιστικές διακυμάνσεις στην ανάπτυξη των καταγισμών μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικές μετρήσεις ακόμα και για το ίδιο γεγονός. Για να αντισταθμιστεί το θερμιδόμετρο, είναι πολύ σημαντική η επιλογή των υλικών καθώς πρέπει η αόρατη ενέργεια να είναι η μικρότερη δυνατή. Τέλος, η αντιστάθμιση μπορεί να γίνει και offline κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των δεδομένων.

2.4 Διακριτική ικανότητα των θερμιδόμετρων

Μια άλλη πολύ σημαντική ιδιότητα των θερμιδόμετρων είναι η διακριτική τους ικανότητα. Αυτή ορίζεται ως η ικανότητα του ανιχνευτή να διαχωρίσει δυο διαφορετικές αλλά πολύ κοντά μεταξύ τους ενέργειες.

Η ικανότητα του ανιχνευτή να ανιχνεύσει ένα σωματιδίο βασίζεται στην αλληλεπίδραση του σωματιδίου με το υλικό του ανιχνευτή. Λόγω της στατιστικής φύσεως των αλληλεπιδράσεων αυτών, το αποτέλεσμα της μέτρησης της ενέργειας είναι μια κατανομή Gauss αντί για μια συνάρτηση δ όπως θα περίμενε κανείς. Το εύρος της καμπύλης αυτής καθορίζει τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή. Η πραγματική διακριτική του ικανότητα δίνεται από

το εύρος της καμπύλης στο μέσο του μέγιστου της (Full Width at Half Maximum (FWHM)) το οποίο για μια κατανομή Gauss είναι ίσο με $FWHM = 2.35\sigma$. Αυτό σημαίνει ότι ενέργειες που απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από αυτό τον αριθμό δεν μπορούν να ταυτοποιηθούν σαν διαφορετικές από τον ανιχνευτή.

Η ενέργεια που μετράται από τον ανιχνευτή εξαρτάται από τον αριθμό των σωματιδίων που παράχθηκαν κατά των καταιγισμό N . Ο αριθμός αυτός είναι ανάλογος της ενέργειας του εισερχόμενου σωματιδίου. Καθώς ο αριθμός των παραγόμενων σωματιδίων κυμαίνεται σαν μια κατανομή Poisson, η σχετική διακριτική ικανότητα είναι ίση με:

$$N \propto E \rightarrow \sigma_E \propto \sqrt{E} \Rightarrow \frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (2.12)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, καθώς ο λόγος e/π είναι διαφορετικός της μονάδας, οι στατιστικές διακυμάνσεις του παράγοντα f_{em} παίζουν σημαντικό ρόλο και επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή και την ικανότητα του να μετρήσει την ενέργεια ενός αδρονίου. Ενώ τα ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα μπορεί να έχουν διακριτική ικανότητα της τάξης $\approx 0.1/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ για τα αδρονικά αυτή είναι ίση με $\approx 0.43/\sqrt{E[\text{GeV}]}$.

Η συνολική ενεργειακή διακριτική ικανότητα, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες στατιστικές διακυμάνσεις καθώς και σφάλματα στα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E} \quad (2.13)$$

Στην παραπάνω σχέση, a είναι ένας στοχαστικός όρος ο οποίος συμπεριλαμβάνει διακυμάνσεις κατά την ανάπτυξη του καταιγισμού, καθώς και κβαντομηχανικές διορθώσεις. Ο όρος b ονομάζεται σταθερός όρος και περιέχει διορθώσεις για ως προς την αντιστάθμιση του ανιχνευτή, για τη βαθμονόμηση αυτού και άλλες. Τέλος ο όρος c ονομάζεται όρος θορύβου και λαμβάνει υπόψιν του διακυμάνσεις που προκαλούνται από τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή.

Διάφορες άλλες ιδιότητες παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του ανιχνευτή, όπως η απόδοση και ο νεκρός χρόνος οι οποίες όμως είναι εκτός θέματος της παρούσας εργασίας και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

Chapter 3

The High Granularity Calorimeter

In this chapter the motivation behind the use of the HGAL will be discussed. Furthermore the principles of operation as well as technical details regarding the detector design will be presented.

3.1 The High Luminosity LHC era

During the lifetime of the LHC various upgrades will take place (See Figure 3.1) in order to reach its goals in terms of the physics program. One of the biggest upgrades will happen during the Long Shutdown 3 (LS3) in the years 2023 - 2025. After this upgrade, the accelerator will be replaced by the High Luminosity LHC (HL-LHC). This faces a great challenge for all the detectors at CERN since the experiments will take place under extreme conditions. In response to this CMS plans a series of upgrades to most of its detectors in order to be able to withstand these conditions. One of the upgrades is the replacement of the endcap calorimeters which will be discussed in this chapter.

The two major reasons that force CMS to replace its calorimeters are the radiation damage and the pileup. As mentioned before, the endcap part of the detectors is the one taking the biggest doses of radiation. During the HL-LHC operation the endcap calorimeters will be taking doses far greater than the ones they were designed for. The endcap region, will suffer from a dose up to 1 MGy and 10^{16} n/cm² (See Figure 3.2).

LHC Schedule: The Big Picture



- *The HL-LHC running starts in 2025 and continues beyond LS4 until 2035*

Figure 3.1: Schedule of the LHC operation. Every 3 years of operation the accelerator stops for 2 years (LS) for upgrades. During the LS3, the accelerator will be replaced by the HL-LHC.

Pileup is defined as the phenomenon under which two or more particles collisions happen during the same beam crossing and hit the detector at the same time. In the HL-LHC where the luminosity is high this can lead in significant loss of the detector’s resolution. There are three kinds of pileup depending on the time that the particles hit the detector. The in-time pileup (IT) refers to particles from separate events hitting the detectors. This type of pileup leads to associating particles from different events to the same event. The out-of-time pileup (OOT) can be separated in to two categories. The early out-of-time refers to energy left in the calorimeters from previous events and the late out-of-time pileup refers to energy from later events. This phenomenon, leads to wrong energy measurements for each particle.

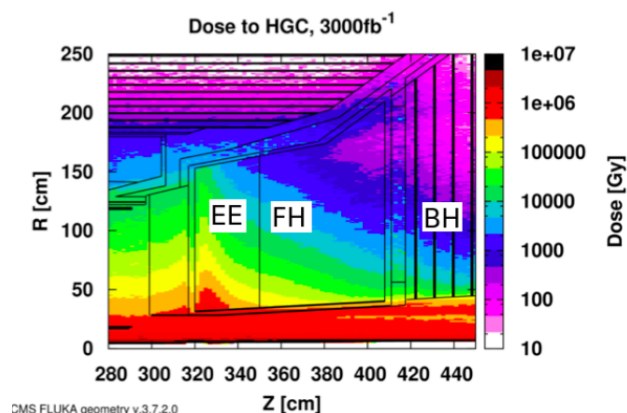


Figure 3.2: Diagram of the expected radiation doses for the CMS endcap during the operation of the HL-LHC.

3.2 The detector design

After the HGCal upgrade all the endcap calorimeter will consist of one detector in contrast to the 3 detectors that are present at the moment in CMS. The new detector will be divided in three parts (See Figure 3.3). The ECAL Endcap (EE) the Forward HCAL (FH) and the Backing Hadronic calorimeter (BH) and will cover a region of $1.5 < |\eta| < 3.0$.

The EE will be a sampling calorimeter with silicon as the active material and tungsten/copper as the absorber with a depth of $26 X_0$ and 1.5λ . Copper will be mainly used for cooling purposes. For the hadronic part of the HGCal, the FH will also be a sampling calorimeter made of silicon featuring brass absorber with a depth of 3.5λ . In the area of the BH the radiation doses will be analogous to the one that the present ECAL is taking. For that reason the same technology will be used which means that this part of the detector will consist of plastic scintillators with brass as absorber with a depth of 5λ .

The EE and FH will consist of 12 30° sectors which will make up each endcap. The design will consist of a carbon-fibre structure integrating tungsten and tungsten/carbon absorber layers with gaps inside them, where "cassettes" containing the silicon sensors will be inserted. Each cassette will have a 6mm-thick copper plate containing cooling channels. On each side of the plate pairs of hexagonal silicon sensor wafers are mounted on a PCB. The silicon sensors will have an active thickness of 300, 200,

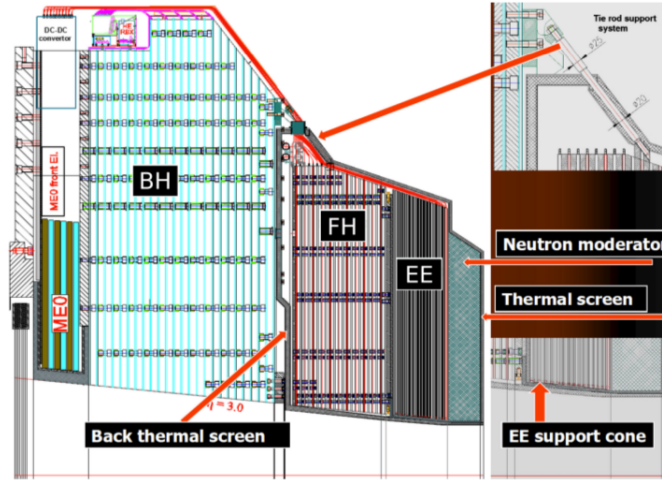


Figure 3.3: Schematic representation of the CMS endcaps after the HG-CAL upgrade. After the upgrade all calorimeters will be replaced by a single detector called High Granularity CALorimeter (HG-CAL). The HG-CAL will consist of three parts, the Electromagnetic Endcap (EE), the Forward Hadronic calorimeter (FH) and the Backing Hadronic calorimeter (BH)

100 μm depending on the neutron fluence expected where they are located (See Figure 3.4) in order to limit each sensors capacitance to 60 pF. The following two tables (See Table 3.1, Table 3.2) contain information about the general design of the EE and FH as well as the for the different types of silicon sensors.

	EE	FH	Total
Area of silicon (m^2)	380	209	589
Channels	4.3M	1.8M	6.1M
Detector modules	13.9k	7.6k	21.5k
Weight (one endcap) (tonnes)	16.2	36.5	52.7
Number of Si planes	28	12	40

Table 3.1: The characteristics of the EE and FH part of the HG-CAL

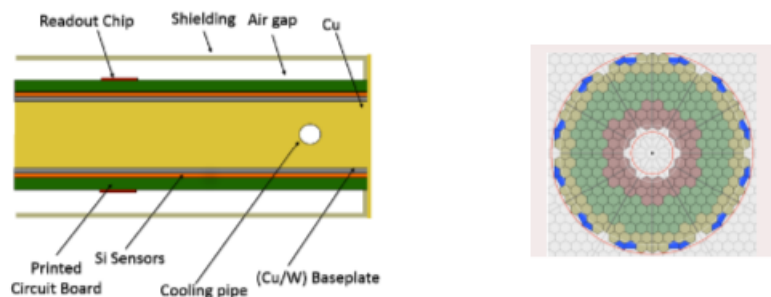


Figure 3.4: The layout of the HGCal sensor modules. On the left, a single sensor design. A copper plate containing a cooling pipe, features a PCB with a silicon sensors on each of its sides. On the right, the full endcap design consisting of twelve separate modules. Each module consists of hexagonal silicon sensors with variable length depending on the neutron flux (See Table 3.2).

With the installation of the HGCal, CMS will use a new approach for calorimetry called particle flow. In the following two sections of this chapter, the principles of operation for silicon sensors as well as the particle flow approach in calorimetry will be discussed.

Thickness	300 μm	200 μm	100 μm
Maximum dose (Mrad)	3	20	100
Maximum n fluence (cm^{-2})	6×10^{14}	2.5×10^{15}	1×10^{16}
EE region	$R > 120 \text{ cm}$	$120 > R > 75 \text{ cm}$	$R < 75 \text{ cm}$
FH region	$R > 100 \text{ cm}$	$100 > R > 60 \text{ cm}$	$R < 60 \text{ cm}$
Si wafer area (m^2)	290	203	96
Cell size (cm^2)	1.05	1.05	0.53
Cell capacitance (pF)	40	60	60
Initial S/N for MIP	13.7	7.0	3.5
S/N after 3000fb^{-1}	6.5	2.7	1.7

Table 3.2: The characteristics of the design of the silicon sensors consisting the HGCal

3.3 Silicon Detectors

In this section, the properties of silicon will be discussed as well as how they can be used in the development of particle physics detectors.

3.3.1 Semiconductors

Silicon as a material is a semiconductor. Semiconductors as their name says, are materials that are in a state between conductors and insulators. In general, materials are divided into three categories, conductors, semiconductors and insulators, depending on the distribution of their energy levels. This distribution consists of three parts which are called bands, the valence band, the conducting band, and a forbidden band. What is called forbidden bands is actually the gap between the conducting and valence bands, where since there are no energy levels there, no electrons can occupy that area. In Figure 3.5 the bands for the three type of materials that can be found in nature are presented. Electrons in the conducting band are free to move so they take place in the conduction of electricity. To the contrary, electrons in the valence band are bound to the atoms and can't move freely.

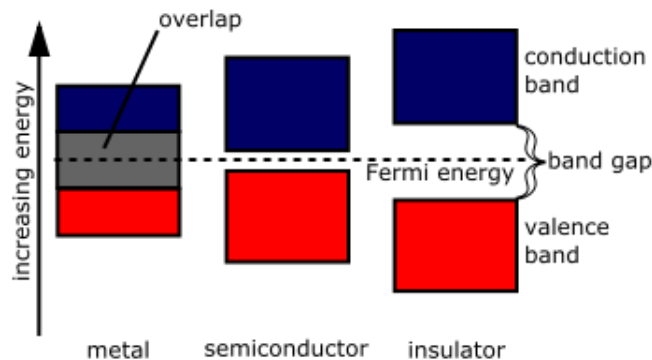


Figure 3.5: Band structure for the three types of materials in nature metals, semiconductors and insulators.

In insulators, the gap between the valence band and the conduction band is too big which means that it is very difficult to move an electron from the valence to the conduction band that is why it is very difficult for insulators to conduct electricity or heat. On the other hand, in conductors

these two bands overlap so even the thermal energy that electrons have at room temperature is enough to move electrons between bands. As illustrated in Figure 3.5, in the case of semiconductors there is a gap between these two bands but it is very small. This means that even in room temperature some electrons can make the transition. However only few electrons make it so the current generated by the thermal movement of the electrons is negligible.

In a semiconductor, the current is generated from the movement of electrons and holes. As discussed above, in room temperature an electron can move from the valence band to the conducting band and this procedure leaves an empty space that was previously occupied by the electron. This empty space is called a hole. An electron from a neighbouring atom can occupy this empty space. This procedure can happen recursively resulting in the hole moving. Holes can be considered as positive charge carriers which move in the opposite direction from the electrons creating a current.

The procedure described above will result in a very small current inside the semiconductor material since the concentration of electrons and holes is very small compared to the number of atoms. In reality, the semiconductors used in all technological applications are enriched with electrons or holes by putting impurities in the original semiconductor material. This procedure is called **doping** and can be done in two ways.

A semiconductor's atom has 4 electrons in its outer shell all of which are used to form bonds with neighbour atoms. By inserting elements that have 5 electrons in their outer shell, an excess of electrons is created in the material. This is done since the inserted element will use the 4 electrons to form bonds with neighbouring semiconductor atoms and will have one electron free to move. This is called n type doping and the material is called n type semiconductor since the charge carriers created are electrons which have negative charge. By inserting an element with 3 electrons in its outer shell, excess of holes is created. The newly inserted atom will form three bonds with neighbouring semiconductor atoms using its three electrons. This leaves the neighbouring semiconductor atom with an unoccupied bond. At room temperature an electron from a near atom can occupy this bond creating a hole. This type of doping is called p type doping and the material create p type semiconductor since the carriers have positive charge

3.3.2 The pn junction

One of the most used apparatus featuring semiconductors which can also be used as a particle detector is the so called pn junction. A pn junction is a p type semiconductor in touch with an n type semiconductor.

When the two pieces of semiconductor come together, electrons from the n type semiconductor move to the p side and holes from the p type semiconductor move to the n side. During this procedure, in the middle of the junction, an area is created where there are no charge carriers. In this area there are only positive and negative charged impurities. This part of the junction is called the depletion region. The procedure continues until equilibrium is reached. The charged impurities create an electric field which acts as a barrier and does not allow more carriers to move. At that point equilibrium is reached and the junction consists of 3 areas. The p type material, the n type material and the depletion region (See Figure 3.6).

By applying voltage to the junction, the depletion region can be altered in terms of the width as well as the field that it produces. By applying a forward bias to the junctions which means positive voltage to the p region and negative to the n region, the depletion region becomes smaller as well as the field it produces. This means that current can flow through the junctions. By applying a reverse bias, the depletion region becomes bigger and no current can go through the junction.

Pn junctions are widely used as particle detectors especially in track detectors. If an electron/hole pair is produced in the depletion region, they will drift in opposite directions where they can be collected at the ends of the junction and identified as a particle that passed through the junction. But for the junction to be used efficiently as a detector it must be used in reverse bias. This is done for two reasons. First of all the depletion region has to be as big as possible in order to take advantage of the full area of the junction. Secondly if the electric field of the depletion region is not high enough, small current runs through the junction which is called leakage current. In order to identify particles efficiently the leakage current must be as small as possible in order to collect pairs that only come from incoming particles.

By using other semiconductor configuration, like pnp or npn other attributes can be achieved. The principles of operation are based on the what was presented in this section for the pn junction. Another commonly used setup is putting together a heavily doped p or n region with one that is

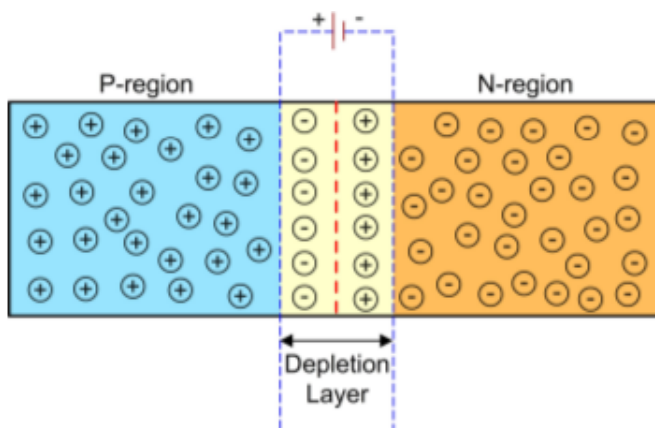


Figure 3.6: A pn junction after equilibrium has been reached. In p and n regions \pm signs, represent charge carriers holes and electrons respectively. In the depletion region the \pm signs represent impurity atoms that are positive and negatively charged since electrons/holes have been stripped from the atoms.

not so heavily doped which is written as p^+n or n^+p . This setup alters the properties of the depletion region, by shifting it towards one part of the junction or the other.

3.4 Particle Flow Algorithm

As mentioned above, by choosing to build and use the HGCal CMS is using a new approach to calorimetry which is called Particle Flow Algorithm (PFA). On average, a typical jet consists of 60% charged hadrons, 30% photons and 10% neutral hadrons. The typical approach in calorimetry, which is the one used at the moment in CMS, is to reconstruct all hadrons in the hadronic calorimeter. Due to various reasons (See Chapter 2) the hadronic calorimeter suffers from poor resolution which in turn limits the overall resolution of the detector.

The idea behind particle flow calorimetry is to use the part of the detector with the best resolution to detect each part of the jet. The detector with the best resolution is the tracker so practically PFA extends tracking in calorimetry by taking into account that all charged particles can be detected by the tracker. By using information from both the tracker

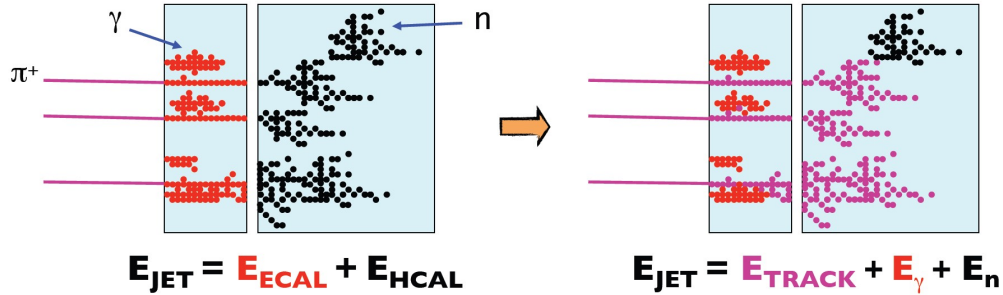


Figure 3.7: Example of the two different approaches in calorimetry. In the first approach (right) particles' energy is measured solely in the calorimeters. In the PFA approach the tracker also contributes in the energy measurement, improving the resolution of the detector.

and the ECAL, PFA identifies the charged particles that are part of the jet and removes them from the particle cluster. Then the neutral particles are only identified by the HCAL so only an average 10% of the whole jet energy is measured by the HCAL improving a lot the overall resolution of the detector (See Figure 3.7). Here the granularity of the calorimeter plays a very important role since in order for the PFA to be able to remove the charge particles from the cluster each particle has to be identified and reconstructed separately. This means that the segmentation of the detector has to be so high in order to distinguish each particle in the shower.

The performance of the PFA depends greatly on the on the so-called confusion. Confusion refers to cases of cluster mismatching and it is separated into two categories (See Figure 3.8):

- **Cluster Splitting:** In this case, only of fraction of the energy deposited in the calorimeter is associated with a track and the remaining part of the cluster is identified as a neutral hadron. At this case, the energy is counted twice, once through the track energy and secondly through the wrongly assigned neutral cluster (See Figure 3.8 (a)).
- **Cluster Merging:** In this case the cluster of a neutral particle is really close to one of a charged particle. In the reconstruction procedure these two clusters are merged and the energy of the neutral cluster is missed which leads to loss of energy (See Figure 3.8(b)).

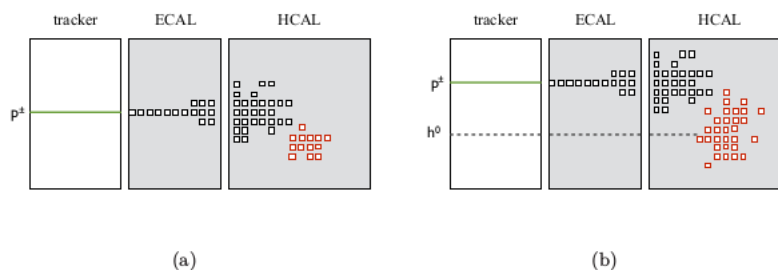


Figure 3.8: Example of cluster mismatching in Particle Flow Algorithm. In the first case (Figure (a)), only a fraction of the energy deposited in the calorimeter is associated with a track and the remaining part is identified as a neutral hadron. In the second case (Figure (b)), two clusters are merged and the energy of the neutral part is missed.

The general procedure followed during the jet reconstruction from the particle flow algorithm illustrating all the necessary steps can be seen in Figure 3.9. Once the cluster has been identified, information from the tracker is used. The part of the cluster that matches a track is identified as a charged particle and is removed from the cluster. Then the part that is left in the electromagnetic calorimeter signal is produced purely by photons since they are not charged and they left no signal in the tracker. Finally what is left from the cluster after the removal of the charged particles and the photons represents charged particles.

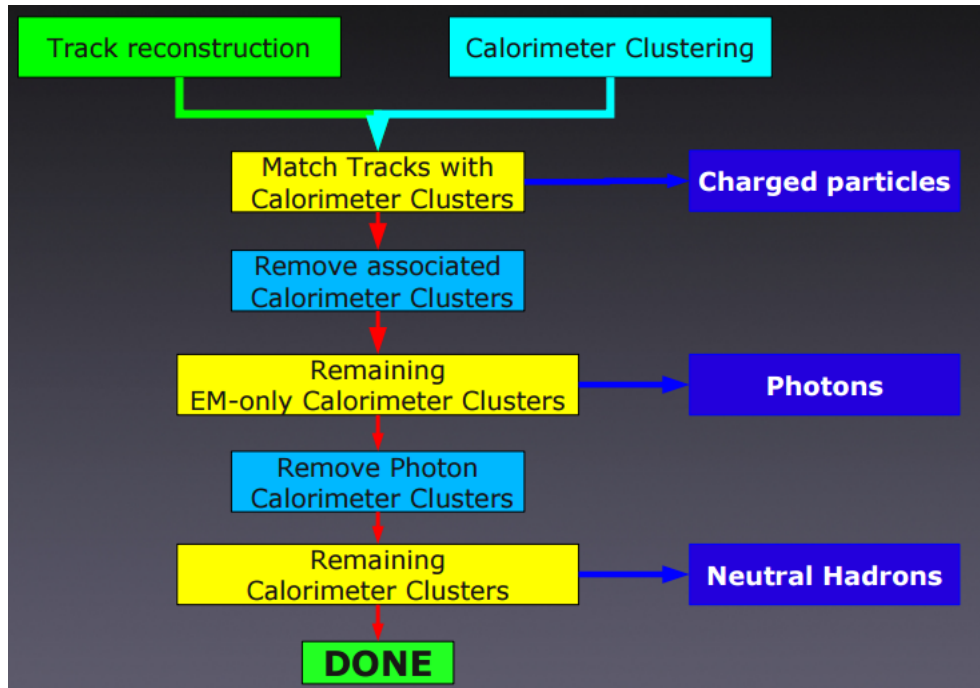


Figure 3.9: General procedure of the Particle Flow Algorithm. Once the cluster is formed then information from the tracker is used. The part from the cluster that matches the tracker information is identified as a charge particle. What is left in the electromagnetic calorimeter signal is identified as photons. Finally what is left is a neutral hadron

Chapter 4

Control Systems

This chapter focuses on the description of the concepts used in the design and implementations of control systems such as the Detector Control System (DCS) for the High Granularity CALorimeter (HGAL) as well as the tools used at CERN and in this project for the development of systems of this type.

4.1 SCADA systems

This type of systems (DCS) belong in the category of Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) systems. SCADA as a term is widely used for describing systems that monitor and control remote processes. The part referring to data acquisition should not be misinterpreted as the data acquisition in the context of a physics experiment, which refers to the data taking for physical purposes. The term refers to the reading of values regarding the monitoring of the system, which in most cases is done in a very low rate compared to a data acquisition (DAQ) system. That is why in many cases SCADA systems are also called SLOW Control SYstems (SLOCSY). These systems are used extensively in many fields apart from physics experiments. Some examples are factories, pipelines, airports and many more. In general a control system consists of three layers:

- The **supervisory layer** which is responsible for visualizing, controlling, sending commands as well as gathering data from the processes.
- The **front end layer** that is directly connected to the hardware and reads signals from it sending them to the supervisory layer.

- The **communication layer** that is intermediate layer between the supervisory and the front end layer and is responsible for the communication between the other two.

SCADA systems are usually not complete control systems but are software toolkits used in order to develop the supervisory layer of a control system and also have the ability to connect to the front end layer. As the name states, a SCADA system should be able to perform three individual but complementary tasks. Supervise the process by knowing its exact state at all times. In order to do that, the system should be able to communicate with the hardware and exchange information with it. Additionally it should control the system by sending commands to it in order to change its state. Finally the system should acquire data from the process in the context of determining the systems state. As we have already mentioned data acquisition for analysis purposes is a task for a DAQ software.

4.2 The supervisory layer

A SCADA system should meet the following requirements:

- Collect data in order to be able to determine the state of the system at any time.
- Monitor the system at all times and store the information gathered from the monitoring procedure to a database.
- Flexibility in the sense of programming and configuring supervising procedures.
- Having a user friendly Graphical User Interface (GUI) so that the system can be easily interfaced by the user/operator.
- Alert and reporting mechanism so that the user can be informed of emergency situations
- Being able to interact with external applications

A more detailed representation of the structure of a control system can be seen in Figure 4.1. The data collection needs of the system are met by what is called the runtime database. The runtime database is responsible

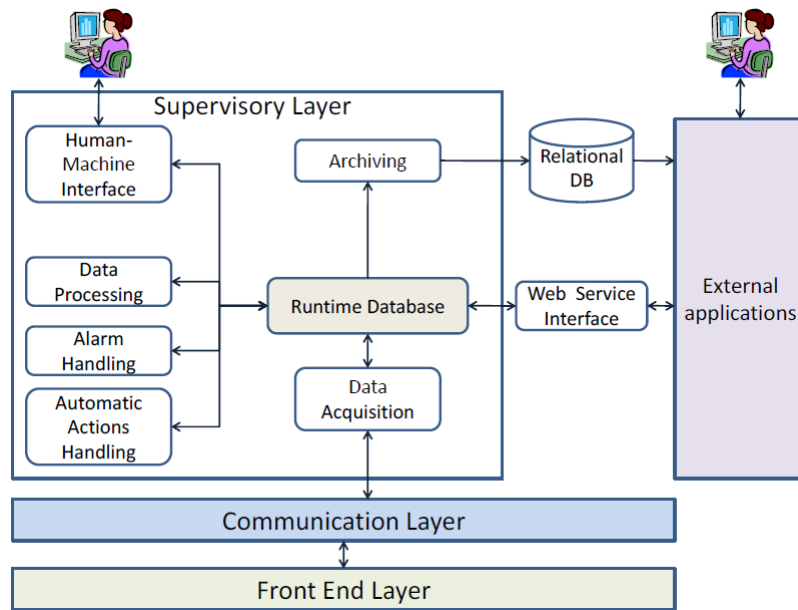


Figure 4.1: A schematic representation of a control system. The various components of the Supervisory layer can also be seen.

for holding all the information about system structure updating it constantly and having it accessible to all the processes that require access to this information. Each element of the system that can hold data is represented as a point. The database must provide an identifier, a timestamp and a quality flag for each one of these data points as well as holding the last value of this point.

The database is updated in an event driven way, meaning that the value of a point is updated only when an event (i.e. a value change) occurs. On top of that there is a smoothing mechanism which provides a definition of what an event is for this particular point. Its most simple form is old/new comparison but has the possibility of more complex filtering by defining a deadband or a time interval.

In addition to the runtime database, the system must have a way to store all the collected data in order to determine the evolution of the process because the runtime database can only store the current value. This is usually done through a relational database. The contents of this database are used for offline analysis, so access speed is not a issue. The features of the runtime database (events/smoothing) are also used here in order to

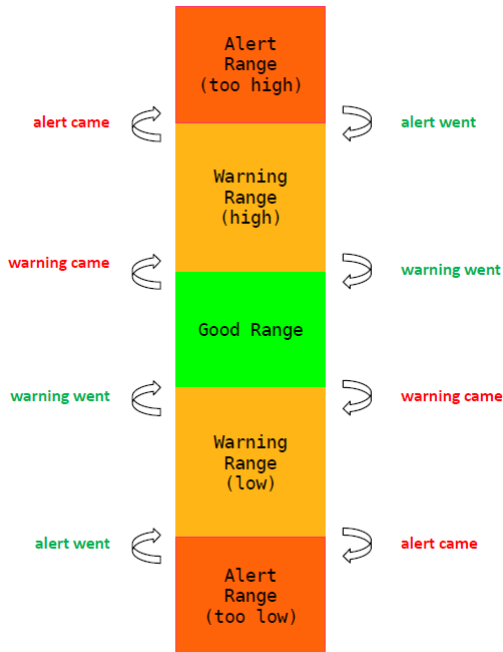


Figure 4.2: Example of the alarm ranges defined for a data point. Alerts are defined by specifying valid ranges for the values of data points. Each of the ranges is assigned with a priority, with the normal range having priority 0. The alarm mechanism is implemented with transitions between the defined ranges.

control the amount of stored data.

Another part of the supervisory layer is the so called Human-Machine Interface (HMI) which exposes the state of the system to the user and allows him to interact with it by sending commands to alter its state acting as an middleman between the operator and the process. The interface should be simple, user-friendly, and responsive. It must be designed in such a way that increases the operators confidence so that human errors are avoided. On top of that the actions that the user performs should be straightforward and he should be informed for the state of his actions when the time they take is longer than a few seconds.

Following these concepts, schematic representations are preferred over text e.g. a coloured LED is better than a text field in indicating the state of a machine. Color conventions should also be used so that the information displayed to the operator is transparent. The use of trends displaying the

evolution of the process is also useful in order to allow the operator to predict and identify its evolution.

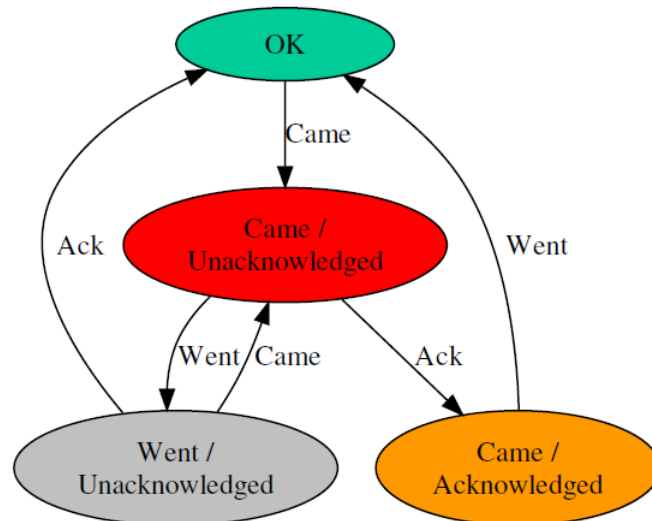


Figure 4.3: A schematic representation of all the possible states and transitions of the alarm mechanism of a control system. Two types of transitions exist the CAME and the WENT. CAME indicates a transitions from a good state or a state with low priority to a state with higher priority while WENT indicate the opposite. Most alerts have to be acknowledged. If an alert WENT before the operator acknowledged it, it is indicated as a WENT/Unacknowledged alert.

Apart from that, there should be role distinction meaning that experts and normal users/operators should have access to different kind of information. An expert will be able to distinguish the state of the system in a complex interface or identify a pattern in a complex trend allowing him to determine the current status of the process. In addition the available commands should be restricted for a normal user while an expert should have more freedom to perform actions that are more invasive in the procedure of the monitored process, allowing him to identify and/or fix issues.

Another key feature for the SCADA system is the alarm handling mechanism. Alarms are notifications that are used to inform the user for an abnormal behavior of the process so that he can intervene and restore the activity. Alerts are defined by specifying valid ranges for the values of the system's data points (See Figure 4.2). Each one of the ranges is assigned

with a priority number indicating the severity of the value. The normal range of the value has a priority 0. The alarm mechanism is implemented with transitions. Two types of transitions exist, the CAME and the WENT transition. CAME indicates the value of a data point shifted from a good state or a state with low priority to a state with a higher one. In contrary the WENT transition indicates the that the value changed to a state with lower priority number. Most of the alarms must be acknowledged by the operator. This implies that if an alarm CAME and WENT before the operator acknowledged it, the system stays in alarm state by is indicated as a WENT/Unacknowledged so that the information about the alarm is not lost. A schematic with all the possible transitions can be seen in Figure 4.3

Finally the SCADA system should be able to communicate with external applications which mainly means that is should expose its data to other types of software. A reason for doing this is that other types of software will be used for manipulating the data and the SCADA will be only responsible for monitoring and controlling the process. One way of archiving this is by saving data in a relational database which can be accessed by web tools.

4.3 The front end layer

The front end layer is the part of the control system that is directly connected to the hardware. The hardware can consist of general-purpose devices such as condition monitoring sensors (temperature, pressure, humidity etc.) as well as application specific devices like power supplies, pipes, pumps and many others. Apart from that most control systems feature another type of device that are called Programmable Logic Controller (PLC) and are very robust, low level computers. They work by making calculations based on input signals coming from sensors and outputting the result of the calculation to the hardware. Because of their robustness they are widely used for safety purposes significantly decreasing the response time of a safety action. Also in very complex systems during an emergency the appropriate command might not be straight forward for the operator and the use of PLCs helps in avoiding human error.

4.4 The communication layer

As it has already been mentioned, this part of the control system is responsible for ensuring the communication between the hardware (front-end layer) and the supervisory layer. In the past the software that the supervisory layer consisted of was specific to the hardware that was used for each procedure. This was due to the need of drivers in order to interact with the hardware which made the procedure of creating a generic control system software a very hard task. In the past 20 years there has been an effort to standardize the communication procedure by making it hardware independent and using already protocols such as TCP/IP or UDP/IP. This has led to the creation of the OLE for Process Control (OPC) protocol.

The OPC protocol is a set of standards created together by the hardware and software vendors and acts as a middle man between the hardware and the software. It is based in the client server logic and is actually a translator between two protocols. The hardware vendor is responsible for providing a server which is able to translate commands in a form that the hardware understands. The software vendor has to embed an OPC client in its product so that the communication can be achieved. In this way there is no need for the development of drivers and the SCADA developer can communicate with the hardware by simply configuring the OPC server. In addition to this a set of other communication protocols are used especially when it comes to PLCs. Some of these are the Siemens S7 as well as Modbus. Especially in CERN also CAN buses are used due to the extreme conditions under which the hardware has to operate. In strong magnetic field and high rate radiation environment the use of Ethernet protocols is impossible which is why CAN protocol is used. Finally, in many cases control systems are made of many smaller individual systems that need to communicate with each other. One example is the communication between the LHC and the detectors where the state of each of the detectors depends on the state of the accelerator. For that reason the accelerator needs to inform the other systems of its state. A protocol called DIP (Data Interchange Protocol) which was developed at CERN is used for this purpose.

4.5 WinCC_OA SCADA Toolkit

At the end of the 90's CERN chose the product it would use for the development of control systems. A wide survey of all the available commercial and open source products was conducted. As a result the PVSS-II¹ SCADA toolkit which was provided by the Austrian company ETM was chosen. After that ETM was purchased by Siemens which renamed PVSS into WinCC_OA² and is now the vendor of the toolkit. In the following sections, the structure of WinCC as well as a set of factors that played a major role in the selection procedure some of them are listed below.

4.5.1 Main Features

One of the main features on WinCC that made CERN select it as the tool to develop its SCADA system was its ability to scale. Many of the other available SCADA solutions have a limit in the number of items they are able to control. WinCC has no limit since it offers the ability to develop a distributed system. A distributed system is not one system but a set of individual systems which are connected to each other in a hierarchical way forming a complete control system. This allows for the computational load to be divided and makes the design and operation of very large control systems possible. Extensive tests were made in CERN in that direction in order to test the limit of WinCC. They found that it was possible to connect more than 100 systems in order to form one very large distributed system. The way distribution is implemented in WinCC is that all connected systems are automatically updated when something changes in one of them. This allows the user to modify and develop further tools for one of the systems since it is ensured that if one component is deployed in one of the systems it will not interfere with the structure of the whole system.

Another advantage of WinCC is its runtime database. WinCC comes with an internal database which consists of data points (DP) and is an abstract structure of data (See Figure 4.4). A data point is a structure made of data point elements (DPE) which can hold values. Each data point is an instance of a certain type, called data point type (DPT) (See Figure 4.5). The DPT defines the general structure of the data point as well as the name

¹PVSS is an acronym for ProzessVisualisierungs und SteuerungsSystem, which means Process Visualization and Control System

²Short name for WinCC Open Architecture

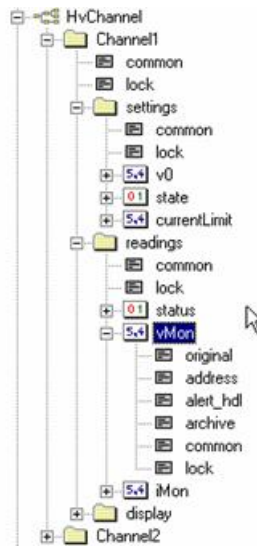


Figure 4.4: A schematic representation of a data point. A data point is an abstract structure holding data. It consists of data point elements that are of a certain type and have a value. Each data point is an instance of data point type which specifies its structure.

and type of its elements. Data points can be used to simulate devices that are connected to WinCC but can also be used for holding data for more abstract concept.

The advantage of using this philosophy for the runtime database is that data that are associated with a device can be grouped together and are not held in separate variables as it is done in other SCADA systems. This way the reusability of code and components which are developed for this type of device is enabled. Although WinCC is not object-oriented, the structure of its runtime database can be thought as this. A type which represents the structure of the data is created, then instances of this type which correspond to actual devices are being created. Apart from that, the ability to create generic user interface components (reference panels) is present, meaning that graphics can be designed for a data point type and instantiated for each data point.

Another advantage of WinCC is that it can be easily extended through the native language that the toolkit provides. This programming language is called ConTRoL (CTRL) and it has been used at CERN to develop a set of libraries (See Section 4.6) that can be used as a basis for the design

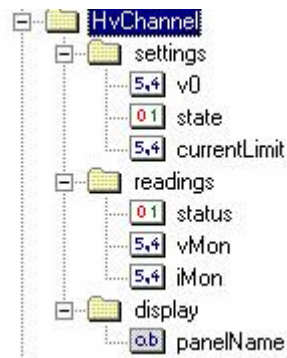


Figure 4.5: A schematic representation of a data point type. Data point types specify the structure of each data point that is created and is of that type. They are like blueprints and are used to model devices in an abstract data point of view. For example a power supply can be specified as a data point with two values, representing the voltage and the current it supplies to the connected devices.

of control systems. In addition, there is a custom WinCC Application Programming Interface (API) which can be used to write WinCC managers and drivers³ making WinCC fit the needs of the user.

As it was already mentioned, WinCC comes with a native programming language. CTRL is a C-like language and is used for creating scripts as well as user interfaces (panels). The advantage of this language is that it is user friendly and easy to learn allowing new users to quickly get familiar with the toolkit and being able to contribute in large projects quickly. In addition to this, people that are not that familiar with programming as software engineers are can develop control systems easier than in other SCADA toolkits.

Finally, another major advantage is that WinCC, in contrary to most SCADA products, is multi-platform, offering the same functionality in Windows and Linux. This is a very important feature, since Linux is very popular in the scientific community and many software like DAQ are usually developed and operated under Linux. This allows running the DCS (or some part of it) and the DAQ software under the same machine. Although this is not entirely true, since some of the communication protocols like OPC or in general external application force the use of Windows, all the

³The concept of managers and drivers in WinCC will be explained in the next section.

native WinCC functions can run in both operating systems.

4.5.2 Structure

WinCC is a SCADA toolkit which means that it is not a control system on its own but rather a set of tools that can be used to build one. It provides most of the features needed to create a robust SCADA system, like a well structured runtime database, modularity and scalability as it allows to connect many individual projects to create a bigger one. The main philosophy behind its architecture is modularity. Each function is an independent process which is called a manager. Managers work together by communicating with each other forming the whole system. A figure of the structure of a WinCC project with all the individual managers can be seen in Figure 4.6

The core of the toolkit is the Event Manager (EV). Only one event manager is allowed per system and it is responsible for the communication between all managers as they can not directly access each other. It operates by receiving and evaluating inputs (events) from other managers and responding to them by distributing these events to other managers. It contains the current image of the system (runtime database) in memory and it is the way all the other managers have in order to access the system's image. Data points can be connected to a manager and receive values from the hardware through it or send values. Also a manager can subscribe to a specific data point and receive notifications every time the value of this data point is updated. Finally managers can set or read values of data points by accessing it through the EV.

Another very important manager is the database manager (DM or DB). This manager reflects the current status of the monitored process by keeping in memory the current image of the database. While the EV holds the structure of the database, this managers keeps the values of the particular elements in the database which at the end determine the status of the project. This manager also keeps in memory the latest alarms so that a complete picture of the system is readily available to the other managers. Additionally it is responsible for archiving the data acquired from the monitored process. For that reason WinCC comes with another highly optimised internal RAIMA (file based) database which can be used for long term value archiving. For the archiving of the values WinCC also provides the ability to use a relational database instead of the RAIMA. To achieve

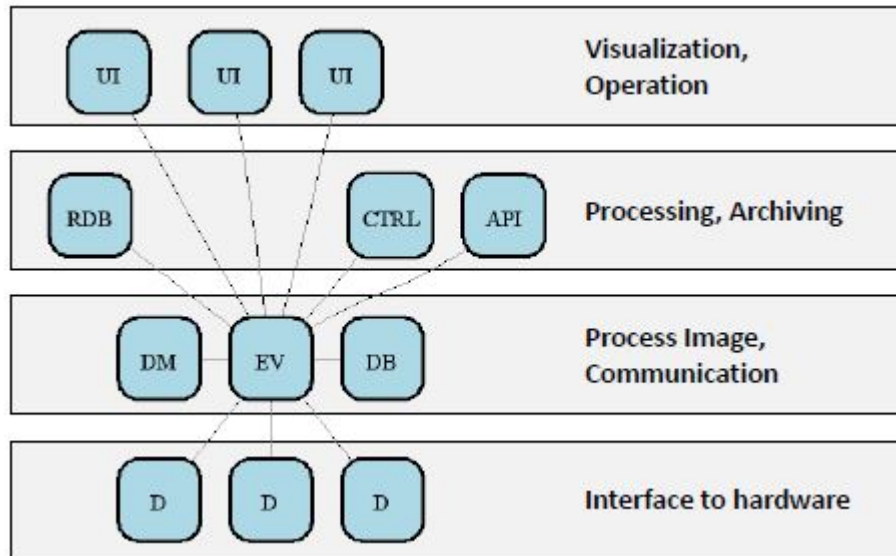


Figure 4.6: The structure of a system built with WinCC_OA. Each part of the system is an individual process. All the processes communicate together to form the entire system providing great modularity.

that a Relational DataBase (RDB) manager is available which was highly customized and optimized by CERN.

User Interface (UI) managers are responsible for running the HMI processes. They work by executing panels and projecting them to the screen so that the user can have a graphical representation of the monitored process. A special panel that is called Graphics Editor (GEDI) is also available. This panel is used for the development of other panels and various graphical objects. Control managers (CTRL) work together with UI managers by running scripts in the background written in WinCC's native language CTRL.

As it was mentioned before, a major advantage of this toolkit is that it comes with an API allowing users to develop their own custom managers that fit their needs. The API manager is the manager that allows WinCC to run custom user code written in C++.

In order to interface the hardware WinCC provides a special type of managers which are called drivers (D) and are responsible for the handling the different communication protocols in WinCC. The standard ones support protocols such as TCP/IP, Modbus, ProfiBUs, CANbus, OPC and

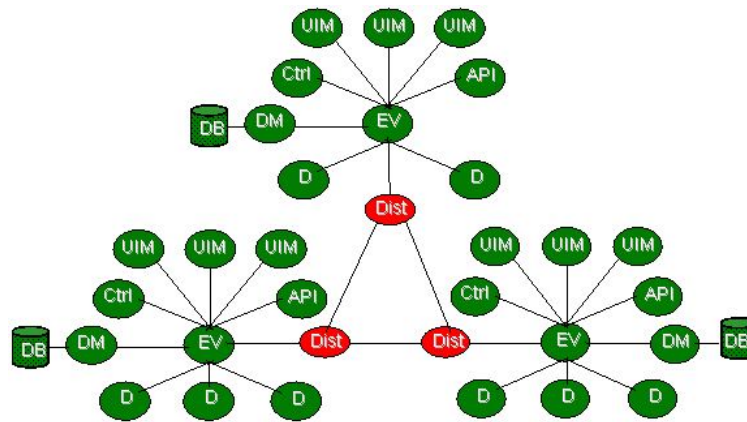


Figure 4.7: Picture of a distributed control system. Each WinCC system, features a distribution managers. This manager can be used to connect WinCC systems together to create a large control system.

others. On top of that the user has the ability to write its own drivers and extend the poll of hardware that can be integrated in the system. At CERN drivers have been developed for the protocols DIP and DIM which were created at CERN.

Through WinCC different kind of systems can be created. The two most important ones are distributed and scattered systems which allows WinCC to have such a good scalability. A scattered system is one that has no event or data manager. This can be achieved because WinCC allows a project to connect to a remote event/data manager so scattered systems are systems that just run graphics and ctrl scripts by have no system image (runtime database) but they rely on data provided by other systems. A distributed system (See Figure 4.7) can be connected with other control systems and together they form a bigger one. In order for this to be achieved, WinCC provides the Distributed Manager (Dist). The data of both systems are available at each time and can be accessed by adding the system name before the data point name so that the EV knows where to look for the data. This way, division of concerns can be achieved by splitting the responsibilities between systems.

4.6 Joint Control Project Framework

The Joint COntrols Project, was created in order to provide the tools for all the experiments at the LHC to develop control systems using a common basis. During the LEP experiments it was made clear that there was lack of standardization in terms of hardware as well as in terms of software. This made the integration and the maintenance of the various projects a very hard task. As a result it was decided that CERN would rely as much as possible in commercial products for hardware and software. The goal of the framework was to create a set of tools so that the effort for developing and maintaining and integrating projects would be reduced to minimum. The framework is a set of libraries user interfaces and other components that can be extended by the developers. This means that all the basic tools to create a control system are already available and since all systems are built using the same basis they can easily be integrated. The framework is built as a set of components each one having a different functionality allowing the developer to use the ones that he needs in order to develop his system. It provides a higher layer of abstraction and the developer interacts with the framework and not with WinCC directly. Although interaction with WinCC is also available since not all functionality is covered by the framework.

4.6.1 Hardware and Logical view

The framework comes with a built in way to organize the connected devices called Device Editor Navigator (DEN). The organization is composed of two parts, the hardware and the logical view (See Figure 4.8). The hardware view is mandatory while the logical is not. The hardware view corresponds to the actual configuration of the hardware (power supplies, crates, mainframes etc) and the devices connected to them. It is designed in such a way that corresponds to the actual hierarchical connection of the hardware (mainframes contain board that contain channels). The framework also provides built in structures (DPT) to represent the most common hardware used in the experiments so that the development of different structures (DPT) for the same hardware is avoided because it could result in conflicts while integrating various systems. The logical view is implemented by providing an alias to the data points contained in the hardware view and is used in order to organize the detector in a more user

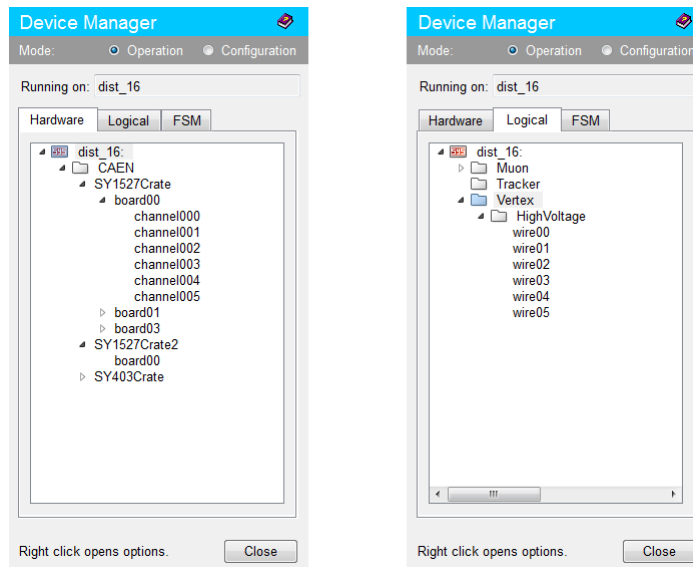


Figure 4.8: The JCOP framework Device Editor Navigator (DEN)

friendly way. A mainframe name may not be very meaningful to the user, but the part of the detector that this piece of hardware controls is much more straightforward for the user in order to operate the detector.

4.6.2 Finite State Machine

The best way for implementing large control systems is through the Finite State Machine approach. As the name states, through this approach the whole system is represented as a machine which has finite number of states in which it can be. This model is used in many fields and its definition and implementation may differ from field to field. The JCOP comes with an native component which allows to use the finite state machine model for building a control system. The tool acts as a bridge between the SCADA system and the State Management Interface (SMI++) which is a framework for building FSMs and was developed at CERN for the DELPHI experiment at LEP.

The SMI++ framework provides the ability to create the hierarchical representation of the experiment in order to control it. The structure is created as a tree of nodes (parent-children). Each object of the hierarchy (node) is a domain which is a separate process responsible for managing its

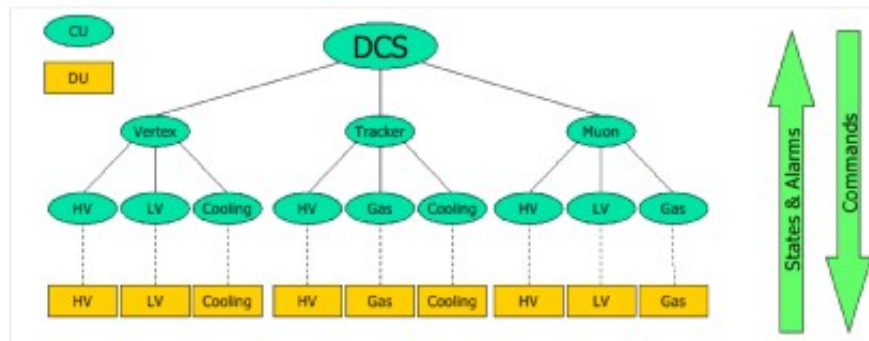


Figure 4.9: A sample FSM diagram created using the JCOP framework component. Bottom nodes represent actual hardware while the intermediate ones are used to represent the process in a hierarchical way. In the FSM approach, states propagate from bottom up while commands the other way around.

sub-nodes. The lower nodes represent the actual hardware and are not a separate process but operate within the parent node in which they belong. The inner nodes are not actual hardware but provide an abstract way of representing the experiment. In the SCADA part, the same structure is implemented through data points. The FSM data points that correspond to devices are directly connected to the SMI++ and are used to calculate the state of the FSM. This two processes interact via the WinCC API. All the SMI⁴ domains are connected and form the whole experiment which can be controlled by giving commands to the top (supervisor) node. During the operation of the FSM, states are propagated from the lower part upwards while commands move the other way around (See Figure 4.9).

The JCOP tool for the FSM implementation offers three types of nodes. The type specifies among others the place that each of the nodes has in the FSM hierarchy.

- **Control Units (CU)** are internal nodes, used to represent the hierarchical tree. Each CU runs as a separate SMI domain.
- **Logical Units (LU)** are also internal nodes, but they run within the process of the CU they are included.

⁴SMI++ refers to the framework used to build the FSM, while SMI refers to processes that are written in the SMI language provided by the SMI++ framework.

- **Device Units (DU)** they are the "leaves" of the tree, they represent a device and they are connected to a WinCC data point that is directly connected to a device.

Apart from this, each node has another type called FSM type that defines the possible states of each node and the actions that can be performed in each of the states. As it was already mentioned, the DUs are directly connected to the SMI and are used in order to compute the state of the FSM and also to send commands from the FSM to the actual hardware in order to operate the experiment and change the state of the FSM. For each one of the types an initial state is declared. On top of that, a set of rules is used in order to compute the new state and transition to it. The actions are implemented as a sequence of commands and can be sent to all children of a node or to all children of a specific type. Each child executes the action and then reports back its state forcing the parent process to re-compute its state.

A large experiment, such as CMS, is composed of different sub-detectors and partitions and in order to operate smoothly, a flexible partitioning mechanism is needed. This means that different parts of the experiment need to be operated separately or even part of the experiment should be excluded at a given moment.

In order to cover this need, the JCOP tool uses the concept of ownership in the FSM. Each part (domain) of the tree has an owner and the operator can own the whole tree or part of it. A shared mode is also available in which the operator takes control of the whole tree and can then share part of it with other users. While this mode is active, he is still the owner but someone else can also send commands to this part of the tree. Nodes can also be excluded from the tree meaning that they are not taken into account in the computation of the FSM state and commands are not sent to them. Only the owner can exclude or share a part of the tree. On top of that, LUs and DUs can be disabled which has the same effect as excluding a node. The difference is that since they are not a separate domain and a different user can not take control of them. They can only be owned by the owner of the CU that is above them in the hierarchy.

Different users can take control of different parts of the tree a feature that is very useful in times of testing or failure. If a part of the experiment is in error state the operator can exclude this part of the tree and an expert can take control of it and debug it. After the expert is done fixing the error, the operator can re-include this part of the tree in the main FSM.

4.6.3 Archiving Database

A very important role of the DCS is to be able to archive data regarding the state of the system e.g. environmental conditions etc. These data are used not only to determine the behaviour of the detector but are also used in order to determine the quality of the data collected from the experiment. If a part of the experiment was malfunctioning at a certain period maybe the data collected can not be used for physics analysis and have to be discarded.

For this reason, WinCC provides an internal database that can be used for archiving. This may be enough for industrial purposes but is not for an experiment as big as the ones that take place at CERN. Instead it was decided to rely on Oracle databases for the archiving procedure. Although WinCC comes with an native RDB manager which allows a system to connect with an Oracle database for the archiving purpose this was not enough for CERN as the amount of data collected from the detectors is huge.

The archiving policy of the CMS experiment is to archive data on change. This means that whenever a change is made values are archived. The other option would be to archive data using a polling mechanism. This means that a value would be archived at a certain time no matter weather its value is changed or not. On top of this, some time interval can be also defined and/or a deadband⁵. These conditions can be applied independently on the data, meaning that if one of them is true values are archived, or all together and archive data when all of them are true.

4.6.4 Configuration Database

In large control systems, such as the one controlling the CMS detector, the settings of the detector have to be changed corresponding to the mode of operation. This means changing the values of the power supplies, the accepted temperatures of a PLC and many more. More over in the event of a failure concerning the DCS PCs, the system has to be up and running within a reasonable time.

⁵A deadband is defined an interval (band) in which no action occurs. It can be an absolute value or a percentage of the value and if the change is lower than it then no change is registered in the system.

To address these issues, JCOP provides a tool which is called the configuration database. The configuration database is actually an Oracle database that is used to store project data in terms of the system's image. This database is able to store two types of data.

- **Static Data** which correspond to the image of the system. This consists of data points as well as addresses, aliases etc.
- **Dynamic Data** which consist of values and alert limits of data points that are connected to the hardware.

When there is a failure, or change of the system image the first type of data is used. This allows to restore a system after failure, since the system image is stored in a database. Also under change (removal/addition) of hardware the database is used again in order to update the current image of the system.

Dynamic data are used to configure parameters of the hardware and are called "recipes" in the JCOP terminology. Recipes are used to change the detector's state from one mode of operation to another (Physics, Cosmics etc), as well as to different states in a particular mode (On, Off, Standby etc.). Apart from the Oracle DB, for the recipes mechanism an internal cache is also provided where recipes are stored in the computer's memory. This ensures that the detector settings are set as fast as possible which is crucial in times when a quick operation is required.

4.6.5 Access Control Mechanism

The framework also includes an access control component which is implemented in the UI level. It is not meant to protect the system from external threats but rather to distinguish the roles of the various users by allowing different actions to each one of them depending on their expertise. This way, mistakes can be avoided by actions performed from unauthorized and not experienced users.

To achieve this, domains are defined corresponding to a part of the system and each one of them has levels of access (e.g. operate, modify etc.). A domain usually represents a part of the system, like a subdetector. On top of that roles are defined (e.g. operator, expert etc.) allowing a set of actions for each role of this particular domain. This way, each user that needs to perform an action on the system, is associated to a role (e.g. ECAL

Expert, HCAL Operator etc.). Users can be assigned to several roles at a time.

Chapter 5

The HGICAL Test Beam Detector Control System

In this chapter, the goals and the design principles of the HGICAL Detector Control System will be described. This chapter can also be used as a user manual for the operators as well as the developers of the control system.

5.1 Introduction

The goal was to develop a system that has the ability to monitor and control the hardware which will be used during the test beams HGICAL detector. On top of that the system should archive the data collected during the operation and also implement some safety actions, like informing the shifter in case of an error and also notifying the experts by a notification system.

The system will be used during the HGICAL test beam which will be conducted during May, June and July of 2017. The target was to design a system meeting the current requirements of the HGICAL team but one also that can be used as a basis to develop a more complex control system. As the development of HGICAL progresses, future test beams will become more demanding requiring the use of more hardware as well as more features from the control system. At the moment the system can monitor and control the high voltage (HV) channels used in the test beam. This is due to hardware restrictions and one of the future updates is to also integrate



(i) CAEN SY1527LC Mainframe



(ii) CAEN A1511B Board

Figure 5.1: Pictures of the hardware that will be used during the HGICAL test beam. On the left the CAEN SY1527LC mainframe, and on the right the CAEN A1511B board.

the low voltage (LV) channels in the monitoring system and if possible the environmental monitoring sensors.

The hardware which will be used during the test beam consists of a CAEN SY1527LC mainframe, a CAEN A1511B board (See Figure 5.1) and the 12 high voltage channels connected to the board. The primary goal is to monitor and archive the voltage (vMon) and the current (iMon) of the 12 channels. A number of other parameter will also be monitored in order to ensure that the hardware is operating properly.

5.2 System Structure

The system depends on the JCOP framework. The core functionality of the framework was used in order to ease the development procedure. The standard mechanisms provided by the framework were taken into account and the whole system is implemented using an FSM. On top of that the framework's access control mechanism has been used. Additionally the data collected by the system will be archived in an oracle database allowing the members of the HGICAL team to access them from anywhere. Finally the whole project is wrapped in a component and can be installed in a WinCC project the same way the JCOP components are installed. This makes the system portable and it can be easily recreated within minutes in any machine.

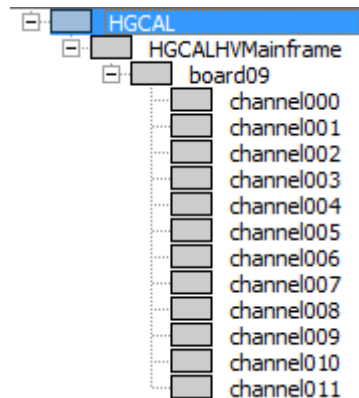


Figure 5.2: The structure of the FSM created for the HGAL test beam Detector Control System.

As it was mentioned above, the whole process is modeled as an FSM which consists of 4 layers (See Figure 5.2). The top node is named HGAL and reflects the state of the whole system. The layers below this node correspond to the state of the actual hardware mainframes, boards and channels. The second layer represents the mainframes, the third one the boards and the fourth one the channels. In Table 5.1, all the FSM layers with their available states and actions are listed.

The system also has an access control feature using the JCOP access control mechanism for the project itself but also for the FSM operation. The mechanism enables or disables features depending on the access level of the user currently logged in. At the moment there are 4 levels of authorization that have been assigned to different users. The most basic access level is the Monitor one. It allows the user with this particular access right to just view the status of the system. After that the Control right, allows for the control of the system which means that the user can change the status of the system by sending commands through the FSM. The Debug level, gives the ability to perform some special commands regarding the use of the hardware and is meant for hardware experts. Finally the Modify right, allows for the actual modification of the system parameters which can change the actual structure and behaviour of the control system. At the moment there are 3 users listed in the system with different access levels for each one of them. The first is the Shifter which has Monitor and Control rights. Then there is the HVExpert user which has also the Debug access level. Finally there is the DCSExpert user which can also Modify

FSM Layer	States	Actions
HGICAL	READY	RESET
	NOT_READY	CONFIGURE
	ERROR	RECOVER
Mainframe	READY	RESET
	NOT_READY	CONFIGURE
	ERROR	RECOVER
Board	READY	RESET
	NOT_READY	CONFIGURE
	ERROR	RECOVER
Channel	ON	SWITCH_OFF
	OFF	SWITCH_ON
	RAMPUP	SWITCH_OFF
	RAMPDOWN	SWITCH_ON
	TRIPPED	RECOVER
	ERROR	RECOVER

Table 5.1: The different states and actions of the the various levels of the HGICAL FSM.

the system. It should also be mentioned that none of these users has the ability to modify the internal WinCC parameters. For that reason another user which is called root exists. This user has the ability to modify the whole system but has no rights concerning the DCS operation (FSM).

5.2.1 System setup

In order to setup the system from scratch a WinCC project has to be created. Although distribution will not be used for this project, it is a good practice to create a distributed project. After this, the JCOP framework installation tool should be exported in the project's directory. In order the system to operate as expected the following JCOP components are required:

- fwAccessControl version 5.2.1
- fwCore version 5.2.1
- fwConfigurationDB version 5.2.0

- fwCaen version 5.2.0
- fwXML version 5.0.2
- fwTrending version 5.2.0

The system also requires some custom CMS components mainly for the setup of the notification system. These components are:

- fwRDBArchiving version 1.1.4
- fwInstallationUtils version 2.1
- CMSfwInstallUtils version 2.2.4
- CMSfwAlertSystem version 1.7.1

After the above components are installed, the installation of the CMSHGICAL component sets up the HGICAL specific options so that the system can operate. This means that it generates the FSM structure, it sets the archiving configuration and connects the project to the archiving database. Finally it sets up the notification and the access control systems. In Figure 5.3 all the required components that the HGICAL DCS needs in order to operate correctly are listed. At the moment, this component (CMSHGICAL) imports the hardware mentioned above. In case more hardware is to be monitored by the system, it should be registered in the project through the device editor navigator. After that a simple re-installation of the CMSHGICAL component will integrate the new hardware in the project.

5.3 System operation

After all the previous steps have been completed, the system is ready for operation. The main panel (See Figure 5.4) consists of a tree like structure which contains all the FSM hierarchy and a main area where the information concerning the FSM nodes like the status and the panel associated with each node can be viewed. On the top right of the panel, the current time is displayed as well as the access control widget through which the user can log in or log out,

At first the main area of the panel is disabled since when the panel first opens no user is connected. In the message area, the user is informed

CHAPTER 5. THE HGAL TEST BEAM DETECTOR CONTROL SYSTEM

Name	Version	Help	Files issues	Delete
CMSHGAL	1.0.0		Not checked	
CMSfwAlertSystem	1.7.1		Not checked	
CMSfwInstallUtils	2.2.4		Not checked	
fwAccessControl	5.2.1		Not checked	
fwCaen	5.2.0	HELP	Not checked	
fwConfigurationDB	5.2.0		Not checked	
fwCore	5.2.1	HELP	Not checked	
fwInstallationUtils	2.1		Not checked	
fwRDBArchiving	1.1.4	HELP	Not checked	
fwTrending	5.2.0	HELP	Not checked	
fwXML	5.0.2	HELP	Not checked	

Figure 5.3: A list of all the components required for the HGAL DCS to operate correctly.

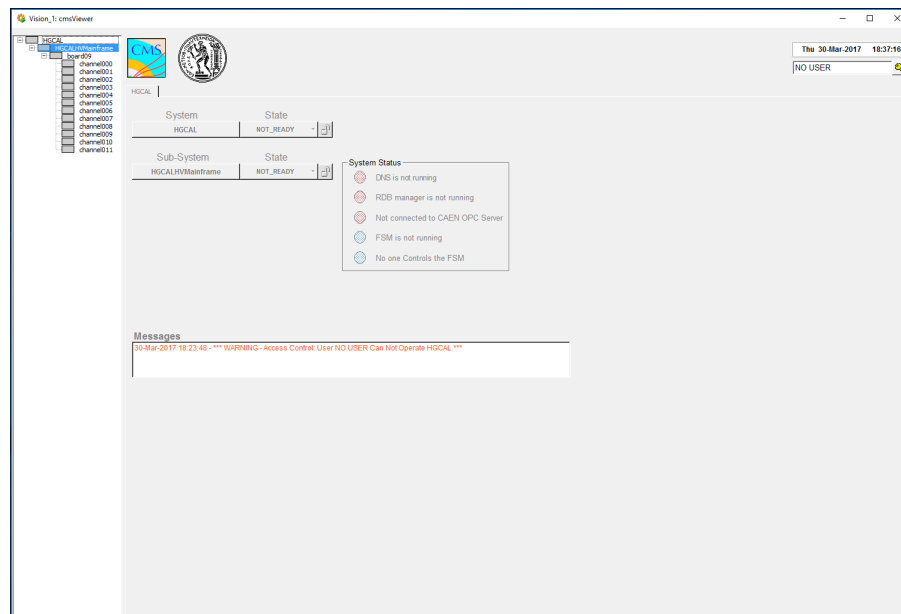


Figure 5.4: The main panel of the HGAL DCS. At the moment the panel is disabled since no user is logged in.

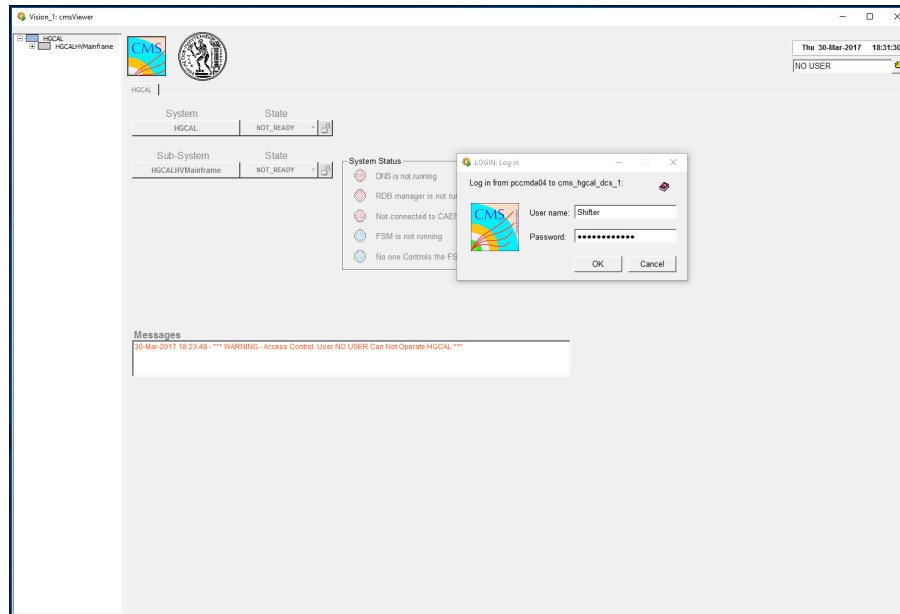


Figure 5.5: The log in pop up. In order for someone to operate the FSM, he has to enter the correct credentials for one of the predefined users.

whether he has the right or not to operate the FSM. By pressing the key button which is located in the access control widget, a pop up appears prompting the user to insert his credentials (See Figure 5.5). If the credentials are valid, the panels becomes enabled (See Figure 5.6).

For each level of the FSM the associated nodes have a different panel, displaying information about the current state of the hardware that corresponds to this level of the FSM hierarchy. The panel for the HGCAL node, displays information regarding the status of the system, if the FSM is running, if the system is connected to the archiving database etc (See Figure 5.6).

In the mainframe panel, the user can see information about the current status of the mainframe (See Figure 5.7) as well as the connected boards. It can also be seen that some buttons (e.g. Kill) are disabled for this particular user, since they perform actions that are meant to be done only by experts. On this panel there is also a second tab which allows the user to set the desired options for the connected channels (See Figure 5.8). One or many channels can be configured at once as well as one or more attributes.

In the board panel, information regarding the status of the board is dis-

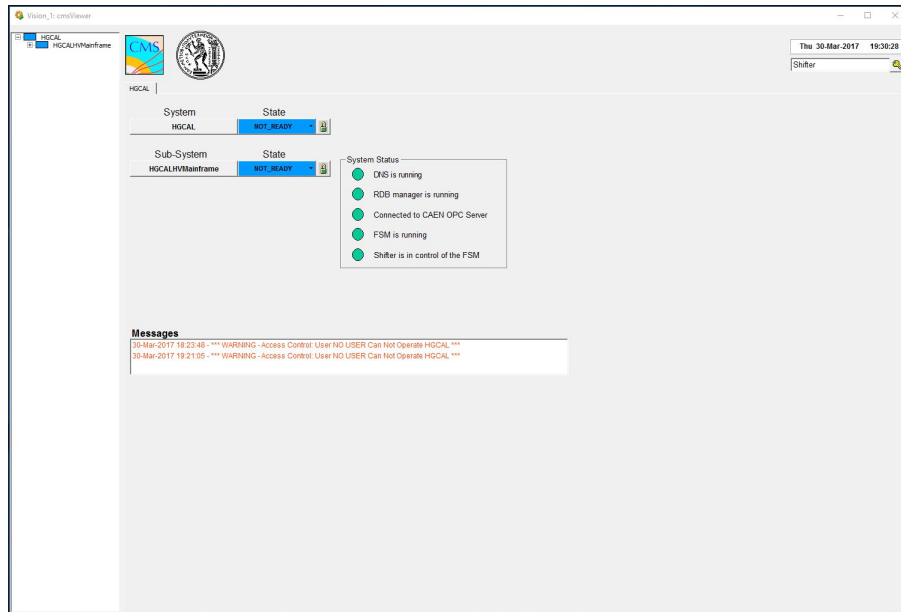


Figure 5.6: The main panel of the HGCAL DCS enabled, after the user inserted the correct credentials.

played. The user can view the connected channels as well as their voltage and if they are on or off. On top of that the boards temperature is displayed so that its performance is also monitored. Finally the last layer of the FSM is the channel layer. In the panel associated to the channels, the user can see a plot of the the voltage and the current of this particular channel which are the most crucial variables concerning the detector performance (See Figure 5.9).

Finally if the user connects as a DCSExpert, another panel can be opened. In the main panel of the HGCAL node a button labeled Expert Panel appears. Through this panel (See Figure 5.10), the expert has the ability to manipulate the system by starting or stopping the FSM as well as the DIM name server which is responsible for the communication of the FSM with the SMI processes. Finally the user can manipulate the archiving of the channel values.

CHAPTER 5. THE HGCAI TEST BEAM DETECTOR CONTROL SYSTEM

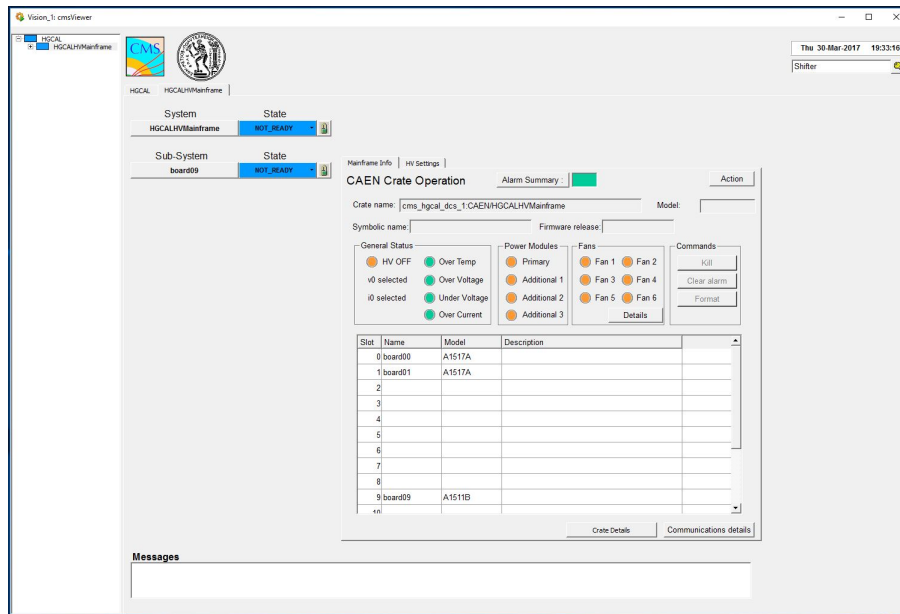


Figure 5.7: The mainframe panel, displays information about the mainframe status as well as the hardware connected to this mainframe.

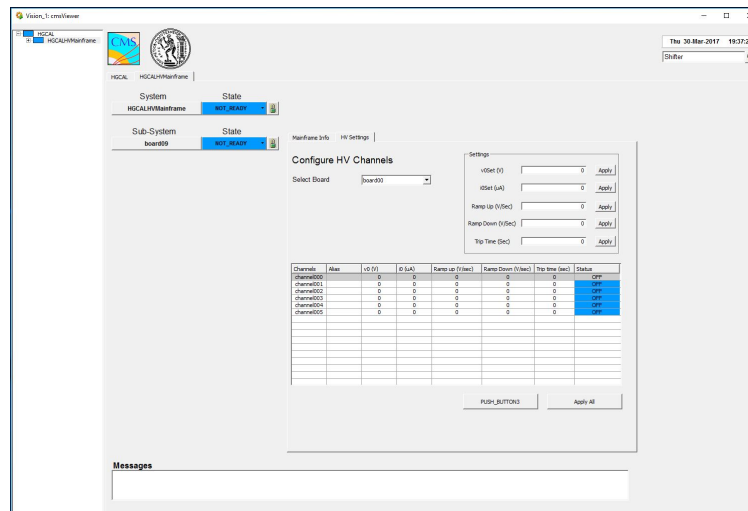


Figure 5.8: Through this tab of the mainframe panel, the user can set the options for the various channels of the mainframe like voltage, current trip time etc.

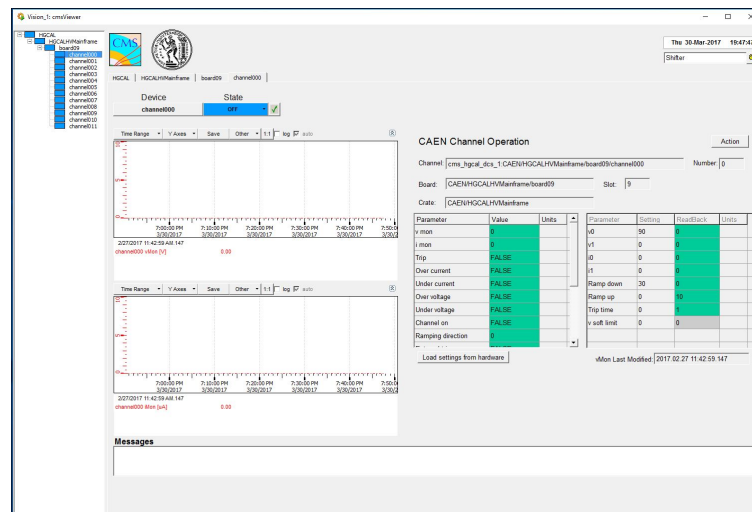


Figure 5.9: The channel panel of the FSM DCS. This panel displays information about the channel status as well as plots of the current and voltage of this particular channel.

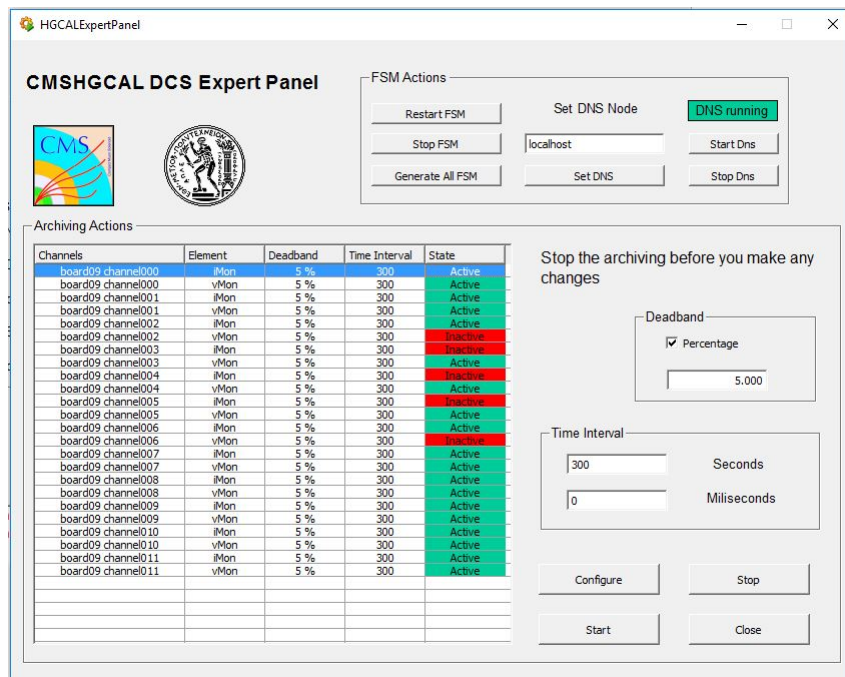


Figure 5.10: The DCS expert panel. The expert user can manipulate the FSM operation through panel. The panel also offers the ability to change the archiving settings.

Chapter 6

The CMS central DCS

The system presented in the previous chapter was developed as a side project by the CMS central DCS team. In the following sections, the structure of the CMS Detector Control System, the role of the central team as well as some tools developed by the team will be presented.

6.1 The CMS Detector Control System

In CMS, the Control System is used to operate the detector and to determine the status of the detector during data taking. The system is divided in two parts, the main control system which is called Detector Control System and a system dedicated for safety actions called Detector Safety System. In this chapter, the structure of the Detector Control System will be presented.

The CMS detector is implemented as a large distributed system and is composed of 35 individual projects where each project can run in a separate machine or more than one can run in the same machine, depending on the load they put on the machine. Each one of these projects is associated with a different part of the detector's operation. The control system is conceptually divided in two parts, the central control system and the control systems of the subdetectors. The central system consists of 4 individual projects with each one of them contributing in a different way to the control system. On the subdetector part, each of the subdetectors can have one or more projects depending of the complexity of this particular part of the detector. Finally, the control room of CMS is a scattered project which means that no computation is done in this project. In order to monitor and

control the experiment, this project connects to the central systems which run in computers inside the CMS service cavern¹.

A key concept used in the CMS system is the one of redundancy. In systems that use redundancy, each setup of projects runs in two separate machines. The first machine, which is called the active peer, is a full member of the system and can act on it changing its state. The second machine is called the passive peer and operates in standby mode which means that it only "listens" and cannot operate in the system. If for some reason, machine related or WinCC related, the active peer can not operate the second peer becomes active and takes over. This ensures that the system will be up and running at all times decreasing the down time of the detector, due to the control system, to minimum. While WinCC provides a native mechanism for redundancy, this failed to meet the requirements of the CMS experiment and the mechanism was redesigned and implemented in CMS by the central team.

The whole CMS detector is implemented using the JCOP framework FSM component. This means that the detector is modelled as a machine with finite states during its runtime. Following this approach, the central system is the most top node of the detector and the one that a user has to interact with in order to operate the experiment. Additionally, it is also the one that reflects the status of the experiment and can be used to determine its state in terms of operation as well as data quality. The central systems contain the most top nodes of the detectors structure. They are also connected (distribution) to the subdetector projects to gain information about the rest part of the detector in order to operate it and reflect its state. A core concept followed by the CMS experiment in the FSM design is that every node has to be owned by someone at all times. This means that in cases of malfunction a part of the detector can be excluded for maintenance reasons. While this happens, that part is not included in the central system and has to be owned and operated by the subdetector team. The team works on this part of the detector and when it is fixed it is re-included in the central system.

The structure of the CMS control system is a tree (Figure 6.1). Each

¹The CMS experiment is divided in 3 areas. The area which is above ground where the control room is. The service cavern which is 80 meters underground and where most of the hardware is, including the servers that run the control system. Finally the experimental cavern is 100 meters underground and contains the detector plus some additional hardware.

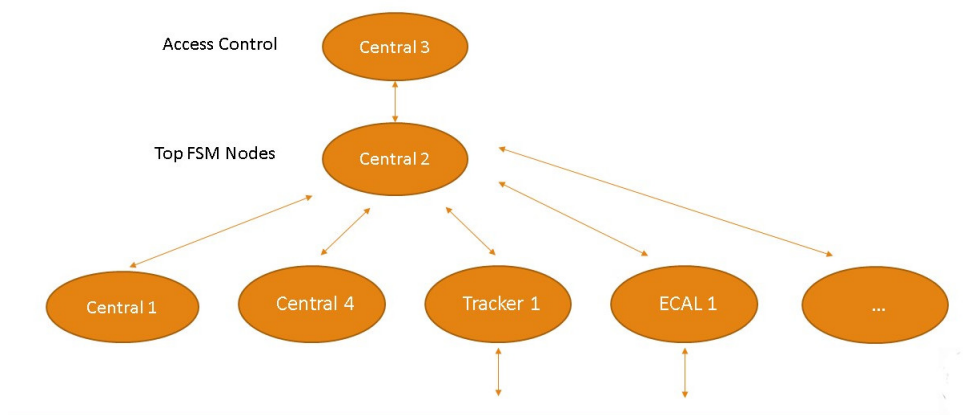


Figure 6.1: The structure of the CMS control system. The system consists of 4 projects for which the central DCS team is responsible and many sub-detector projects. The system is organized in a tree structure and its most top node is the system Central 3 which runs the access control mechanism. The second one is the Central 2 which contains the top nodes of the FSM. After that the other central systems as well as the main systems of the subdetector control systems are connected directly to the system central 2 creating the tree structure.

system has a parent and maybe one or more children. The parent systems have access to the children systems and vice versa. No horizontal connection is allowed so nodes in the same level of the structure can not interact with each other directly. This can only be performed by the parent node. The first node of the system is the project central 3. It is the one that the user has to connect first in order to interact with the detector. This system is responsible for the access control mechanism of CMS and a successful login allows the operator to interface the rest of the projects through the central 3 project. The second node in the hierarchy is the system central 2. In this project the central part of the CMS FSM runs. The other two systems of the central control system are called central 1 and central 4. The central 1 runs the "rack control" application and is responsible for monitoring and controlling all the racks that are present in the site (point 5) of the CMS detector. The system central 4 is responsible for monitoring all the general hardware in CMS which includes Wiener crates that contain electronics related to data taking and ELMBs² that host sensors that are

²ELMB stands for Embedded Local Monitor Boards and are radiation tolerant PCBs

used to monitor the conditions in several areas of the experiment.

The responsibilities mentioned in the previous paragraph for the central projects are only a part of the operations that they perform. For example the system central 3, since it is the one that has connection to all the other projects, also runs scripts that are able to determine the state that the actual projects are on e.g. managers misbehaving. Another example is the project central 2. In CERN, each detector as well as the LHC are private networks meaning that computers from the outside world can not connect to them unless they have special authorization. However for the experiments to take place all 4 detectors as well as the LHC must be ready for physics. For that reason, each detector as well as the LHC publish their state. In order to do that, a computer from each experiment must have access to the LHC network. In CMS this computer is the one in which the project central 2 runs. This computer is "trusted" as is said in computer networking terms and has access to the LHC private network. In this manner, CMS can send its state to the accelerator and can also read the state of the LHC so that experiments can take place. This type of information is exchanged using the protocols DIM and DIP.

6.2 The CMS central DCS team

The CMS central DCS team is responsible for matters concerning control systems in CMS as well as the development and maintenance of the central control system. Furthermore the central team is responsible for issuing guidelines to be followed by the subdetector teams during the development of their systems.

As it was mentioned before, the JCOP team provides support, guidelines and tools for the development of control systems in CERN. Each one of the experiments is responsible for choosing which guidelines to follow. In CMS this is done by the central team. The central team issues additional guidelines that accommodate the CMS philosophy and needs and is also responsible for creating tools that the subdetector teams can use in order to follow these guidelines. Finally the central team is responsible for providing support in general matters concerning control systems as well as WinCC.

developed at CERN.

In CMS the systems are developed in such a way that they are actually a set of components each one of them responsible for a specific task in the system that they are installed. Following this approach, the individual components need to be maintained and not the actual systems. Another feature of the CMS is that the control system is centralized. This means that the central team is responsible for the operation and maintenance of the projects as well as the machines that the projects run on. In addition the subdetector teams do not have direct access to the machines that run their systems but only the members of the central team can access them. The central team creates the projects and the subdetector teams are responsible for providing a set of components to be installed in their projects. For this operation to happen, the central DCS team has developed a pool of tools that the other teams in CMS can use in order to create and install components in their projects.

Since only the central DCS team has access to the system computers, the subdetector teams must have a way to interface and interact with their systems. To address this issue, the CMS central DCS team provides an on-line application called CMS online and can be accessed in the following address <https://cmsonline.cern.ch> by anyone with a CMS account. Through this web application, CMS publishes its state as well as the operations performed by the detector. A user with enough credentials can even operate the detector by manipulating the managers of a project. Additionally this platform is used to target components in projects. As mentioned above the subdetector teams provide the central team with a set of components to be installed in the production systems. In order for this to happen the central team provides an automatic tool for deploying components called component handler which can be found in CMS online. Depending on his credentials, a user can specify a component and install it in a production system. This way a subdetector expert can actually change the form of the control system in production.

In the next two sections, tools developed by the central team, mainly for enhancing the installation mechanism of components in CMS, will be presented. These tools are used by the central team as well as the subdetector teams in order to interface the production systems.

6.3 The Configuration Database in CMS

One of the components that the JCOP framework provides, is a tool for saving data from the runtime database on an external relational database called configuration database. Through this component, one can change the contents of the runtime database in terms of its structure by creating or deleting data points and data point types as well as changing values of data point elements.

In CMS, the configuration database is the way to interface the production systems. It is also used as a reference point in order to specify what should be in the system and for that reason its contents have to be updated every time a change is made in one of the systems. This tool is heavily used by the central team in order to manipulate the image of the production systems. It is also one of the CMS guidelines and everyone in CMS is encouraged to use this tool in order to change the contents of the runtime database.

The original tool designed by the framework comes with a set of limitations which make it difficult to use the component to the extent that this is done in CMS. One of them is the lack of the ability to select big numbers of data points. The original tool provides a graphical interface that allows the user to select through a panel the data points to be saved in the configuration database. Although this functionality is very convenient, in cases where large amounts of data points have to be selected the tool becomes really difficult to use. Another disadvantage is that the hardware and logical view have to be selected in two separate steps. Finally, while the tool offers many more functions, the user has to write scripts in order to implement them.

In order to address these issues and allow the developers in CMS to use the configuration database effectively the CMS central DCS team had to develop an extension of the JCOP framework Configuration database tool. The tool is called CMSfwInstallUtils (See Figure 6.2) and is a member of the installation utility tools that CMS central DCS team provides to the CMS community for developing control systems. The tool follows a different approach in the way data from the system are selected in order to be saved in the database and be manipulated in general. After the selection is made all the functionality provided by the original framework tool can be used through a user friendly graphical interface so the need for creating scripts is reduced to a minimum.

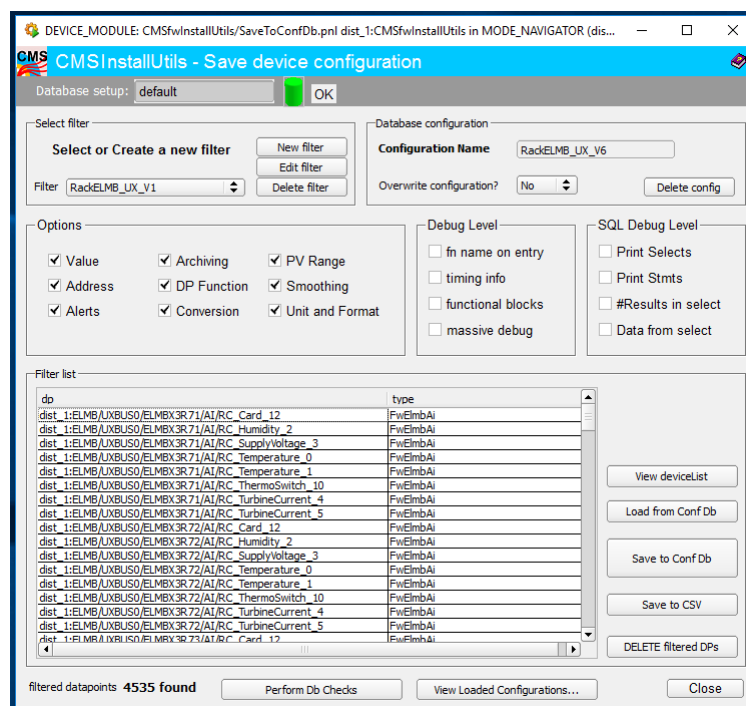


Figure 6.2: The main panel of the CMSfwInstallUtils component. The tool uses filter to select data point from the project. Each filter is associated with a configuration in the database that holds the selected data points. The user can specify which parts of the data points to be save, like addresses, alerts and many more.

The tool is based on the use of filters in order to select data points from the system and save them in the database. A filter is a set of patterns defined by the user in order to select a list of data points from the project's run time database (See Figure 6.3). Each filter is then connected to a configuration in the database under which the data points selected by the filter will be saved. The user can specify data point names or data point name patterns, data point types or even aliases and alias patterns in the filter. Additionally individual data points can be selected and excluded from the filter selection. The filter can also select and save the logical view which means saving the aliases of the data points in the same configuration. The tool also provides the ability to save the logical view starting from a specific node and thus excluding parts of it even if they correspond to data points selected by the filter. After the filter has been created, the tool offers the

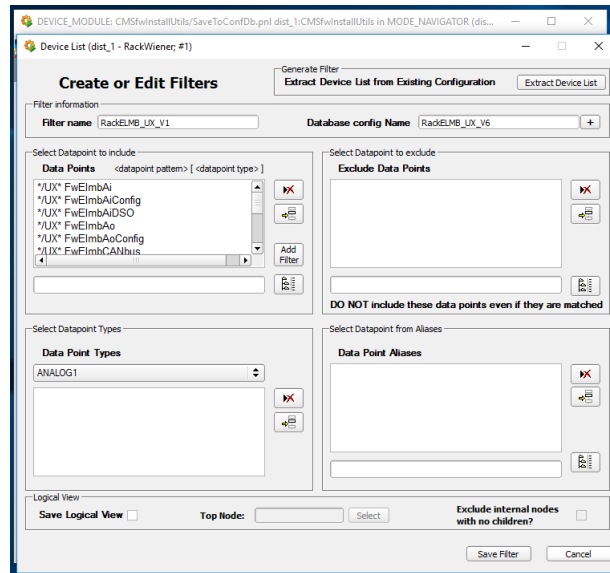


Figure 6.3: The main panel used to define filters. A filter is a set of patterns used to select data points. The tool allows the user to define patterns for data point names or aliases. He can also select data point types and save all the data points of this type and finally select individual data points to be excluded. Each filter is associated with a configuration in the database under which the data points will be saved. Finally the user can select if he wants to also save the logical view for the selected data points.

ability to select which configs of the data point elements (addresses, alerts etc) should be saved, through the main panel (See Figure 6.2).

Another important feature of the component is the comparison mechanism which checks the contents of the database against the ones in the project and the other way around. The comparison mechanism can be used in case an intervention is performed as well as in many other cases. An intervention is usually called an action after a change is induced in the system. After an intervention, the contents of the database have to be updated in order to reflect the new image of the project. In order to check that the intervention achieved its goal, the contents of the project have to be checked against the database. The tool allows the user to check for the existence of data points in the project and in the database and also enables the comparison of data point configs. At the moment, the tools support the comparison of address, alert and archiving configs. Finally if the config-

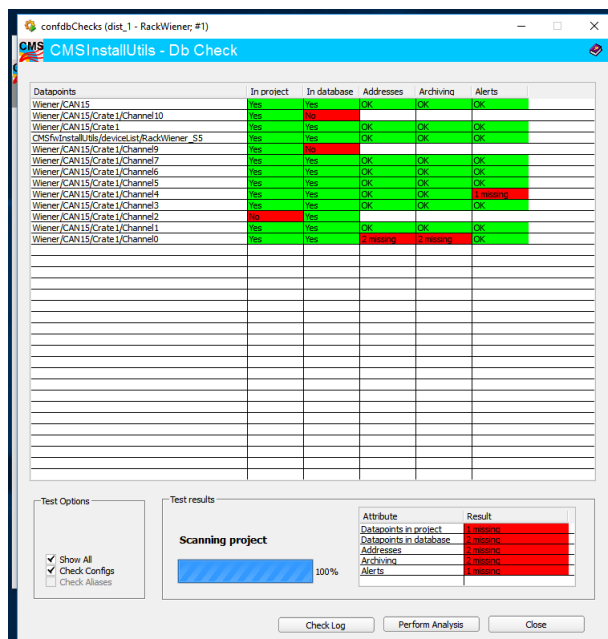


Figure 6.4: The main screen of the comparison mechanism. Through the CMSfwInstallUtils component, one can check if the contents of the project match the ones in the configuration database. The tool performs checks for data points and address, alert and archiving configs. Finally if the configuration contains the logical view aliases can also be checked.

uration associated with the filter is listed as a configuration containing a logical view, data point aliases can also be checked.

6.4 The CMS Installation Tool

As mentioned above, the control system in CMS is centralized and the subdetector teams have to provide a set of component to the central team to be installed in their projects. The procedure described above would be very time consuming if every time that a member of a subdetector team wanted to install something he would have to contact a member of the central team. For this reason the central team has developed a platform so that the subdetectors can install components in their projects. This platform is based on the installation tool of the JCOP framework.

The JCOP provides an installation tool with which the frameworks com-

ponents can be installed in the project. The installation tool can be operated in two modes. The first one is the local mode in which the project is the master and is responsible for what components are to be installed in the projects. For this reason, the tool provides a set of graphics that someone can use in order to perform the installation procedure. In the second mode which is called central, the project can be connected to a database which contains information about which components have to be installed in the project. In this mode the database is the master and components are installed automatically depending on the database contents. In order for this mode to operate, a manager exists in every project which connects to the database and every 5 minutes retrieves information about the project from the database. If the manager detects changes between the database contents and what is installed in the project it responds accordingly.

For the second mode to be used efficiently, the framework provides a tool that can connect to this installation database and browse or alter its contents. In CMS, this component has been customized and optimized to fit the needs of the experiment. Since the installation database is a core part of the CMS control system, the central team provides two ways of accessing the installation database.

The first way is through the terminal server and can be done only by the members of the central team. The installation database is physically present in point 5, which as mentioned before is a private network. This is done for security reasons and it means that computers not located in point 5 do not have access to this network and to the installation database. CMS provides a computer which is called terminal server and is the only one that is located in the CERN general network and has also access to the CMS network. When a user connects to it, he has several options depending on his authorization levels. One of the options is to browse the installation database of the CMS control system. If someone connects to the installation database through the terminal server, he has elevated rights and can also remove or add machines and projects in the system in addition to targeting or un-targeting components to projects.

The second way to access the installation database is through CMS online (<https://cmsonline.cern.ch>). The central team provides a web application called component handler and through it, each user with the appropriate access rights can register a new component and target it for installation in a specific project. Through the component handler, only already existing projects can be manipulated.

The installation procedure as defined by the framework installation tool consists of 4 steps. At first, all files listed with the component to be installed are copied in the local directory of the project. After that a script called `init` (initialization) script is executed and its role is cleaning up the project and prepare it for the installation. Subsequently data point (dp) lists are imported in the project. Data point lists are files containing structures for data points, data point types and data point configs as well as values to be imported in the project. Finally a script called `post install` script is executed. This script is responsible for setting up things after the component has been installed, like creating the FSM and more.

Since the installation procedure is used widely in CMS the steps have to be more detailed. During installation, managers have to be stopped or added, configurations have to be downloaded from the configuration database and many more. The solution was creating a component, called `fwInstallationUtils`³ which is responsible for performing all the installation actions that the framework tool does not. The component is based on an `xml`⁴ file which contains information regarding all the above steps. All this information can be linked to a component through the component handler. Through the application (component handler), the user can specify managers to stop, configurations to be downloaded and others. The tool then generates the `xml` file which contains instructions to be followed during installation and distributes it with the component. During installation the additional steps are executed leading to a smoother installation procedure.

³Usually for CMS components their name starts with CMS. this component was intended as an extension of the installation tool for the JCOP framework that is why it does not contain CMS in its name.

⁴`xml` stands for eXtensible Markup Language and are files used for holding data in a human readable way.

Bibliography

- [1] Oliver Sim Brüning et al. *LHC Design Report*. CERN Yellow Reports: Monographs. Geneva: CERN, 2004. URL: <https://cds.cern.ch/record/782076>.
- [2] D Contardo et al. *Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector*. Tech. rep. CERN-LHCC-2015-010. LHCC-P-008. CMS-TDR-15-02. Upgrade Project Leader Deputies: Lucia Silvestris (INFN-Bari), Jeremy Mans (University of Minnesota) Additional contacts: Lucia.Silvestris@cern.ch, Jeremy.Mans@cern.ch. Geneva, June 2015. URL: <https://cds.cern.ch/record/2020886>.
- [3] Lorenzo Masetti, Volker Lindenstruth, and Peter Fischer. “Implementation of a Large Scale Control System for a High-Energy Physics Detector: The CMS Silicon Strip Tracker”. Presented 25 Oct 2011. PhD thesis. Heidelberg: Inst. Appl. Math., Heidelberg, 2011. URL: <https://cds.cern.ch/record/1425433>.
- [4] A-M Magnan. “HGCal: a High-Granularity Calorimeter for the end-caps of CMS at HL-LHC”. In: *Journal of Instrumentation* 12.01 (2017), p. C01042.
- [5] Axel Daneels and Wayne Salter. “What is SCADA”. In: *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*. 1999, pp. 339–343.
- [6] OPC foundation. *OPC specifications*. URL: <http://www.opcfoundation.org>.
- [7] Lingfeng Wang and Kay Chen Tan. *Modern Industrial Automation Software Design*. John Wiley & Sons, 2006.

- [8] A Daneels and W Salter. “Selection and evaluation of commercial SCADA systems for the controls of the CERN LHC experiments”. In: *Proceedings of the 1999 International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste*. 1999, p. 353.
- [9] Clara Gaspar. “Hierarchical Controls, Configuration & Operation”. In: *CERN June* (2001).
- [10] Frank Hartmann. *Evolution of silicon sensor technology in particle physics*. Vol. 231. Springer, 2008.
- [11] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [13] Paul C Burkimsher. *Scaling up PVSS*. Tech. rep. 2005.
- [14] JS Marshall and MA Thomson. “The Pandora Particle Flow Algorithm”. In: *arXiv preprint arXiv:1308.4537* (2013).
- [15] Santiago de Compostela. “CMS DCS DESIGN CONCEPTS”. In: ().
- [16] B Franek and C Gaspar. “SMI++ object oriented framework for designing and implementing distributed control systems”. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 45.4 (1998), pp. 1946–1950.
- [17] M Gonzalez-Berges. “The joint controls project framework”. In: *arXiv preprint physics/0305128* (2003).
- [18] Benjamin Hermberg. “Measuring Hadronic Jets at the ILC - From Particle Flow Calorimetry to the Higgs Self-Coupling”. Universität Hamburg, Diss., 2015. Dr. Hamburg: Universität Hamburg, 2015, p. 211. URL: <https://bib-pubdb1.desy.de/record/275188>.
- [19] M. Groll. “Construction and Commissioning of a Hadronic Test-Beam Calorimeter to validate the Particle-Flow Concept at the ILC.” Universität Hamburg, Diss., 2007. Dr. Hamburg: Universität Hamburg, 2007. DOI: 10.3204/DESY-THESIS-2007-018. URL: <http://bib-pubdb1.desy.de/record/81285>.
- [20] Florian Beaudette. “The CMS Particle Flow Algorithm”. In: (Jan. 2014). Comments: 10 pages, 12 figures, proceedings for CHEF 2013, Paris, France, April 2013, 10 p. ariv: 1401.8155. URL: <http://cds.cern.ch/record/1645993>.

- [21] Constantine Kloukinas. “Ανάπτυξη Ηλεκτρονικών Συστημάτων Λήψης Δεδομένων και Ελέγχου για ένα Πείραμα Συγκρουόμενων Δεσμών pp σε Ενέργεια Κέντρου Μάζας 14TeV (Πείραμα CMS στον επιταχυντή LHC).” PhD thesis. Ioannina U., 1997.
- [22] Χρήστος Παπαδημητρόπουλος. “Προσωμοίωση ανάλυση και επανασχεδιασμός του συστήματος λήψης δεδομένων του πειράματος CMS”. PhD thesis. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών επιστημών. Τμήμα Φυσικής. Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, 2008.
- [23] Georgia Karapostoli. “Observation and measurement of the supersymmetric process $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \ell\ell$ with the CMS experiment at LHC”. PhD thesis. Athens U., 2008.