
СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
“СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА “АТОМНА ФИЗИКА”

Пейчо Стоев Петков

Изследване и оптимизиране на
характеристиките на камери със
съпротивителна плоскост за детектора
CMS

Научна специалност 01.03.05 “Физика на
елементарните частици и високите енергии”

ДИСЕРТАЦИЯ

за получаване на образователна и научна
степен “доктор”

Научен ръководител: доц. д-р Леандър Литов

София, 2008 г.

Съдържание

Въведение	1
1 Експериментът CMS	3
1.1 Ускорителят LHC	3
1.2 Физична програма на експеримента CMS	4
1.2.1 Търсене на Хиггс бозона предсказан от Стандартния модел	5
1.2.2 Суперсиметрия	8
1.2.3 Търсене на нови масивни векторни бозони	10
1.3 Детекторът CMS	11
1.3.1 Треков детектор	11
1.3.2 Електромагнитен калориметър	12
1.3.3 Адронен калориметър	13
1.3.4 Свърхпроводящ соленоид	14
1.3.5 Мюонна система	14
1.3.6 Тригерна система и система за събиране на данни	17
2 Камери със съпротивителна плоскост	19
2.1 Принцип на действие на камерите със съпротивителна плоскост	19
2.2 Типове камери със съпротивителна плоскост използвани в експериментите във физика на елементарните частици	26
2.2.1 Материали използвани за изработване на съпротивителните електроди	27
2.2.2 Газови смеси	28
2.2.3 RPC в стримерен режим	29
2.2.4 RPC в лавинен режим	30
2.3 Работни характеристики на камерите със съпротивителна плоскост	32

2.4	Заключение	32
3	Камери със съпротивителна плоскост за мюонната система на CMS	34
3.1	Мюонна тригерна система	34
3.1.1	Тригериране чрез сравняване с шаблони	36
3.1.2	Изисквания към RPC	36
3.2	Геометрия на RPC за цилиндричната част на CMS	38
3.3	Избор на материали и основни характеристики	42
3.3.1	Съпротивителни електроди	42
3.3.2	Газова смес	43
3.3.3	Ширина на газовия процеп	44
3.4	Двупроцепен дизайн	44
3.5	Детекторна електроника	45
3.6	Механична конструкция и производство	51
3.6.1	Производство на бакелита	53
3.6.2	Производство на единични и двойни газови процепи . .	54
3.6.3	Производство на RPC	56
3.7	Заклучение	57
4	Отделяне на HF в RPC за CMS	58
4.1	Въведение	58
4.2	Експериментална апаратура и материали	58
4.3	Отделяне на HF в единичните газови процепи	60
4.4	Отделяне на HF в камерите от тип RB1	62
4.5	Анализ на повърхността на бакелитените електроди	63
4.6	Заклучение	65
5	Мюонни телескопи за изследване на характеристиките на RPC за експеримента CMS	66
5.1	Въведение	66
5.2	Мюонен телескоп в Бари	67
5.3	Мюонен телескоп в София	68
5.4	Методи за изследване на характеристиките на RPC	69
5.4.1	Анализ на данните от космични мюони	70
5.4.2	Метод на съвпаденията	71
5.4.3	Реконструиране на мюонни следи	74

5.5	Резултати	78
5.6	Заключение	81
6	Изследване на RPC за CMS работещи в лавинен режим	82
6.1	Въведение	82
6.2	Използвани данни и тяхното анализиране	82
6.3	Ефективност и средна големина на кластерите	83
6.4	Вероятност за поява на стример	85
6.5	Работно плато	87
6.6	Заклучение	90
	Научни приноси	92
	Публикации, на които се базира дисертацията	93
	Благодарности	94
	Приложение 1	108

Въведение

Понастоящем във физиката на елементарните частици има все още много отворени въпроси. Сред най-важните от тях са произхода и йерархията на масите. В рамките на Стандартния модел на силните и електрослабите взаимодействия, теория неопровергана до сега експериментално, частиците получават маси чрез механизма на Хиггс. Така се предсказва съществуването на нова елементарна частица, наречена Хиггс бозон. Масата на Хиггс бозона е параметър в теорията. Търсенето на Хиггс бозона, предсказан от Стандартния модел е един от главните мотиви за построяването на ускорителя на насрещни снопове LHC в Европейския център за ядрени изследвания (CERN) в Женева, Швейцария.

Въпреки удивителния успех на Стандартния модел, той би трябвало да бъде ефективно нискоенергитично приближение на по-обща теория. Суперсиметрията (SUSY) е една от най-атрактивните теории, които претендират за разширения на Стандартния модел. Ако не бъдат наблюдавани доказателства за съществуване на суперсиметрия, то трябва да се разгледат други сценарии. Така например, ако електрослабата симетрия е силно нарушена, то трябва да бъдат наблюдавани тежки векторни бозони или частици предсказани от моделите с техниколор. Новите векторни бозони и повечето екзотични като лептокварките например, се появяват в други разширения на Стандартния модел.

LHC би трябвало да може да даде отговор и на някои отворени въпроси в космологията. Най-важният от тях без съмнение е произхода на асиметрията между материята и антиматерията във Вселената. Изясняването на този проблем би било възможно чрез изследване на CP-нарушението в адрони съдържащи b -кварки. Друг космологичен проблем е произхода на тъмната материя. Един от възможните кандидати е най-леката неутрална суперсиметрична частица. Друг клас теории, където се включва и гравитацията, са теориите на великото обединение. LHC ще даде възможност и за търсене на

допълнителни измерения на пространство-времето.

Ускорителят ще работи както с протони, така и с тежки йони, енергиите в система център на масите са съответно 14 TeV и 2.76 TeV на нуклон, а съответните максимални светимости са $10^{34}\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ и $10^{27}\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$. Детекторът CMS е един от двата детектора с общо предназначение, който ще изследва физиката на елементарните частици в енергитичния диапазон достижим на LHC.

Главният елемент на детектора CMS е свръхпроводящият соленоид, който създава хомогенно магнитно поле с индукция 4 T . Във вътрешността му са поместени треков детектор, електромагнитен калориметър и адронен калориметър, а между плочите на затварящия силовите линии магнитовод се намират мюонните детектори.

В CMS ще се използват три типа газови детектори за регистриране на мюоните. Единият тип от тях са камери със съпротивителна плоскост, които играят много важна роля при формирането на тригера от първо ниво, благодарение на много добрата си разделителна способност по време, бърз отклик и добра пространствена разделителна способност. RPC работят във лавинен режим при поток на йонизиращите частици до 1 kHz/cm^2 .

Настоящата дисертация е посветена на изследване и оптимизиране на характеристиките на камерите със съпротивителна плоскост за цилиндричната част на детектора CMS. Тя се състои от въведение, шест глави и заключителна част, в която са представени научните приноси. В първа глава е описан експеримента CMS като е разгледан детекторния комплекс, тригерната система и физичната му програма. Във втора глава е описан принципа на действие на камерите със съпротивителна плоскост и са разгледани камерите със съпротивителна плоскост използвани в някои експерименти във физиката на елементарните частици. В трета глава са описани камерите със съпротивителна плоскост за цилиндричната част на CMS, измервания на специфичното съпротивление на използвания бакелит и основните тестове, осигуряващи произвеждането на качествени газови процепи и правилното сглобяване на камерите. В четвърта глава е представено изследване на състава на газовата смес преминала през камерите със съпротивителна плоскост. В пета глава са описани два от мюонните телескопи, използвани за изследване на работните характеристики на камерите и метод за реконструиране на мюонни следи. В шеста глава са изследвани характеристиките на камери работещи с три различни газови смеси.

Глава 1

Експериментът CMS

В настоящата глава е описан накратко експериментът CMS. Разгледани са физичната програма, детекторния комплекс и тригерната система. Специално внимание е обърнато на детекторите от мюонната система.

1.1 Ускорителят LHC

Адронните колайдери, ускорители на насрещни протонни или антипротонни снопове, са изключително подходящи за проверка на предсказанията на стандартния модел и тези на моделите, претенденти за негови разширения. Този тип машини позволяват постигането на висока светимост, както и достигането на енергии от порядъка на няколко TeV. Това обезпечава раждането и съответно наблюдението на частици с маси в TeV диапазона от маси, както и наблюдението на изключително редки процеси.

Ускорителят на насрещни снопове LHC (Large Hadron Collider)[1] е построен в Европейския център за ядрени изследвания (CERN) в Женева, Швейцария. Разположен е в тунел, намиращ се на дълбочина около 100 *m* под земната повърхност, с диаметър около 9 *km* (дължина около 27 *km*). Основният (p-p) режим на работа е с протонни снопове. Някои от работните характеристики са представени в таблица 1.1. Енергията на протоните в систе-

ма център на масите е 14TeV , а проектираната светимост¹ е $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. LHC ще ускорява и тежки йони (Pb-Pb режим) до енергия в системата център на масите 1150TeV ($2.76\text{TeV}/n$), проектираната максимална светимост е $2 \times 10^{27}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. В ускорителя протоните и йоните се ускоряват по такъв начин, че формират групи от частици (пакети), в които има по 10^{11} протони или 9.4×10^7 йони. На всеки 25ns (p-p режим) или 124.8ns (Pb-Pb режим) две такива групи се пресичат и частиците в тях взаимодействат.

Таблица 1.1: Работни характеристики на ускорителя LHC

		р-р режим	Pb-Pb режим
Енергия на снопа	[TeV]	7	1150
Магнитно поле на диполите	[T]	8.4	8.4
Светимост	[$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	10^{34}	2×10^{27}
Времеви интервал между пакетите	[ns]	25	124.8
Брой частици в пакет		10^{11}	9.4×10^7
Ъгъл на пресичане на сноповете	[μrad]	200	≤ 100

Двата снопа се отклоняват за пресичане в четирите точки на взаимодействие, където са разположени детекторните комплекси - ATLAS, CMS, ALICE и LHCb. ATLAS и CMS са детектори с общо предназначение, проектирани да изследват физиката на елементарните частици в енергийната област достижима за LHC. ALICE ще изследва кварк-глюонна плазма, а LHCb - физиката на елементарните частици, съдържащи b-кварки.

1.2 Физична програма на експеримента CMS

Основната задача, залегнала във физичната програма на експеримента CMS, е изучаване на механизма на нарушаване на симетрията[3] на електрослабите

¹Светимостта на ускорител[2], в който две групи от n_1 и n_2 частици се сблъскват с честота f , се дефинира като

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y},$$

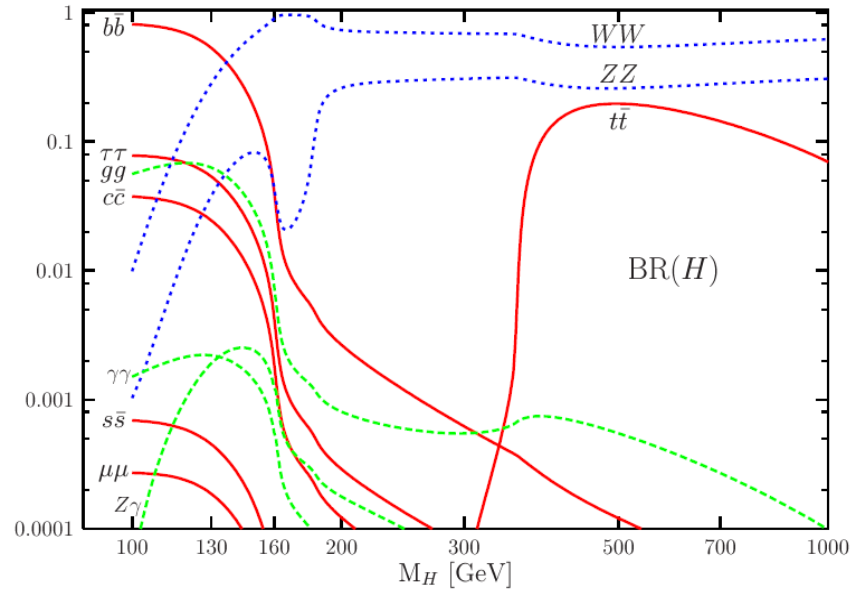
където σ_x и σ_y характеризират гаусовата ширина на групите частици съответно в хоризонтално и вертикално направление, при предположение че напречния им профил е един и същ по цялото продължение на всяка група.

взаимодействия в Стандартния модел на силните и електрослабите взаимодействия(СМ), при което всички частици получават маса, а в резултат на това в теорията се въвежда нова частица - Хиггс бозон (H). Експерименталното наблюдаване на тази частица се разглежда като изключително важна задача, която може окончателно да потвърди СМ или да го отхвърли. LHC дава възможност за търсене на H в целия очакван диапазон от стойности на неговата маса - от 114 GeV до 1 TeV . Друга съществена част от изследванията ще бъдат по-прецизно измерване на параметрите на стандартния модел и търсене на:

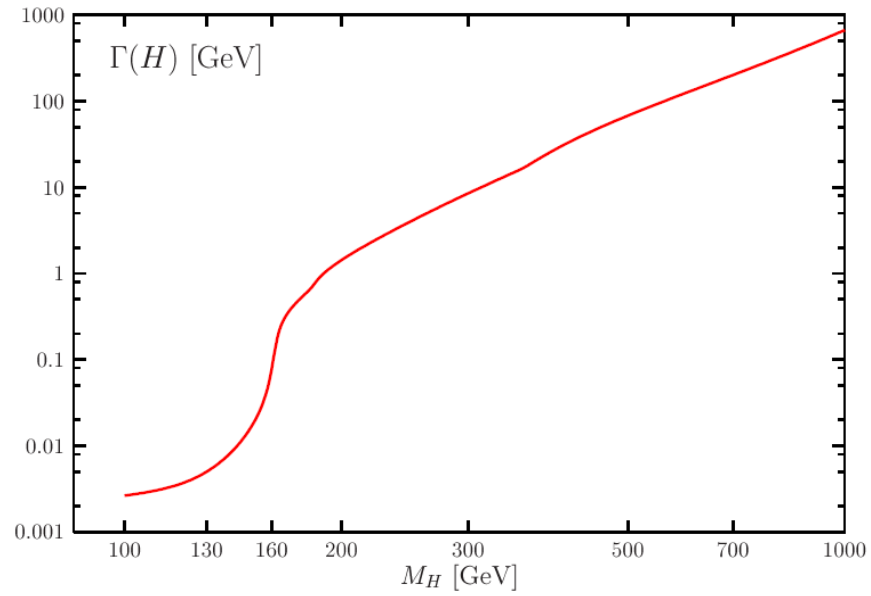
- суперсиметрия (SUSY) - теория-разширение на стандартния модел, в която се предсказват суперсиметрични партньори на всички досега известни елементарни частици;
- нови тежки калибровъчни бозони (W', Z') с маси до 5 TeV ;
- кварк-глюонна плазма;
- допълнителни измерения на пространство-времето;
- кандидати за “тъмната материя” и обяснение на “тъмната енергия”;
- обяснение на асиметрията между материя и антиматерия;
- непредсказани физични феномени.

1.2.1 Търсене на Хиггс бозона предсказан от Стандартния модел

Масата на Хиггс бозона, предсказан от стандартния модел, е параметър в теорията, за която има само ограничения от експеримента и от теорията. Долната граница за масата на Хиггс бозона [5], поставена от експериментите на ускорителя LEP, е 114 GeV . На фиг. 1.1 и фиг. 1.2 [6] са показани съответно парциалната вероятност за разпад и пълната естествена ширина на Хиггс бозона като функция на масата му. В таблица 1.2 са представени различни канали на разпад, подходящи за наблюдаване в зависимост от неговата маса [7].



Фигура 1.1: Парциална вероятност за разпад на Хиггс бозона на СМ в зависимост от неговата маса



Фигура 1.2: Пълната естествена ширина на Хиггс бозона в зависимост от неговата маса

$$H \longrightarrow \gamma\gamma$$

Електромагнитният калориметър е оптимизиран за изследването на този канал, тъй като е необходимо да се постигне разделителна способност по маса

маса	канал на разпад
$100\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 150\text{ GeV}$	$H \longrightarrow \gamma\gamma$
$90\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 120\text{ GeV}$	$H \longrightarrow b\bar{b} \text{ и } t\bar{t}H$
$130\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 200\text{ GeV}$	$H \longrightarrow ZZ^* \longrightarrow 4l \text{ (} e \text{ или } \mu \text{)}$
$140\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 180\text{ GeV}$	$H \longrightarrow WW \longrightarrow l\nu l\nu$
$200\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 750\text{ GeV}$	$H \longrightarrow ZZ \longrightarrow 4l$
$500\text{ GeV} \lesssim m_H \lesssim 1\text{ TeV}$	$H \longrightarrow ZZ \longrightarrow 2l2\nu$
$m_H \approx 1\text{ TeV}$	$H \longrightarrow WW \longrightarrow l\nu + 2\text{Jets}$
$m_H \approx 1\text{ TeV}$	$H \longrightarrow ZZ \longrightarrow 2l + 2\text{Jets}$

Таблица 1.2: Експериментално наблюдаеми канали на разпад на H в зависимост от неговата маса m_H

$\Delta m/m < 1\%$. В масовата област $m \approx 120\text{ GeV}$ има фон, идващ от процеси като $q\bar{q} \longrightarrow \gamma\gamma$, $g\bar{g} \longrightarrow \gamma\gamma$ и изолирано спирачно лъчение, който не може да бъде подтиснат.

$$H \longrightarrow b\bar{b}$$

Въпреки че този канал доминира при $m_H < 2m_W$ той трудно може да бъде изследван, поради огромния QCD $b\bar{b}$ фон. Могат обаче да се използват събития, в които Хиггс бозоните се раждат заедно с W или $t\bar{t}$. По този начин лептоните в крайно състояние могат да бъдат използвани за тригериране. Пример за такъв канал при $m_H \lesssim 120\text{ GeV}$ е $t\bar{t}H \longrightarrow l\nu bjj\bar{b}\bar{b}$ като с j са обозначени струите. При подбора на събитията се изискват един изолиран електрон или мюон и шест струи, четири от които са обозначени от вертексния детектор като идващи от b -кварки.

$$H \longrightarrow ZZ^*/ZZ \longrightarrow 4l$$

Четирилептонните канали на разпад на Хиггс бозона на Стандартния модел могат да бъдат използвани за търсенето му в почти целия очакван интервал от маси. При $m_H < 2m_Z$, обаче, честотата на събитията е малка и подтискането на фона е по-трудно, поради факта че единият или и двата от Z -бозоните са виртуални. Фонът от $t\bar{t}$ и $Zb\bar{b}$ може да бъде отстранен за разлика от пиедестала получен от ZZ^* или $Z\gamma$. За подтискане на фона може да бъде използвано обрязване по изолация на лептоните, инвариантна маса на двойки лептони и прицелен параметър.

$$H \longrightarrow WW \longrightarrow l\nu l\nu$$

За маса на Хиггс бозона $m_H \approx 2m_W$, парциалната вероятност за разпад за канала $H \longrightarrow WW \longrightarrow l\nu l\nu$ е около сто пъти по-голяма от тази за канала $H \longrightarrow ZZ^* \longrightarrow 4l$. Тъй като H има спин 0, спиновете на W^+W^- са корелирани и това е критерий за селекция на двойките W -бозини. Фоновете събития $t\bar{t}$ и $Wb\bar{b}$ могат да бъдат отсяти чрез въвеждане на вето за струи. Сигнал със значимост 5σ за масите на Хиггс между 130 и 190 GeV може да бъде открит след набирането на $30 fb^{-1}$ интегрална светимост. При изследването на този канал не може да бъде реконструирана инвариантната маса на Хиггс бозона, поради наличието на две неутрина в крайното състояние. Масата може да бъде измерена индиректно от честотата на събитията и формите на теоретичните разпределения, например на разпределението на импулсите на двата регистрирани лептона в крайно състояние.

$$H \longrightarrow ZZ \longrightarrow ll\nu\nu, lljj \text{ и } H \longrightarrow WW \longrightarrow l\nu jj$$

Тъй като естествената ширина се увеличава, а вероятността за раждане на H намалява с увеличаване на m_H , трябва да се използват канали с големи парциални вероятности за разпад. Сигналът от тези събития включва лептони, струи и липсваща енергия. Масата на Хиггс бозона приблизително до 1 TeV може да бъде изследвана чрез използването на тези канали.

1.2.2 Суперсиметрия

Суперсиметрията (SUSY) е едно от най-добре обоснованите разширения на Стандартния модел. Поради това потвърждаването на SUSY при енергии около 1 TeV е една от главните цели на експериментите на ускорителя LHC. В SUSY фермионите от СМ имат бозонни партньори - скварки (\tilde{q}) и слептони (\tilde{l}), а бозоните - фермионни партньори - глюина (\tilde{g}) и гейджина. В тази теория се появяват най-малко пет Хиггс бозона - h , H , A и H^\pm . SUSY предлага и решение на йерархичния проблем, защото в нея е заложено равенство между бозонните и фермионните степени на свобода, които дават противоположни знаци при пресмятането на примките и така се съкращават квадратичните разходимости. Това съкращаване на квадратичните разходимости работи във всички порядъци по константата на взаимодействие, стига масите на фермионите да имат само логаритмични разходимости. При нарушаване на SUSY, корекциите към масата на Хиггс бозона и масите на другите фермиони

стават пропорционални на масовата скала характерна за суперсиметрията, която надвишава масата на Планк. Ето защо от условието Хиггс бозона да бъде лек без да има неестествено нагласяне следва, че суперсиметричните частици би трябвало да имат маси по-малки от 1 TeV[4].

Поради това, че експериментално не са наблюдавани суперсиметричните партньори на фундаменталните частици и на основните преносители на взаимодействия, суперсиметрията би трябвало да е нарушена и то така, че да се обезпечат достатъчно големи маси на съответните суперсиметрични частици. В суперсиметричните теории е възможно нарушаване на законите за запазване на барионното и лептонното число, което води до недопустимо голяма вероятност за разпад на протона при характерната енергетична скала на слабите взаимодействия, което противоречи на експерименталните факти. Нежеланите членове могат да бъдат елиминирани чрез въвеждането на R-четността. За частиците от Стандартния модел $R = +1$, а за всички суперсиметрични частици $R = -1$. Ако предположим, че R-четността се съхранява, то всички суперсиметрични частици трябва да се раждат по двойки и най-леката суперсиметрична частица (LSP) да е стабилна.

Минималното суперсиметрично разширение на Стандартния модел (MSSM) съдържа възможно най-малкия брой частици и запазва R-четността. Съкращаването на квадратичните разходимости за масите на скаларните полета изисква суперсиметрия само за членове с масова размерност 4. В MSSM, суперсиметрията е нарушена изкуствено като в лагранжиана са добавени малки членове, запазващи калибровъчната инвариантност относно групата $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, което включва масови членове за всички суперсиметрични партньори и членове от трета степен. Появяват се още 105 параметъра освен тези на Стандартния модел. Един от тези параметри е масата на хиггсино, която трябва да бъде от същия порядък като енергиите, при които суперсиметрията се нарушава. Електрослабата симетрия се нарушава чрез механизъм на Хиггс, като по този начин се омасяват кварките, лептоните, W и Z бозоните. Суперсиметрията изисква два хиггс дублета и дава връзка между хиггс самодействието и калибровъчните константи.

Разработени са различни механизми на нарушение на суперсиметрията. В рамките на супергравитационните модели (SUGRA) броят на независимите параметри може да бъде редуциран значително. Поставяйки универсални гранични условия (хипотеза за универсалност), например, при много големи енергии всички частици със спин 0 имат едни и същи маси със стойност m_0 ,

всички частици със спин $1/2$ - маса $m_{1/2}$ и всички членове от 3-та и 4-та степен в лагранжиана имат един и същи вид на Юкавския суперпотенциал. Така MSSM остава с пет свободни параметъра, определящи масовата скала: m_0 , $m_{1/2}$, A_0 , μ и $\tan \beta$. A_0 е константата на взаимодействие, определяща главно масовата разлика между левите и десните \tilde{t} -скварки, μ - параметъра на смесване на масите на хиггсино и $\tan \beta$ е отношението на вакуумните средни на хиггсовия дублет.

Ако суперсиметрията е достъпна при енергиите на ЛНС, най-вероятно тя би била открита при инклузивни изследвания, базирани на наблюдение на събития с адронни струи и голяма недостигаща (изпусната) енергия. В този случай скварките и глюината са кинематично достъпни и се очаква те да се раждат с голяма вероятност. Възможни са три сценария в зависимост от масите на скварките и глюината:

1. Глюината са по-тежки от скварките. Канала на разпад е

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\bar{q}, \tilde{q} \rightarrow q\chi$$
2. Някои скварки са по-тежки от глюината, а други са по-леки от тях

$$\tilde{q}_L \rightarrow \tilde{g}\bar{q}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{b}\bar{b}, \tilde{b} \rightarrow b\chi$$
3. Глюината са по-леки от скварките

$$\tilde{q} \rightarrow \tilde{g}\bar{q}, \tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\chi$$

Разпадът на суперсиметричните частици, като скварки и глюина, включва каскади, които, ако се запазва R-четността, винаги съдържат най-леката суперсиметрична частица (LSP). Последната се очаква да взаимодейства много слабо с материята, което води до голяма недостигаща напречна енергия E_T^{miss} в крайното състояние. Остатъка от каскадата дава изобилие от лептони и струи, в частност b -струи и/или τ -струи. В GMSB схема (калибровъчно пренесено нарушение на симетрията) с LSP разпадаща се на фотон и гравитино се очаква завишен брой изолирани фотони.

1.2.3 Търсене на нови масивни векторни бозони

В ред разширения на СМ се предсказва съществуването на тежки векторни бозони. Изискванията към детекторната система могат да се определят, разглеждайки разпада на обекти с голяма маса, като $Z' \rightarrow e^+e^-$ и $Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$. Откриването на обекти като Z' ще бъде най-вероятно ограничено от статистическата значимост на сигнала. Начините за разграничаване на различните

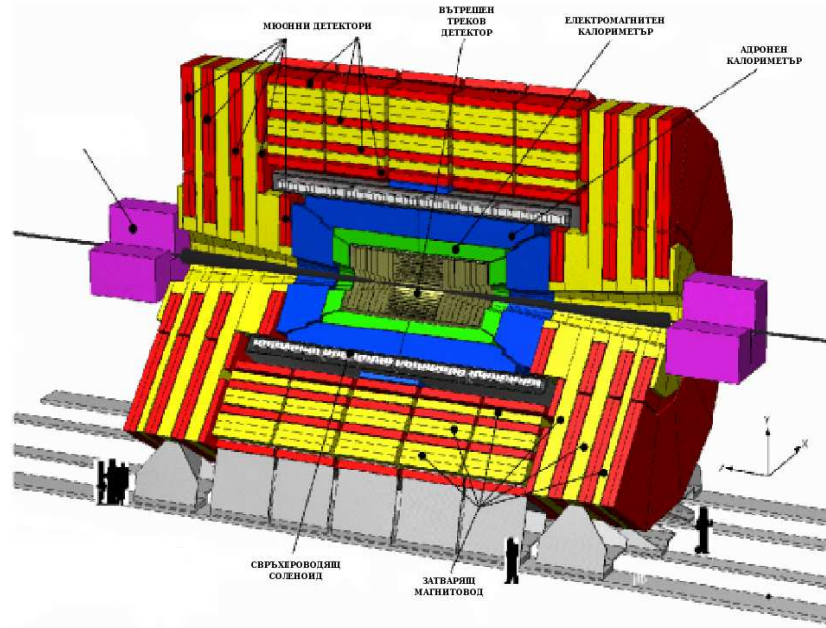
модели, изискват измерване на естествената ширина и асиметрията напред-назад, което от своя страна изисква достатъчно добра разделителна способност по напречни импулси p_T ($\Delta p_T/p_T < 0.1$ при $p_T \sim 1 \text{ TeV}$), за да се определи знака на заряда на лептона и геометрично покритие до псевдобързини $|\eta| = 2.4$.

1.3 Детекторът CMS

CMS (*Compact Moun Solenoid* - Компактен муонен соленоид) [9] е детектор с 4π -геометрия и много добра херметичност. На фиг. 1.3 е представена схема на детектора CMS, който тежи 12500 t и има форма на цилиндър с дължина 21.6 m и радиус 14.6 m . Основен елемент е свръхпроводящият соленоид с диаметър 5.9 m и дължина 13 m , който създава 4 T хомогенно магнитно поле във вътрешната му част. Магнитните силови линии се затварят чрез магнитовод изграден от стоманени плочи. Детекторът се състои от цилиндрична част (построена от 5 пръстена) и две затварящи части. Между плочите на магнитовода се намират муонните детектори. Във вътрешната част на магнита, непосредствено около точката на взаимодействие, е разположен трековият детектор, следват електромагнитният калориметър и адронният калориметър.

1.3.1 Треков детектор

Трековият детектор [10] е разположен в цилиндричен обем с диаметър 2.6 m и дължина 5.8 m , в който се поддържа температура около 10°C . Това е суб-детекторната система, през която преминават частиците родени в точката на взаимодействие. Използват се пикселни силициеви детектори и микроскопични силициеви детектори. Пикселните силициеви детектори са разпределени в три слоя като радиусите са съответно 4 , 7 и 11 cm и четири диска, по два от всяка страна. Пикселите имат размери $100 \mu\text{m}(r\phi) \times 150 \mu\text{m}(z)$, а общият им брой е 66×10^6 . Затварящите дискове са съставени от листо-видни елементи завъртяни на 20° около централната им ос. При използване на интерполация на сигналите може да бъде достигната разделителна способност от $10 \mu\text{m}(r\phi) \times 20 \mu\text{m}(z)$. Вероятността да бъдат регистрирани три точки по следата на заредена частица е $\epsilon > 90\%$ при $|\eta| < 2.2$, където η е



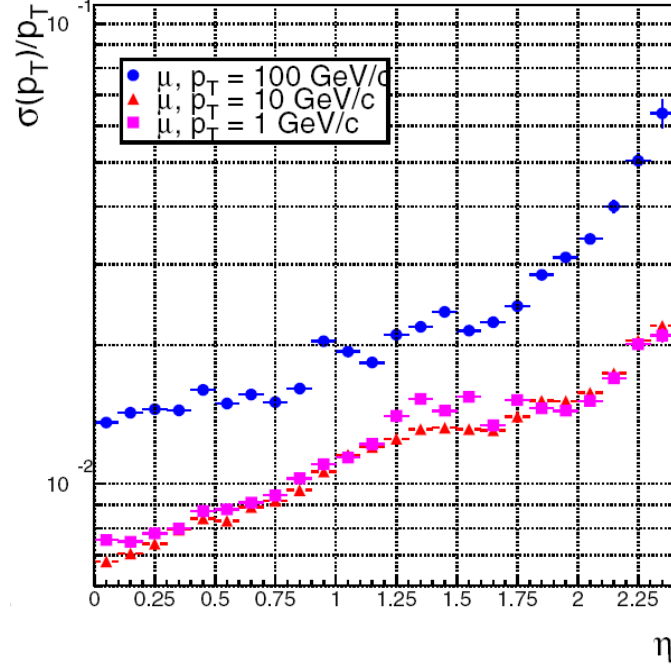
Фигура 1.3: Детекторната система CMS

псевдобързината². Основното предназначение на пикселния треков детектор е идентификация на първичните и вторичните върхове. Микростриповите силициеви детектори са разпределени в десет слоя в цилиндричната част и 12 диска във всяка от затварящите части - общо 15148 стрипа със стъпка $80 - 205 \mu m$. Силното магнитно поле и добрата пространствена разделителна способност определят достатъчно добра разделителна способност по импулси както се вижда от фиг. 1.4 [11].

1.3.2 Електромагнитен калориметър

Електромагнитният калориметър [12] на CMS е херметичен и хомогенен, и съдържа 61200 кристали от оловен волфрамат ($PbWO_4$) в цилиндричната част и по 7324 кристали от $PbWO_4$ в двете затварящи части. Цилиндричната част на калориметъра е с вътрешен радиус $129 cm$, изградена е от 36 супермодули, покрива областта $|\eta| < 1.479$ като използваните кристали са с напречно сечение $22 \times 22 mm^2$ и дължина $230 mm$, съответстваща на 25.8 радиационни дължини. Затварящите части покриват областта $1.479 < |\eta| < 3.0$ - кристалите са с напречно сечение $28.6 \times 28.6 mm^2$ и дължина $220 mm$ (24.7

²За частица с импулс $\vec{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$ и маса m псевдобързината η [2] се дефинира като $\eta \equiv -\ln \tan(\theta/2)$, където $\cos \theta = p_z/|\vec{p}|$, а $|\vec{p}| \gg m$ и $\theta \gg 1/\gamma$.



Фигура 1.4: Относителна неопределеност при определяне на напречния импулс на мюонни следи при различни напречни импулси в зависимост от псевдобързината η

радиационни дължини). Полученият светлинен сигнал се детектира чрез силициеви лавинни фотодиоди.

1.3.3 Адронен калориметър

Във вътрешността на свръхпроводящия магнит около електромагнитния калориметър е разположен адронният калориметър [13]. Адронният калориметър е херметичен семплиращ калориметър с абсорбер от месинг. Между плочите на абсорбера са поставени плочки (с размер $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$) от пластмасов сцинтилатор. Полученият сигнал, след преобразуване на дължината на вълната, се отвежда чрез световод до хибридни фотодиоди (HPD). Цилиндричната част покрива региона $|\eta| < 1.3$ и е съставена от две половини като всяка половина се състои от 18 клинообразни елемента. Всеки един от тези елементи покрива 20° от полярния ъгъл ϕ , а абсорбиращите плочи са успоредни на оста на снопа. Затварящите части покриват региона $1.3 < |\eta| < 3.0$. Всяка затваряща част се състои от 18 сектора и е монтирана по такъв начин, че на един клин от цилиндричната част съответстват по

един сектор в двете затварящи части. Дебелината на месинговите плочи е различна за цилиндричната част и затварящите части, а сцинтилационните слоеве са с дебелина 3.7 mm .

1.3.4 Свръхпроводящ соленоид

Главният елемент на детекторния комплекс е свръхпроводящия соленоид [14], който създава магнитно поле 4 T . Намотката на соленоида е поставена в криостат и работи при хелиева температура. По-важните параметри на магнита са представени в таблица 1.3.

Таблица 1.3: Параметри на свръхпроводящия соленоид на CMS

Големина на маг. индукция	4 T
Вътрешен диаметър	5.9 m
Дължина	12.9 m
Брой навивки	2168
Ток	19.5 kA
Акумулирана Енергия	2.7 GJ

1.3.5 Мюонна система

В CMS се използват три вида мюонни газови детектори: дрейфови камери (DT), камери със съпротивителна плоскост (RPC) и катодни стрипови камери (CSC). Както вече беше споменато те са разположени между плочите на магнитовода. Основното предназначение на мюонната система [15][16] е идентификация и измерване на импулса на мюоните. В цилиндричната част на детекторния комплекс са поставени дрейфови камери (DT) и камери със съпротивителни плоскости (RPC), а в затварящите части - катодни стрипови камери (CSC) и камери със съпротивителна плоскост. . В цилиндричната част има четири мюонни станции (MB1, MB2, MB3, MB4) (виж фиг. 1.5). В MB1 и MB2 са разположени по два слоя RPC и между тях слой DT. В останалите две (MB3 и MB4) - по един слой RPC и DT като към всяка дрейфова камера се асоциират две камери със съпротивителна плоскост.

Благодарение на много добрата си пространствена разделителна способност DT заедно с трековия детектор служат за прецизно измерване на импулса на мюоните. Основният елемент на DT е дрейфова клетка, показана на

Изолирующие ленты

Анодная нишка

Электроды

13 mm

42 mm

Катодные электроды

15

слоеве. Черири слоя са долепени един до друг, образувайки суперслой като в съседните слоеве клетките са отместени на половин ширина на дрейфовата клетка. Многослойната структура подобрява пространствената разделителната способност, така че суперслоевите имат пространствена разделителна способност $\sim 100 \mu m$. Всяка камера е построена от три суперслоя, два от тях служат за измерване на полярния ъгъл ($R\phi$), а един - координатата по оста на снопа (Rz). В най-външната мюонна станция Rz суперслоят липсва.

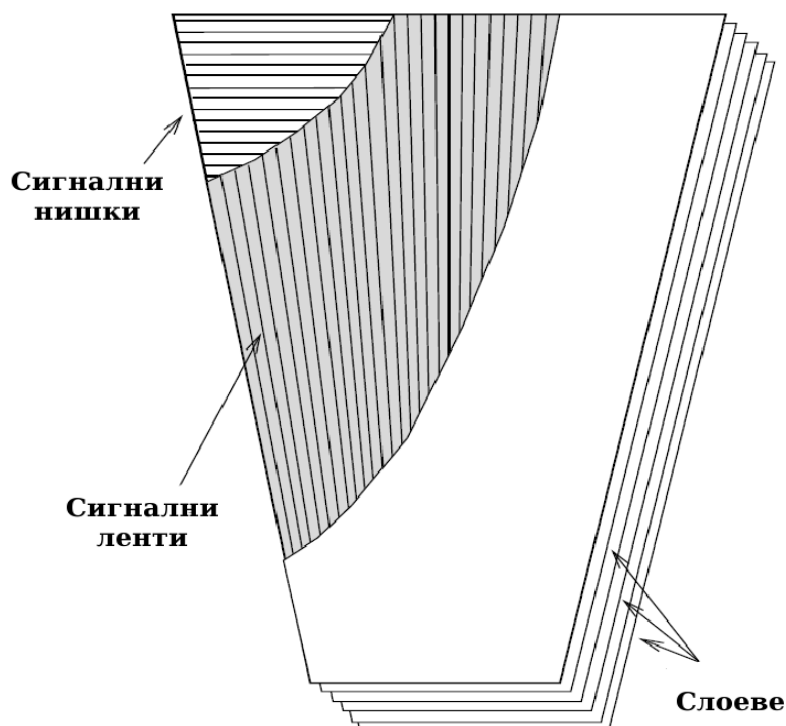
RPC притежават много добри разделителна способност по време и бързодействие, сравними с тези на сцинтилаторите, и добра пространствена разделителна способност, поради което информацията от тях се използва за точно определяне на момента на пресичане на групите частици и от тригера от първо ниво. Техният принцип на действие и реализацията им в конкретния случай са обект на разискване в глава 2 и глава 3 .

Във всяка от затварящите части на CMS детекторите също са разположени в четири мюонни станции - ME1, ME2, ME3 и ME4. ME1 и ME2 представляват дискове перпендикулярни на оста на снопа съставени от по три концентрични пръстена, а ME3 и ME4 - дискове съставени от по два концентрични пръстена. Сигналните електроди на RPC са насочени радиално.

Катодните стрипови камери са многонишкови детектори, които се използват за точни пространствени и времеви измервания в тежка радиоактивна среда и силно магнитно поле. Основният елемент на тези детектори е слой представляващ газова междина ограничена от две катодни равнини, едната от които е изградена от лентови електроди. Между катодните равнини има разположени анодни нишки, напречно на катодните ленти (фиг. 1.7).

При преминаване на заредена частица през газовия обем се отделят свободни електрони и положително заредени йони. Електроните се събират върху анодните нишки, а положителният заряд се събира върху катодните равнини. Бързият отклик на детектора се определя от малкото разстояние между нишките, което е $3.4 mm$. Използваната газова смес е $Ar - CO_2 - CF_4$ (30% - 50% - 20%).

Многослойният дизайн на DT и CSC позволява самотригериране на детекторите, което означава, че при сработване на няколко слоя се реконструира сегмент от мюонна следа и може да бъде използван по-нататък от алгоритмите за реконструиране на мюонни следи.



Фигура 1.7: Схема на катодна стрипова камера

1.3.6 Тригерна система и система за събиране на данни

Честотата на сблъскване на групите от частици в LHC е 40 MHz , което води до приблизително 10^9 събития в секунда при проектираната светимост. Тъй като само сто сблъсквания в точката на взаимодействие за секунда ще бъдат записвани за по-нататъшно обработване, тригерната система трябва да има фактор на отстраняване 10^7 . Тригерната система и системата за събиране на данни на CMS[17][18] се състоят от четири части: крайната електроника на детекторите, тригерните системи от първо ниво (на калориметрите, мюонната система и глобална), мрежата за пренасяне и записване на данните, и тригерна система от високо ниво, представляваща компютърна ферма, на която се изпълняват филтриращи събитията програми.

Времето необходимо за пренос на сигналите от крайната електроника на детекторите до подземните помещения, където се намират електронните модули на тригерната система от първо ниво, вземането на решение и изпращането на сигналите отново до крайната електроника на детекторите

при едно пресичане на групи частици в центъра на CMS е приблизително $3.2\,\mu s$. Постъпилите данни през това време се съхраняват в буфери (линии за задържане). Латентността на тригера от първо ниво е по-малка от $1\,\mu s$. Тригерната система от първо ниво използва информация от калориметрите и мюонната система. Решенията за приемане или отхвърляне на данните се вземат след сравняване на напречните енергия E_T и импулс p_T на обекти като фотони, електрони, мюони и адронни струи с прагови стойности като се включва, пълната напречна енергия E_T , и сумарната липсваща напречна енергия E_T^{miss} . Събитията след подбора ще бъдат с честота $100\,kHz$. Понататък данните се компресират и се прехвърлят в памети с двоен достъп, за да могат да бъдат достъпни за системата за събиране на данни.

Системата за събиране на данни и тригерната система от високо ниво четат данните от крайната електроника на детекторите за тези събития, които са избрани от тригерната система от първо ниво, комплектуват ги и избират най-интересните събития за записване в хранилищата за данни. Тригерната система от високо ниво получава средно едно събитие с големина около $1\,MB$ на всеки $10\,\mu s$ ($20\,\mu s$ при пробните сеанси за събиране на данни). На изхода на тригерната система от високо ниво честотата на събитията трябва да бъде редуцирана до около $100\,Hz$. Такова редуциране ще бъде постигнато без внасяне на мъртво време, чрез използване на алгоритми, комбиниращи бързина, гъвкавост и прецизност. Това е възможно само при използването на пълния набор данни от всички детектори.

Глава 2

Камери със съпротивителна ПЛОСКОСТ

Настоящата глава е посветена на принципите на работа и физиката на камерите със съпротивителна плоскост, след което е представен кратък обзор на тяхното използване във физиката на високите енергии.

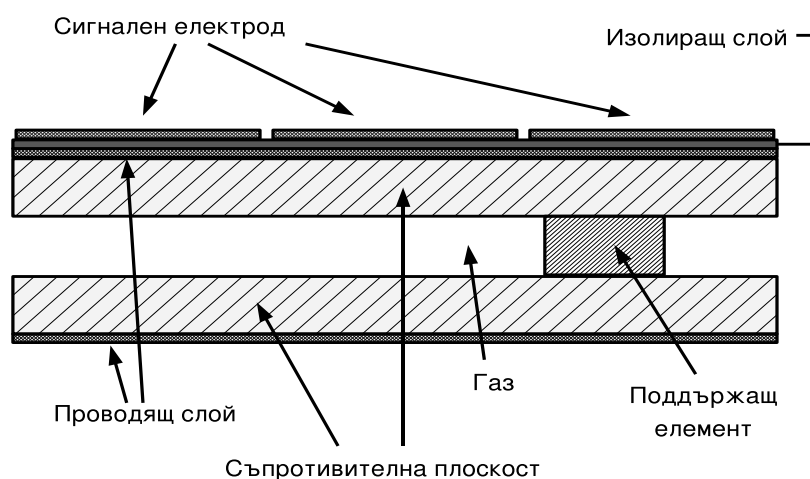
2.1 Принцип на действие на камерите със съ- противителна плоскост

Камерите със съпротивителна плоскост (RPC)[19] са проточни газови детектори на йонизиращи частици. Газовият процес се състои от две успоредни плоскости, изработени от материал с голямо специфично съпротивление, поставени на разстояние няколко милиметра една от друга. Пространството между двете плоскости е запълнено с газова смес с голям коефициент на поглъщане на ултравиолетова светлина. Външната повърхност на плоскостите е покрита с тънък слой графит и така се формират съпротивителните електроди. При подаване на високо напрежение върху графитните слоеве между съпротивителните електроди се създава хомогенно електрично поле. Когато йонизираща частица премине през газовия обем там се получава газов разряд. Отделените при този процес свободни електрони започват да се движат към анода, като при това си движение индуцират заряд върху сигналните електроди. Последните представляват проводящи ленти със ширина до няколко сантиметра поставени от външната страна на анодния съпротивителен електрод и изолирани от него чрез тънък непроводящ слой. Полученият вър-

ху сигналните електроди заряд се обработва от детекторната електроника, а отделеният в газовия обем заряд се отвежда през високоволтовата верига. При натрупване на заряд, надвишаващ определен праг на изхода на електрониката се изработва сигнал и сигналния електрод се счита за сработил.

RPC могат да работят в два режима в зависимост от газовия разряд получаващ се при преминаване на йонизираща частица - стримерен и лавинен [20].

На фиг. 2.1 е показана принципна схема на газов процеп. При преминаване на йонизираща частица през газовия обем в него се отделят свободни електрони и положително заредени йони в следствие на първичната йонизация. Големината на тези заряди, отрицателен - сума от заряда на електроните и положителен - сума от заряда на положителните йони, се определя от средния брой събития на първична йонизация (среден брой кластери) и вероятностното разпределение на броя на електроните във всеки кластер.



Фигура 2.1: Принципна схема на газов процеп.

Разстоянието между кластерите се подчинява на експоненциално разпределение. Следователно, вероятността първият кластер да се намира в интервала $[x, x + dx]$ е

$$P(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad (2.1)$$

където λ е средния свободен пробег на йонизиращата частица между две

събития на първична йонизация. Тъй като събитията на йонизиране са независими и енергетичните загуби на частицата са пренебрежими, то за вероятността за намиране на n -тия кластер между x и $x + dx$ се получава Γ -разпределение [25]

$$P_{clu}(n, x) = \frac{x^{n-1}}{(n-1)! \lambda^n} e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (2.2)$$

От уравнение 2.1 следва, че ако d е ширината на газовия процеп, то вероятността за получаване на n първични електрона е

$$P(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^n e^{-\frac{d}{\lambda}} \quad (2.3)$$

Величината $\bar{n} = \frac{d}{\lambda}$ представлява средния брой кластери получаващи се в газовия процеп (ГП) и зависи както от газовата смес така и от ширината на ГП. Ако се приеме, че всеки първичен електрон дава сигнал и праговете на електрониката са равни на нула, то може да се пресметне теоретичната максимална ефективност ϵ_{th} на газов процеп

$$\epsilon_{th} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\bar{n}} \quad (2.4)$$

Поради наличието на електрично поле, положителните заряди започват насочено движение към катода, а отрицателните - към анода. От макроскопична гледна точка зарядите се движат равномерно с големина на скоростта определена от големината на интензитета на електричното поле и газовите свойства, и праволинейно в направление перпендикулярно на успоредните високоволтови електроди. Дрейфовата скорост на електроните v_D е много по-голяма от тази на йоните в следствие на това, че електроните имат много по-малка маса. Ако кинетичната енергия на електроните е достатъчно голяма, те започват йонизационен процес - вторична йонизация и от приложеното напрежение и характеристиките на използвания газ зависи дали в работния обем ще се развие стримерен или лавинен газов разряд.

Всеки от първичните електрони ще даде началото на лавина, която ще расте, докато достигне съпротивителния електрод. Ако вероятността електрон от лавината да йонизира не зависи от предишното събитие на йонизация, то развитието на лавината се описва от коефициента на Таунсенд (α) и коефициента на захващане на електрони (β). Коефициентът на Таунсенд има смисъл на среден брой електрони получени на единица дължина на дрейф на един електрон, а коефициента на захващане β представлява броят елект-

рони, захванати от молекулите на газа на единица дължина. Нека лавина се състои от n електрона и се намира в точка x . Вероятността тя да съдържа $n + 1$ електрона в $x + dx$ е $n\alpha dx$. Следвайки същата логика, вероятността лавината да съдържа $n - 1$ електрона в $x + dx$ е съответно $n\beta dx$. Следователно средния брой електрони \bar{n} и средния брой положителни йони \bar{p} се описват от уравненията:

$$\frac{d\bar{n}}{dx} = (\alpha - \beta)\bar{n} \quad \frac{d\bar{p}}{dx} = \alpha\bar{n} \quad (2.5)$$

при $\bar{n}(0) = 1$ и $\bar{p}(0) = 0$ се получават решенията:

$$\bar{n}(x) = e^{(\alpha-\beta)x} \quad \bar{p}(x) = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} (e^{(\alpha-\beta)x} - 1) \quad (2.6)$$

Средният брой на отрицателните йони е $\bar{p} - \bar{n}$. Както се вижда от уравнение (2.6) средният брой електрони в лавината \bar{n} зависи от величината $\eta = \alpha - \beta$, наречена ефективен коефициент на Таунсенд. При големите стойности на редуцирания интензитет на електричното поле¹ E/p , при които работят камерите със съпротивителна плоскост, вероятността в лавината да има n електрона се задава от разпределение на Поля (Polya)[22]:

$$P(n) = \left[\frac{n}{N} (1 + \theta) \right]^\theta e^{-\frac{n}{N}(1+\theta)}, \quad (2.7)$$

където $\theta = 0,5$. При стойности на газовото усилване $\alpha d > 20$ отделените свободни заряди за време по-малко от времето за развитието на една лавина са толкова големи, че полето създадено от тях става съизмеримо с външното електрично поле. В тази област със силно електрично поле процесите на йонизация са така ускорени, че между високоволтовите електроди се образува стример (плазмен канал) [26]. Основна роля за пространственото развитие играе процесът на фотойонизация. Движейки се с голяма дрейфова скорост електроните от главата на лавината възбуждат газовите молекули до състояния такива, че излъчените при релаксиране фотони имат енергия, достатъчна за йонизация.

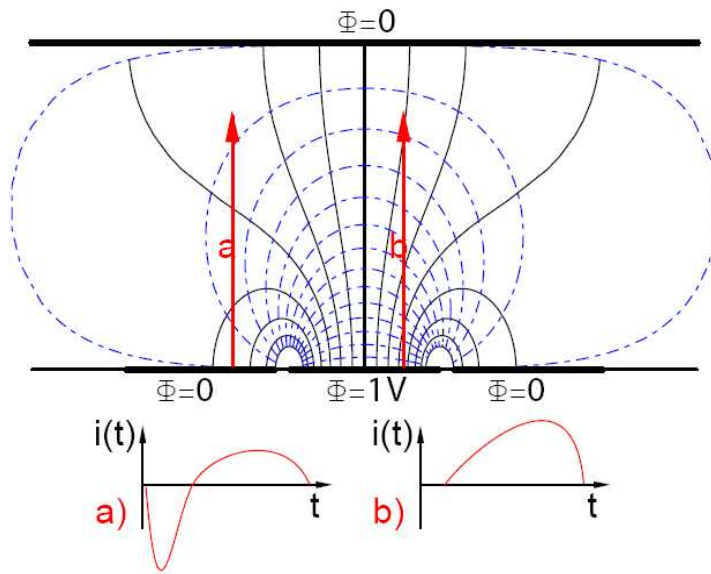
Движейки се в електричното поле свободните електрони индуцират токов сигнал върху сигналите електроди на RPC. Имайки много по-малка подвижност положителните и отрицателните йони индуцират много по-малък сигнал. Токът, индуциран върху един сигнален електрод, може да бъде прес-

¹Редуцираният интензитет на електричното поле E/p представлява интензитетът на електричното поле разделен на атмосферното налягане

метнат по теоремата на Рамо като се получава следното равенство[23][24]

$$i(t) = \vec{E}_w \cdot \vec{v}_D e_0 N(t), \quad (2.8)$$

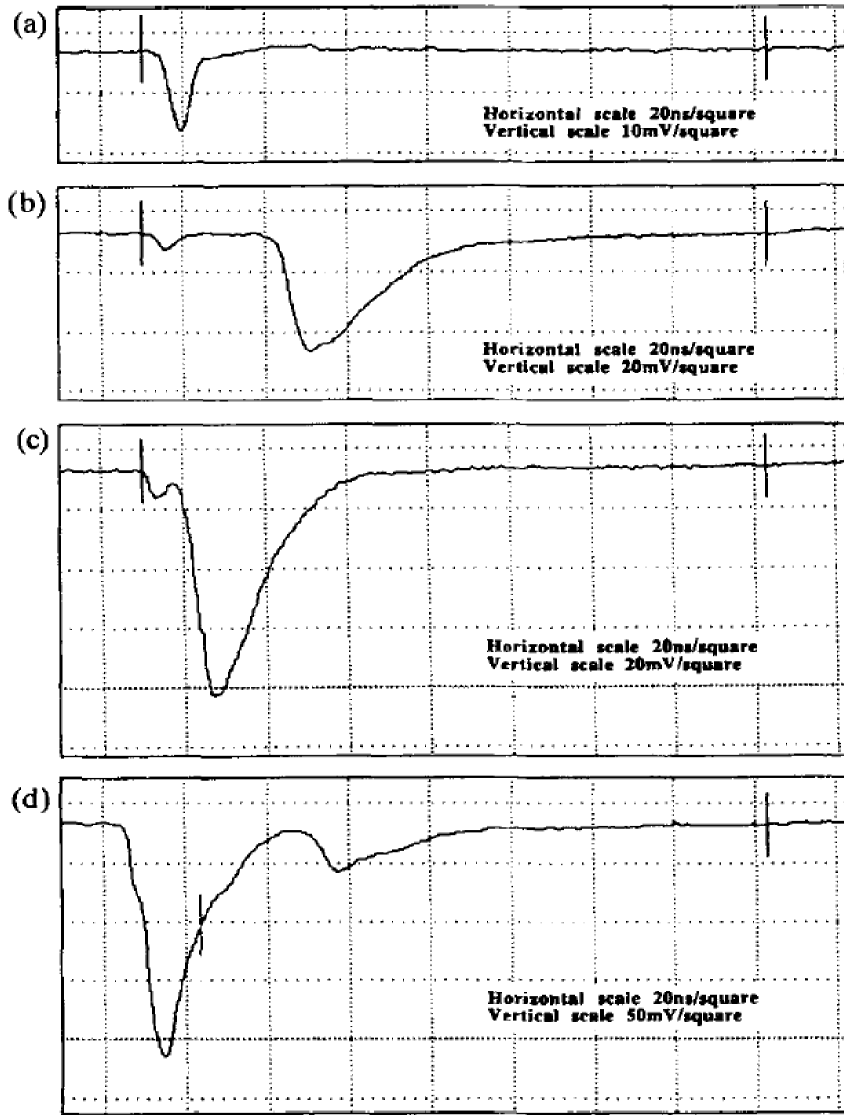
където e_0 е заряда на електрона, \vec{v}_D е дрейфовата скорост, $N(t)$ - броя на всички свободни електрони, получени в резултат на газовия разряд в момента t , а \vec{E}_w се нарича тегловна функция и представлява електричното поле в газовия процеп, ако електрода има потенциал единица, а всички останали електроди са заземени.



Фигура 2.2: Схематично представяне на тегловната функция на сигнален електрод участващ в система от електроди. Представени са два примера за индуцирания ток пресметнат като скалярно произведение на скоростите на движещи се заряди и тегловното поле.[27]

На фиг. 2.3 са представени различни форми на токовия импулс получен на сигналния електрод с ширина 15 cm на RPC, работеща в различни режими в зависимост от захранващото напрежение. Камерата има съпротивителни електроди с дебелина 2 mm и ширина на газовия процеп 2 mm, а работната газова смес е $Ar/iso - C_4H_{10}/C_2H_2F_4 - 10/7/83$

В случая на лавинен разряд в газовия процеп, токовият сигнал е супер-



Фигура 2.3: Форма на токови импулси получени на сигнален електрод при различни работни напрежения. Сигнал от лавина (а, 9.4 kV). Сигнал от стример появил се след лавина (b, 9.6 kV). Сигнал от стример появил се след лавина с по-малко закъснение (с, 10.2 kV) и сигнали от лавина и стример слети в един импулс(d, 11.4 kV)[28].

позиция от сигналите индуцирани от всички развиващи се лавини:

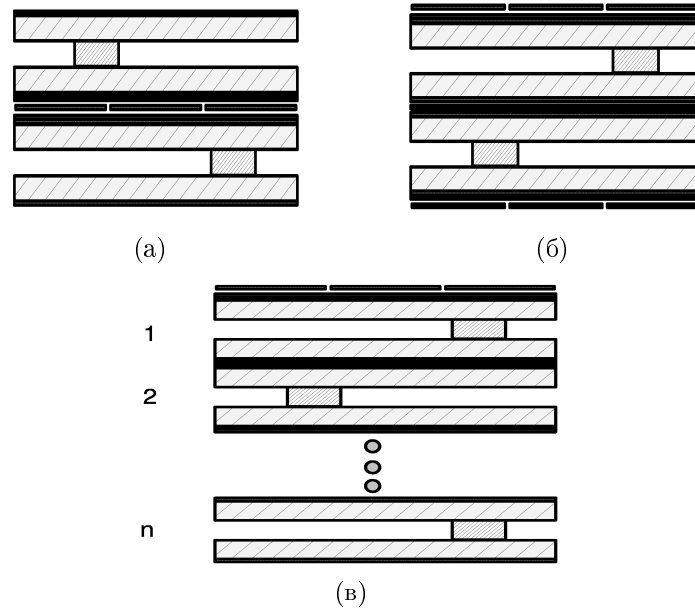
$$I(t) = \sum_{j=1}^{n_{cls}} \vec{E}_w(\vec{x}_j) \cdot \vec{v}_{Dj} e_0 N_j(t) \quad (2.9)$$

където n_{cls} е броя на първичните електрони, а с индекс j са означени де-

финираните по-горе величини отнасящи се за лавината инициирана от j -тия първичен електрон. След интегриране на индуцирания ток $I(t)$ за интервала от време $[0, T]$ на развитие на процесите на газово умножение се получава индуцирания върху сигналния електрод заряд Q_{ind} :

$$Q_{ind} = \int_0^T dt \sum_{j=1}^{n_{cls}} \vec{E}_w(\vec{x}_j) \cdot \vec{v}_{Dj} e_0 N_j(t) \quad (2.10)$$

Два или повече газови процепи могат да се долеят един до друг като по този начин новополучената конструкция има по-голяма ефективност в сравнение с ефективността на всеки от съставлящите я процепи по отделно. На



Фигура 2.4: (а) двупроцепен дизайн с поставени между единичните процепи сигнални електроди, (б) двупроцепен дизайн със сигнални електроди поставени от външната страна, (в) многопроцепен дизайн

фиг. 2.4а е показана принципна схема на двупроцепен дизайн, при който сигналните електроди са поставени между двата ГП. Сигналът получен върху тях е логическо “ИЛИ” от зарядите индуцирани от всеки от газовите процепи поотделно. Ако сигналните електроди са поставени от външната страна на ГП (фиг. 2.4б) полученият сигнал е жично “ИЛИ” от сигналите получени на съответстващите си сигнални електроди. При многопроцепения дизайн (фиг. 2.4в) сигналите получени на сигналните електроди са суперпозиция от работата на съставлящите ГП.

Тегловата функция на сигнален електрод в общия случай на n газови процепи (фиг. 2.4в) има следния вид [30]

$$E_w = \frac{\epsilon_r}{n\epsilon_r d + (n+1)s}, \quad (2.11)$$

където ϵ_r е диелектричната проникваемост на материала на съпротивителните електроди, s - тяхната дебелина, а d - ширината на газовия процеп.

Един сигнален електрод се счита за сработил, ако индуцирания върху него заряд надвиши определена прагова стойност q_{thr} .

$$Q_{ind} > q_{thr} \quad (2.12)$$

2.2 Типове камери със съпротивителна плоскост използвани в експериментите във физика на елементарните частици

В началото RPC са били използвани в стримерен режим, при който се получават достатъчно големи сигнали и следователно се използва по-проста електроника. По-късно е постигнат значителен напредък при разработването на RPC работещи в лавинен режим, осигуряващ работа на детекторите при интензивни потоци от частици. Понастоящем се използват камери работещи и в двата режима. В зависимост от приложението им има два типа камери със съпротивителна плоскост, силно различаващи се по технически характеристики [29]. Единият тип RPC се използват за идентифициране на типа на частиците по време на прелитане (TOF RPC) и се характеризират с разделителна способност по време под 100 ps , ширина на газовия процеп до $300\text{ }\mu\text{m}$ и големина на площта на покриване до 100 m^2 [31, 32]. Другата група камери намират приложение в тригерни, трекови системи и калориметри (Trigger RPC). Те имат времева разделителна способност $1 - 3\text{ ns}$, най-често срещана ширина на газовия процеп $2 - 3\text{ mm}$, а площта, която може да се покрие с тях достига до около $50\,000\text{ m}^2$. Началото на разработването на такъв тип RPC е поставено в [19].

2.2.1 Материали използвани за изработване на съпротивителните електроди

Високото напрежение приложено на съпротивителните електроди повишава вероятността за случайни газови разряд, а от там се увеличава шума на детектора. Това налага специални изисквания към технологията за изработване на електродите. Те трябва да бъдат с хомогенни електрични характеристики и с колкото се може по-гладка и чиста вътрешна повърхност. Работната газовата смес трябва да предлага добро поглъщане на фотони от ултравиолетовата област (за да се осигури добро локализиране на газовия разряд), необходимото газово усилване в желаната област от работни напрежения и по възможност да не ускорява стареенето на съпротивителните електроди.

Материали за съпротивителните електроди

Някои от характеристиките на често използваните материали са представени в таблица 2.1[29]

Таблица 2.1: Някои характеристики на материалите използвани за съпротивителни електроди

	Обикновено стъкло	Полупроводниково стъкло	Бакелит
ρ [Ω].cm	$10^{12} - 10^{13}$	$10^9 - 10^{13}$	$10^9 - 10^{12}$
Масово производство	Да	Не	Да
Качество на повърхността	Добро	Добро	Лошо
Стабилност с фреони	Има проблеми	Лоша	Добра ^a
Тип проводимост	Йонна	Електронна	Йонна

^aТова би трябвало да се разбира като “относително добра”, след като се вземат под внимание резултатите публикувани в [33, 34]

Както се вижда от таблицата няма идеални материали. Обикновеното стъкло има твърде голямо съпротивление, нежелани ефекти от поляризация на материала и химически проблеми с продуктите на химично разпадане на фреон-съдържащи газови смеси[19]. Полупроводниковото стъкло не се произвежда масово и взаимодейства химически с фреонове газови смеси. Елек-

тродите от бакелит имат грапава повърхност, което води до увеличен шум при работа на камерите. Този нежелан ефект се отстранява чрез нанасяне на тънък слой ленено масло върху повърхността на бакелитените плоскости. Бакелитът и обикновеното стъкло имат йонна проводимост, което води до появата на поляризационни ефекти, състоящи се в промяна на характеристиките на материала след облъчване с мощен радиоактивен източник. Средното напрежение върху газовия обем V_{gas} , а от там и характеристиките на RPC зависят от пада на напрежение върху съпротивителните електроди: $V_{gas} = V - IR$, където V е захранващото напрежение, I - средния ток през съпротивителните електроди и R е съпротивлението им. Важно е да се отбележи, че характеристиките на камерите са стабилни, ако токът е малък или постоянен с времето. Ако токът рязко се промени до друга стабилна стойност характеристиките на RPC не се стабилизират мигновено. Една от интерпретациите на продължителните електрични процеси в диелектрици с йонна проводимост е захващане и топлинно движение на йони в структурата им. Тези ефекти не са толкова важни за тригерните RPC, но са опасни за TOF RPC, защото променят времевите характеристики, които са важни за камерите с такова приложение.

2.2.2 Газови смеси

В таблица 2.2[29] са показани накратко газови компоненти използвани за RPC с различни приложения. Най-често използваните газови смеси имат като основна съставка тетрафлуоретан $C_2H_2F_4$. Тези смеси абсорбират добре фотоните и имат голяма ефективност за взаимодействие със заредени частици.

Таблица 2.2: Газови компоненти за RPC с различно приложение

	TOF	Trigger	TOF, Trigger
Работен режим	стримерен	стримерен	лавинен
Благородни газове	Ar, Ne	Ar	—
Органични газове	C_4H_{10}, C_3H_4 C_2H_4, C_4H_6	C_4H_{10}	C_4H_{10}
Фреони		$C_2H_2F_4$	$C_2H_2F_4, SF_6$

Активните продукти получени в газовия процес от разпадането на фрео-

ните в следствие на газов разряд могат да повредят вътрешната повърхност на електродите и в следствие да се влошат работните характеристики на камерите. Бързо стареене на RPC със стъклени електроди, работещи в стримерен режим с фреон-базирана газова смес ($Ar-30\%$, $C_2H_2F_4-62\%$, $C_4H_{10}-8\%$) е наблюдавано в RPC системите на BELLE, KEK[35]. Стабилност на работата е била постигната след премахване на остатъците от водни пари от газовата смес. Не е напълно ясно, обаче, дали това е била единствената причина за наблюдаваното стареене.

2.2.3 RPC в стримерен режим

Основното предимство на камерите работещи в стримерен режим са големите и наситени сигнали, което води до използването на по-проста електроника и малък паразитен сигнал в съседните сигнални електроди. RPC за идентификация на частици по време на прелитане трябва да имат много добра разделителна способност по време. За получаване на такива характеристики е необходимо да се използват камери с малка ширина на газовия процеп d и колкото е възможно по-високо работно напрежение.

Камери, намиращи приложение в тригерните и трековите системи трябва да притежават добра стабилност на работните си характеристики при покриването на големи площи и времева разделителна способност около $1-3\text{ ns}$. Експериментите показват, че тези характеристики се постигат при ширина на газовия процеп 2 mm и сравнително по-ниски работни напрежения.

RPC за TOF

Първият експеримент във физиката на елементарните частици, в който са използвани камери със съпротивителна плоскост с пикосекунден детектор е VEPP2, BINP, Новосибирск. Детекторът се е състоял от две камери със съпротивителна плоскост с обща площ 0.1 m^2 . Всяка от камерите се е състояла от един газов процеп с ширина 0.1 mm и времево разрешение 75 ps . RPC са използвани както за TOF така и за тригер.

Другият експеримент, в който са използвани TOF RPC е NA49[36]. Детекторната подсистема се състои от 40 RPC с площ около 0.5 m^2 . Газовите процепи са с ширина 0.1 mm , а времевото разрешение - 75 ps .

RPC в тригерни и трекови системи

В таблица 2.3 е показан списък на експериментите, които използват RPC в тригерни и трекови системи. Както се вижда от таблицата, част от експериментите са на ускорители, а другите не, но във всички случаи RPC имат голяма обща площ. Всички камери са с процент широк 2 mm , а газовата смес е оптимизирана така, че в различните случаи да се получи добро локализиране на газовите разряди, минимизиране на отделения заряд, максимална ефективност, бавно стареене и т.н. Експериментът L3 използва газова смес

Таблица 2.3: Тригерни и трекови системи базирани на RPC работещи в стримерен режим

Експеримент	Лаборатория	RPC Площ [m^2]	Материал на електродите
L3	e^+e^- CERN	300	Бакелит
BABAR	e^+e^- SLAC	~ 2000	Бакелит
BELLE	e^+e^- KEK	2200	Стъкло
ALICE	CERN	144	Бакелит
ARGO	YBJ, Tibet	5800	Бакелит
OPERA	Gran Sasso	4600	Бакелит
MONOLITH	Gran Sasso	58000	Стъкло

$Ar - 59\%$, $iso - C_4H_{10} - 6\%$, $C_2H_2F_4 - 35\%$.

В експеримента MONOLITH се използват RPC[37] със съпротивителни електроди от стъкло с размери $243 \times 2000\text{ mm}^2$ и специфично съпротивление при стайна температура $10^{12}\Omega.cm$, подходящи да работят в стримерен режим и малък поток на частиците. Повърхностното съпротивление на графитния слой е $400\text{ k}\Omega/\square$. Използваната газова смес е $Ar - 48\%$, $iso - C_4H_{10} - 4\%$, $C_2H_2F_4 - 48\%$

Експериментът ALICE използва RPC [38] с един газов процент, електроди от бакелит с малко съпротивление $10^9\Omega.cm$ и дебелина 2 mm , работещи с газова смес $Ar - 49\%$, $iso - C_4H_{10} - 7\%$, $C_2H_2F_4 - 40\%$, $SF_6 - 4\%$.

Използваните в експеримента OPERA камери със съпротивителна плоскост са описани в [39].

2.2.4 RPC в лавинен режим

Недостатъкът на стримерния режим на работа на камерите със съпротивителна плоскост е малкият поток частици, които може да бъде регистриран.

При голям поток йонизиращи частици от порядъка на $1\text{ Hz}/\text{cm}^2$ в газовия процеп се отделя голямо количество свободни заряди, които се натрупват по вътрешната повърхност на съпротивителните електроди, при което електричното поле в газовия обем намалява и RPC излиза от нормален режим на работа. Този проблем се преодолява чрез използване на RPC в лавинен режим на работа. Приложеното високо напрежение трябва да бъде подбрано под праговата стойност за лавинно-стримерен преход. Съществено значение за работа в този режим е добавянето на подтискаща развитието на стримери съставка SF_6 [40] към газова смес съставена от $C_2H_2F_4$ и C_4H_{10} . За да се осигури нужната за TOF времева разделителна способност по време се използват процепи с малка ширина и колкото е възможно по-високи работни напрежения - близки, но под прага на преход в стримерен режим. Тригерните RPC работят при напрежения, при които имат много добра ефективност за регистриране на йонизиращи частици и могат да работят стабилно при поставените от експеримента условия (поток частици, температура, продължителност на експлоатация). Имат времева разделителна способност $1 - 3\text{ ns}$ и най-често ширината на газовия процеп е 2 mm .

RPC за TOF

Използваните за тази цел камери (таблица 2.4[29]) са с многопроцепен дизайн. Този тип RPC работят с газова смес от $C_2H_2F_4 - 90\%$, $iso - C_4H_{10} - 5\%$, $SF_6 - 5\%$, а единичния газов процеп е с ширина $\sim 0.2\text{ mm}$.

Таблица 2.4: TOF системи от RPC работещи в лавинен режим

Експеримент	Лаборатория	RPC Площ [m^2]	Разделителна способност по време [ps]
HARP	PS, CERN	10	< 200
ALICE	LHC, CERN	~ 100	< 100
STAR	RHIC, BNL	~ 60	< 100

RPC в тригерни и трекови системи

В тригерните системи на експериментите на ускорителя LHC ATLAS, CMS и LHCb се използват огромни системи от RPC, работещи в лавинен режим. Тези камери са способни да работят с поток на частиците до 1 kHz , имат съпротивителни електроди с дебелина 2 mm изработени от бакелит и ширина

на газовия процеп е 2 mm . Работните газови смеси също са подобни: $C_2H_2F_4 - 95 \div 97\%$, $iso - C_4H_{10} - 3 \div 4\%$, $SF_6 - 0.2 \div 1\%$.

2.3 Работни характеристики на камерите със съпротивителна плоскост

Основните характеристики на RPC при работа в лавинен и стримерен режим са:

- ефективност за регистриране на йонизиращи частици от определен тип;
- разделителна способност по време;
- пространствена разделителна способност;
- бързодействие;
- максимален поток от частици, при който камерата не променя основните си характеристики;
- среден брой на съседни сигналните електроди, сработили при преминаване на йонизираща частица;
- среден ток протичащ през газовия процеп по време на работа;
- стабилност на тока през газовия процеп за времето на експлоатация на камерите;
- работно плато - интервала от напрежения, в който RPC удовлетворява изискванията към допустимите стойности на определени нейни характеристики.

2.4 Заключение

Камерите със съпротивителна плоскост са газови детектори със времева и пространствена разделителна способност сравними с тези на сцинтилаторите. Те могат да работят в стримерен и лавинен режим. При първият се постига добра ефективност и се използва значително по-проста детекторна

електроника, докато втория тип RPC могат да работят при по-високи натоварвания (потоци на йонизиращи частици), но изискват по-прецизна електроника. Значително по-малката себестойност на камерите със съпротивителна плоскост, в сравнение със сцинтилационните детектори, ги прави широко използвани в тригерните и TOF системи във физиката на високите енергии, защото с тях могат да се покрият необходимите големи площи в детекторните системи.

Глава 3

Камери със съпротивителна плоскост за мюонната система на CMS

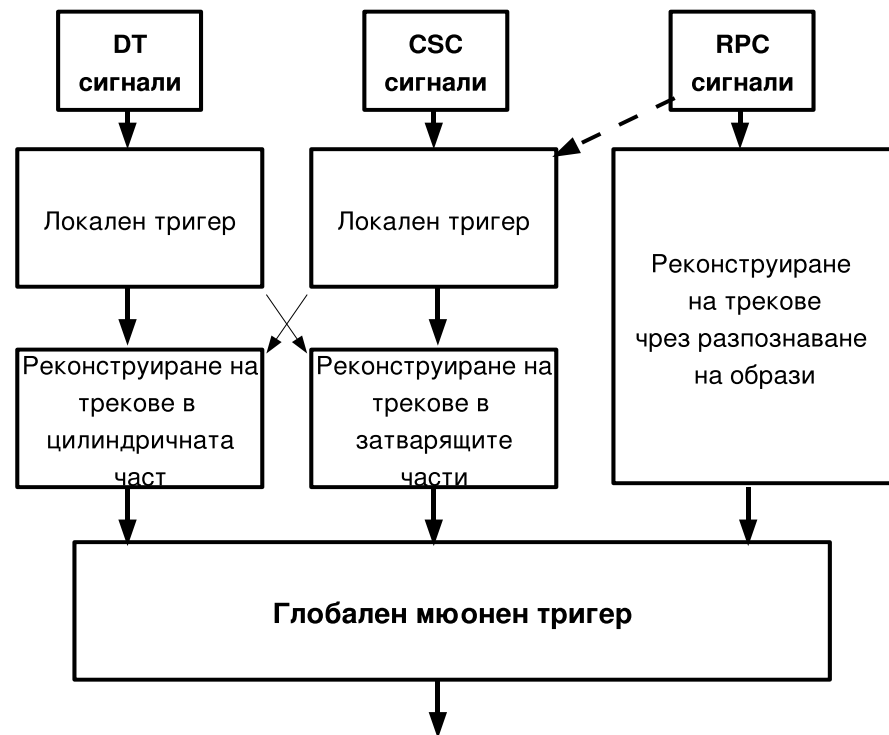
В настоящата глава ще бъдат разгледани ролята на RPC в мюонната система на CMS и техния дизайн за цилиндричната част на детектора.

3.1 Мюонна тригерна система

Както беше споменато в раздел 1.3.6 тригерната система на CMS има две нива. Тригерът от първо ниво е хардуерен, а тригерът от високо ниво е софтуерен.

Мюонният тригер от първо ниво [41] използва и трите типа детектори в мюонната система. Всеки тип детектори си има собствена независима тригерна логика (фиг. 3.1). В DT и CSC информацията се обработва локално и всяка камера изработва собствен тригер и реконструира треков сегмент. След това сегментите от трекове се подават на модула за реконструиране, който ги комбинира и им приписва напречен импулс. Към глобалния мюонен тригер се изпращат четирите мюонни кандидата с най-голям напречен импулс и добро качество на реконструкция. Сигналите от всички RPC във всички станции се събират и подават едновременно на система, която търси мюонни кандидати, по сравнителен метод с шаблони (РАСТ)[42], за всички мюонни трекове, приписва стойност на напречния импулс на всеки мюонен кандидат и изпраща данните към сортиращ модул, който избира четирите

мюона с най-голям импулс от кандидатите в цилиндричната и затварящите части на детектора, и предава информацията за тях на глобалния мюонен тригер, който налага прагови условия за напречния импулс и други изисквания. Мюоните избрани от тригерната система могат да бъдат:



Фигура 3.1: Схема на глобалния мюонен тригер

- ключови - получени от разпадите на W , Z , γ^* , t , b и c ;
- получени при разпадане на π и K ;
- “лъжливи” тригерни сигнали - получени от случайни съвпадения на мюонните детектори, поради шумови сигнали или сигнали от частици с малък пробег получени от неутралния фон.

“Лъжливите” тригерни сработвания в DT и CSC са с много малка вероятност поради техния многослоен дизайн. От друга страна, при голям шум приносът на RPC може да бъде значителен.

3.1.1 Тригериране чрез сравняване с шаблони

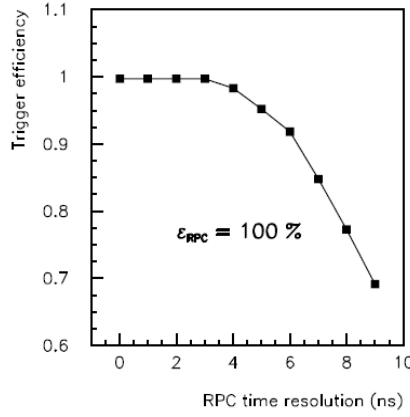
РАСТ се основава на съвпадения във времето и пространството на сработвания на сигналните електроди на RPC в четирите мюонни станции. За удобство такова съвпадение ще бъде наричано кандидат за трек. Поради загубите на енергия и многократното разсейване има много възможни комбинации от сработили сигнални електроди, отговарящи на мюонен трек с определен напречен импулс и определена посока на движение. От това следва, че РАСТ трябва да разпознава разнообразни комбинации от попадения в RPC при определен напречен импулс. За да се изработи тригерен сигнал при дадена комбинация от сработили сигнални електроди, поради преминаването на мюон, РАСТ извършва следните две операции: изисква едновременно сработване на най-малко 4 от 6-те мюонни станции в определена област (т. нар. “4/6”-алгоритми [43]) и приписва импулс. Съвпадането във времето дава възможност кандидата за мюонен трек да бъде привързан към определено пресичане на групите протони. Кандидатът за трек се формира от комбинация от сработили сигнални електроди такава, че да съвпада с една от предварително дефинираните комбинации (шаблони) за мюони с определен напречен импулс. Шаблоните са конструирани така, че да бъдат взаимноизключващи се, за да се избегнат многозначности при определяне на напречния импулс. Ето защо те са разделени в класове с дадени напречен импулс и посока. РАСТ е прагов тригер т.е. на мюонен кандидат се приписва напречен импулс, ако кривината му е по-малка от който и да е шаблон с по-малък импулс.

3.1.2 Изисквания към RPC

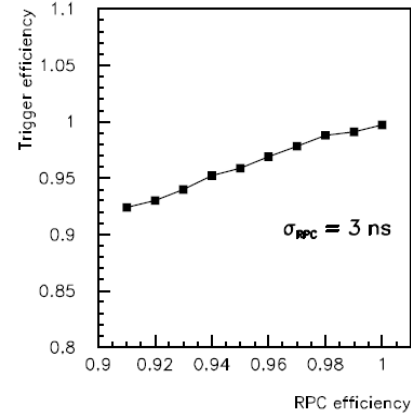
Камерите със съпротивителна плоскост трябва да отговарят на основни изисквания като добри времеви характеристики, малка средна големина на кластерите, висока и постоянна ефективност при дълго време на експлоатация, да могат да работят при голям поток на частиците и висок радиоактивен фон[15].

Добрите времеви характеристики са от решаващо значение за високата ефективност на тригерната система. За идентифицирането на мюоните в рамките на времеви прозорец от 25 ns е нужно не само разделителна способност от няколко наносекунди, но и опашките на сигналите да не се разпростират извън времеви прозорец. Това налага ограничаване на времето за събиране на заряда отделен в газовия процеп (изискване към дрейфовата

скорост) и времето за разпространение на сигналите по сигналните електроди до няколко (4-5) наносекунди. На фигура 3.2 е представена тригерната ефективност пресметната чрез пълно симулиране на работата на тригерната система на CMS базирана на RPC[45] в зависимост от ефективността и времевата разделителна способност на RPC за мюони с напречен импулс $50 < p_T < 70 \text{ GeV}$, и псевдобързина $|\eta| < 0.09$ за мюони с напречен импулс $p_T^{cut} = 5 \text{ GeV}$.



(а) Ефективността на тригера в зависимост от разделителната способност по време на RPC с ефективност 100 %



(б) Ефективността на тригера в зависимост от ефективността на RPC с времева разделителна способност 3 ns

Фигура 3.2: Тригерна ефективност за мюони симулирани с напречен импулс $50 < p_T < 70 \text{ GeV}$ и псевдобързина $|\eta| < 0.09$ за мюони с напречен импулс $p_T^{cut} = 5 \text{ GeV}$

Средната големина на кластерите трябва да бъде малка (≤ 2 сигнални електрода), за да се постигне необходимата разделителна способност по импулси и минимизиране на използването на лъжливи сработвания на RPC в реконструиращите алгоритми.

RPC трябва да могат да работят при поток на йонизиращите частици 1 kHz/cm^2 като при това имат ефективност по-голяма от 95 %. Това е една добра горна граница, тъй като скоростта на сработване поради фоновия поток от неутрони и γ -кванти е от около 20 Hz/cm^2 в цилиндричната част и до 250 Hz/cm^2 при $|\eta| = 2.1$.

За използването на пълните времеви възможности на камерите е необходимо работа при газово усилване около 10^7 . При това усилване и големи потоци от йонизиращи частици падът на напрежението върху съпротивителните електроди става значителен, поради големия ток протичащ през газовия

процеп. По този начин работата на RPC при големи скорости на броене зависи от съпротивлението на високоволтовите електроди. Като се вземе предвид и необходимостта от големи стойности на захранващото напрежение (за да се създаде електричното поле обезпечаващо исканото газово усилване) се оказва, че енергията разсеяна в газа не е пренебрежима като горната ѝ граница е 2 W/m^2 . Ограничаването на вероятността за поява на стримери намалява вероятността за драстични флуктуации на тока.

В таблица 3.1 са представени най-важните изисквания към работните характеристики на RPC за експеримента CMS.

Таблица 3.1: Основни изисквания към RPC за CMS

Ефективност	$\geq 95\%$
Разделителна способност по време	$\sim 1.8\text{ ns}$
Максимален поток	1 kHz/cm^2
Енергийна консумация	$2 - 3\text{ W/m}^2$
Работно плато	$> 300\text{ V}$
Вероятност за поява на стример ^a	$< 10\%$

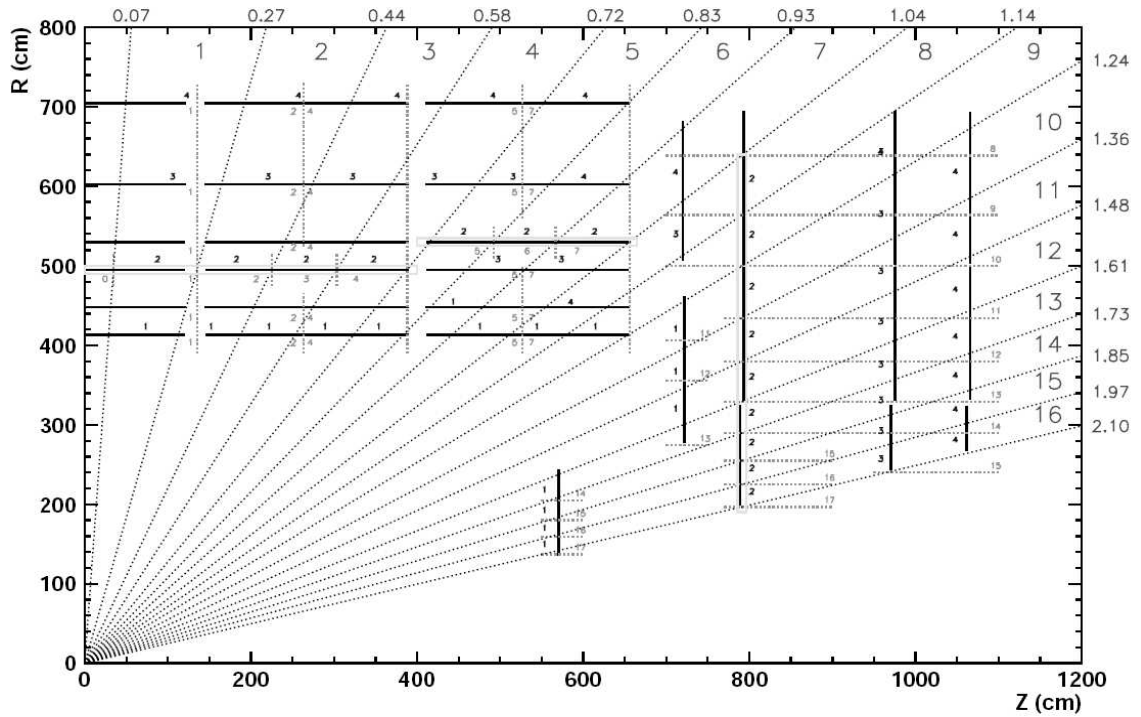
^aБроят на сработванията на RPC, при които се появява стримерен разряд нормиран на общия брой сработвания.

3.2 Геометрия на RPC за цилиндричната част на CMS

Абсолютната координатна система, която се използва в CMS е дефинирана относно пръстена на LHC. Оста X сочи към центъра на пръстена на ускорителя, Y - нагоре, в направление перпендикулярно на равнината, в която лежи пръстена и оста Z е насочена така, че координатната система да бъде дясна. Азимуталният ъгъл ϕ нараства от X към Y.

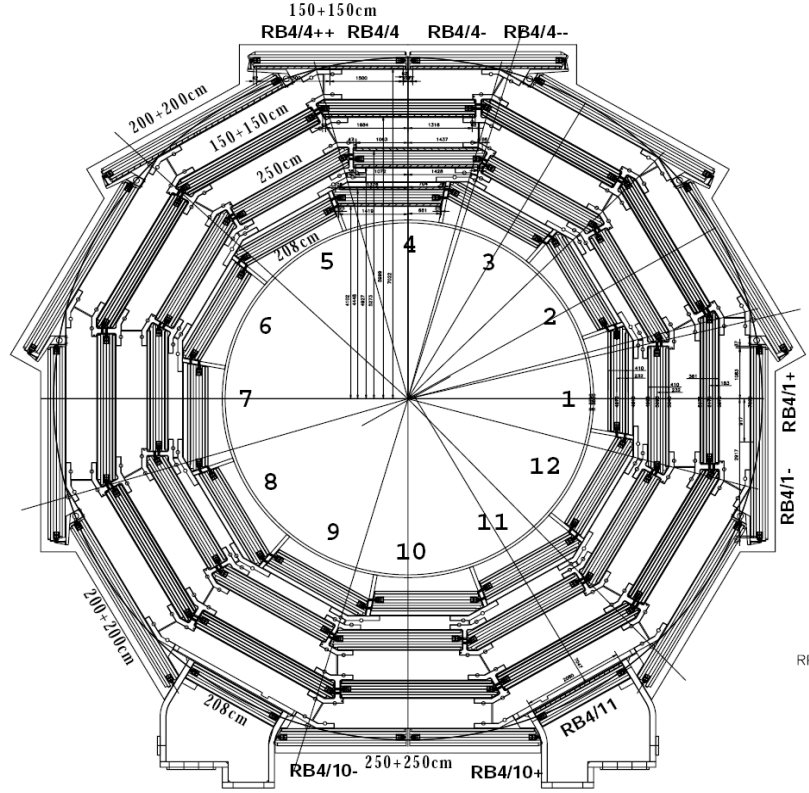
Основният алгоритъм на RPC тригерната система използва 6 равнини от камери наведнъж. В цилиндричната част се използват две различни алгоритмични мюони с малък и голям напречен импулс p_T . Алгоритъмът за големи p_T използва и шестте равнини от RPC, докато за малки p_T се използват по две равнини от първа и втора мюонни станции. Основният алгоритъм изисква попадения в четирите от шестте използвани равнини. Алгоритъмът за реконструиране на мюони с малки напречни импулси (т.е. мюони, които не

преминават през всички станции) се изисква попадения в три от четирите слоя в първа и втора станция. Логическото сегментиране е проективно по η и се състои в разделянето на 33 сектора номерирани от -16 до 16 както е показано на фиг. 3.3. По посока на оста на снопа системата от RPC се състои



Фигура 3.3: Rz -разрез на системата от RPC. Физическо и логическо сегментиране на камерите.

от пет пръстена означени с -2, -1, 0, 1, 2. На фиг. 3.3 е показан напречен разрез на мюонната система в цилиндричната част. Всеки пръстен е разделен на дванадесет сектора по ϕ . Във всеки сектор има по шест RPC равнини перпендикулярни на R (разстоянието от оста Z). Двата слоя RPC в RB1 и RB2 ще бъдат означени с "in" и "out" съответно за вътрешните (по-близки до оста на снопа) и външните. Секторите на RB3 и RB4 са разделени на две по азимуталния ъгъл като условно се нарича "+" и "-". Най-външните станции в секторите четири и десет (RB4/4 и RB4/10) се състоят от четири камери, означени с "++", "+", "-", "--", а в сектори десет и единадесет (RB4/9 и RB4/11) са разположени само по една камера.



Фигура 3.4: Напречен разрез на мюонната системата в цилиндричната част.

Дизайнът на РАСТ[42] е основан на проективната геометрия на сигналните електроди на RPC. Ъгловата ширина на сигналните[44] електроди е приета да бъде $\delta = 5/16^\circ$, което съответства на линейна ширина от 20 до 40 mm в зависимост от мюонната станция.

В таблица 3.2 са дадени подробно размерите на RPC за цилиндричната част. Линейните размери са дадени в mm , а ъговете в градуси. R_{in} е радиалното разстояние до средата на сектора. Y_{rmin} и Y_{rmax} са разстоянията от средата на сектора до краищата на кутията на камерата. Локалната координата Y е такава, че съвпада с глобалната Y след ротация на $-n \times 30^\circ$, където n е номера на съответния сектор. ΔY_r е дължината на кутията на RPC. Y_{smin} , Y_{smax} и ΔY_s са координатите на ъглите и дължината на чувствителната част на RPC. Нечувствителната област по краищата на камерите се приема да бъде широка 20 mm . ϕ_{min} , ϕ_{max} и $\Delta\phi$ са ъгловите координати на ръбовете и ъгловата ширина на чувствителната област на камерите. $\Delta\phi/\delta$ е отношението на чувствителната област и желаната ширина на сигналните

електроди, което в идеалния случай би било равно на броя на сигналните електроди в една камера.

Таблица 3.2: Размери на камерите със съпротивителна плоскост за цилиндричната част.

chamber	R in	Yr min	Yr max	ΔY_r	Ys min	Ys max	ΔY_s	ϕ min	ϕ max	$\Delta\phi$	δ	$\Delta\phi/\delta$
RB1 in	4098	-661	1419	2080	-641	1399	2040	-8.89	18.85	27.74	0.3125	88.77
RB1 out	4448	-704	1376	2080	-684	1356	2040	-8.74	16.95	25.70	0.3125	82.23
RB1 out	4448	-704	1376	2080	-684	1356	2040	-8.74	16.95	25.70	0.6250	41.11
RB2 in	4923	-1428	1072	2500	-1408	1052	2460	-15.96	12.06	28.02	0.3125	89.67
RB2 out	5273	-1437	1063	2500	-1417	1043	2460	-15.04	11.19	26.23	0.3125	83.94
RB3-	5995	-1316	184	1500	-1296	164	1460	-12.20	1.57	13.77	0.3125	44.05
RB3+	5995	184	1684	1500	204	1664	1460	1.95	15.51	13.56	0.3125	43.40
RB4/1-	7018	-2917	-1417	1500	-2897	-1437	1460	-22.43	-11.57	10.86	0.3125	34.75
RB4/1+	7018	-1417	1083	2500	-1397	1063	2460	-11.26	8.61	19.87	0.3125	63.59
RB4/1-	7018	-2917	-917	2000	-2897	-937	1960	-22.43	-7.60	14.83	0.3125	47.44
RB4/1+	7018	-917	1083	2000	-897	1063	1960	-7.28	8.61	15.90	0.3125	50.87
RB4/1-	7018	-2917	-997	1920	-2897	-1017	1880	-22.43	-8.25	14.19	0.3125	45.39
RB4/1+	7018	-997	1083	2080	-977	1063	2040	-7.93	8.61	16.54	0.3125	52.92
RB4/4--	7018	-3097	-1597	1500	-3077	-1617	1460	-23.67	-12.97	10.70	0.3125	34.24
RB4/4-	7018	-1597	-97	1500	-1577	-117	1460	-12.66	-0.96	11.71	0.3125	37.47
RB4/4+	7018	97	1597	1500	117	1577	1460	0.96	12.66	11.71	0.3125	37.47
RB4/4++	7018	1597	3097	1500	1617	3077	1460	12.97	23.67	10.70	0.3125	34.24
RB4/10-	7018	-2597	-97	2500	-2577	-117	2460	-20.16	-0.96	19.21	0.3125	61.47
RB4/10+	7018	97	2597	2500	117	2577	2460	0.96	20.16	19.21	0.3125	61.47
RB4/11	7018	-1085	915	2000	-1065	895	1960	-8.63	7.27	15.90	0.3125	50.87

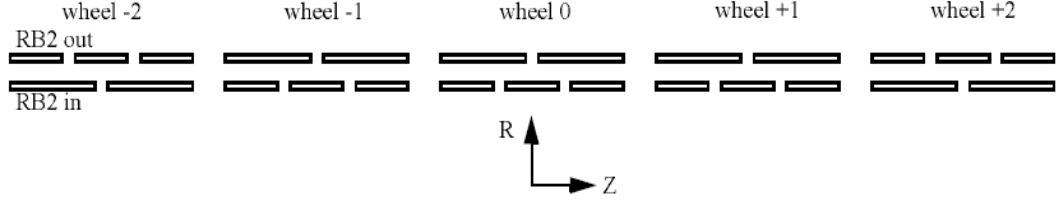
Ако сигналните електроди са с една и съща ъглова ширина, то това означава, че те имат различна линейна ширина като за k -тия електрод тя е

$$d_k = R\{\tan(k\delta - \phi_{min}) - \tan[(k+1)\delta - \phi_{min}]\}. \quad (3.1)$$

Изработването на една камера с различни по ширина сигнални електроди е конструктивно неудобно и ресурсоемко. Ето защо ширината на чувствителната област ΔY_s на камерата се разделя на M ивици с еднаква ширина d . В този случай ъгловата ширина на електродите в една камера е различна от $5/16^\circ$. Този тип геометрия се нарича квази-проективна. Ширината на електродите е подбрана така, че максималното отклонение от проективната геометрия да има минимално влияние върху работата на RPC тригера[44].

Всеки от петте пръстена на цилиндричната част е с дебелина 2536 mm . Правилното сегментиране по η за нуждите на тригерната система изисква

камерите RB2in в пръстените -1,0,1 и RB2out в -2 и 2 да са разделени на три части, а всички останали на две части, както е показано на фиг. 3.5



Фигура 3.5: Сегментиране на RPC във втора мюонна станция на цилиндричната част по η .

3.3 Избор на материали и основни характеристики

Първоначалният дизайн на камерите е описан в [15].

3.3.1 Съпротивителни електроди

Съпротивителните електроди се изработват от бакелитени плоскости покрити с тънък слой меламин. Максималният поток частици, които RPC ще може да регистрира силно зависи от специфичното съпротивление на материала. Има още два основни ефекта, на които трябва да се обърне внимание:

- времевата константа $\tau = \epsilon_0(\epsilon_r + 2)\rho$ на газов процес, работещ в лавинен режим е толкова по-малка, колкото по-малко е съпротивлението на електродите;
- при големи скорости на броење, пълният ток през електродите е толкова голям, че падът на напрежение върху съпротивителните електроди V_d става значителен. Така електричното поле в газовия обем намалява ефективно, а това води до намаляване на газовото усилване.

Двата ефекта могат да бъдат минимизирани чрез избор на подходящо ниско съпротивление. От прости електростатични съображения [46] за пада на напрежението върху електродите се получава:

$$V_d = 2 \langle Q_e \rangle r s \rho \quad (3.2)$$

където $\langle Q_e \rangle$ е средният сумарен заряд на свободните електрони получени при лавинното умножение след преминаването на йонизираща частица, r - потокът на йонизиращите частици, s - дебелината на бакелитения електрод и ρ е неговото специфично съпротивление. Ако например $\langle Q_e \rangle = 25 pC$, $r = 10^3 s^{-1} cm^{-2}$, $s = 2 mm$ и $\rho = 1 - 2 \Omega.cm$, то падът на напрежение V_d е от порядъка на няколко десетки волта. По-големи стойности на V_d биха довели и до намаляване на дрейфовата скорост на електроните, а от там и до влошаване на времевите характеристики. В [47] са изследвани характеристиките на RPC със съпротивление на електродите 10^{10} и $10^{11} \Omega.cm$ при различни потоци на йонизиращи частици. Камерите с бакелитени плоскости със съпротивление $10^{10} \Omega.cm$ показват значително по-добри характеристики.

Грапавината на бакелитената повърхност е от съществено значение за появата на случайни газови разряди. Освен използването на материал с възможно най-малка грапавост на повърхността, вътрешната повърхност на газовите процепи се третира като се нанася тънък слой от ленено масло като ефекта от това е само подобряване на характеристиките на RPC [48].

3.3.2 Газова смес

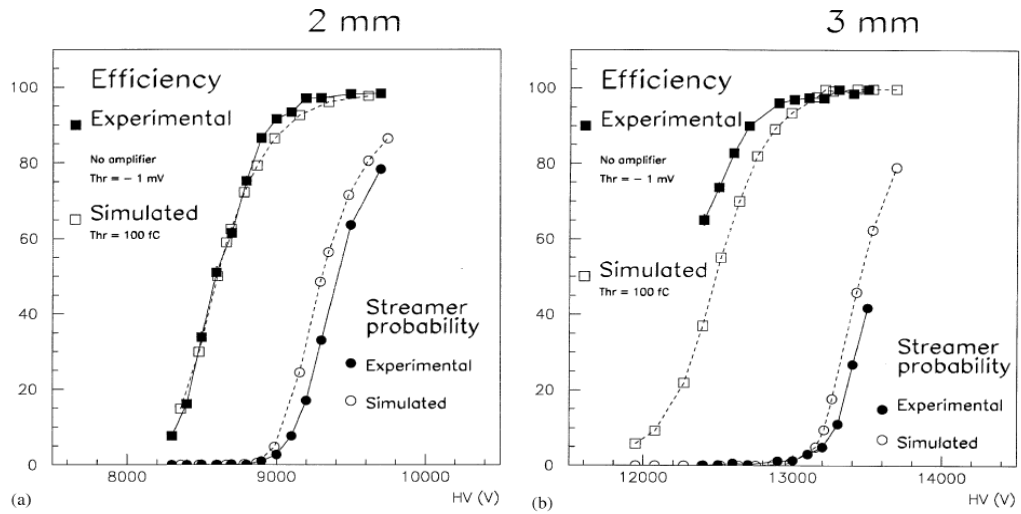
Средният брой първични електрони на единица дължина λ от пробега на йонизиращата частица е характеристика на газовите смеси, която е определяща за ефективността на RPC. От друга страна важна роля играят дрейфовата скорост и газовото умножение при определено захранващо напрежение.

Характеристиките на газови смеси с основна съставка $C_2H_2F_4$ са изследвани в [49, 50] като в [52] λ и коефициентът на лавинно умножение за тях са сравнени с характеристиките на аргон-базирани смеси, а в [51] са изследвани характеристиките на аргон-базирани смеси за RPC в лавинен режим при ниско и нормално налягане. Изследванията показват, че фреон-базирани смеси предлагат по-голям брой първични електрони на единица дължина, по-голям коефициент на лавинно умножение и по-голяма дрейфова скорост. Така в [52, 50] се предлага газова смес съдържаща 90 % – $C_2H_2F_4$ и 10 % – C_4H_{10} , а в [56] са изследвани характеристиките на RPC, работещи с горепосочената смес в лавинен режим. Изследвани са и смеси с 97 % – $C_2H_2F_4$ и 3 % – C_4H_{10} , например в [47].

За подтискане на вероятността за поява на стримери и удължаване на работното плато, в [40, 53] се предлага добавянето на SF_6 като това не влошава параметрите на камерите.

3.3.3 Ширина на газовия процеп

След симулиране и изследване на работата на газови процепи с различна ширина [47, 52, 55, 54, 56] при използване на фреон-базирани газови смеси най-подходящата ширина на газовата междина се оказва 2 mm . На фиг. 3.6[54] като пример са представени ефективността и вероятността за поява на стример получени чрез симулация и измерени експериментално за газови процепи с ширина 2 mm и 3 mm

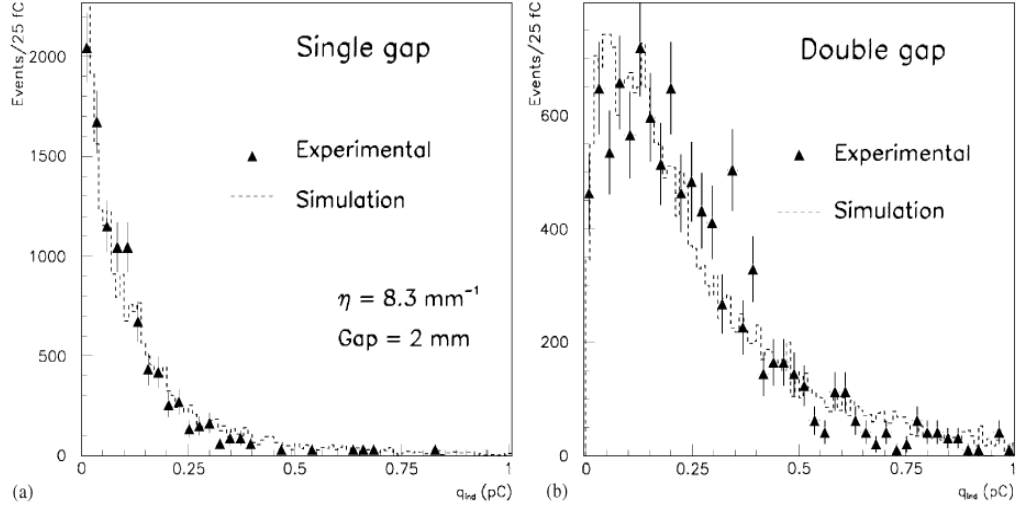


Фигура 3.6: Ефективност и вероятност за поява на стример получени чрез симулация и измерени експериментално за газови процепи с ширина 2 mm и 3 mm

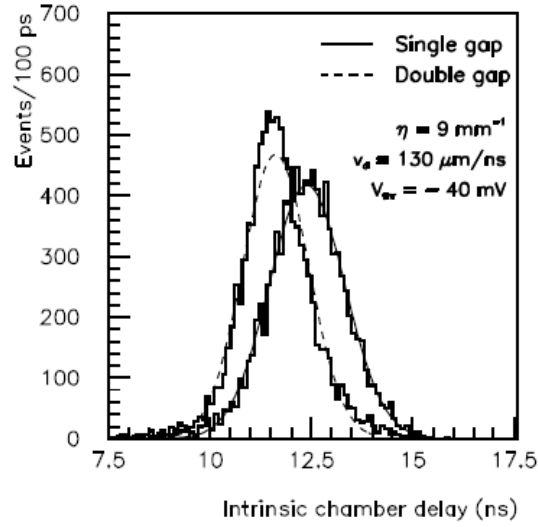
3.4 Двупроцепен дизайн

В раздел 2.1 бяха представени предимствата на двупроцепния дизайн. Избран е вариантът със сигнални електроди поставени между двата газови процепа[15] (виж фиг. 2.4а). Както се вижда от фиг. 3.7[54] индуцираният върху сигналния електрод заряд в случай на двупроцепен дизайн е значително по-голям. Закъснението на сигналите (фиг. 3.8[15]) също е по-малко при двупроцепния дизайн.

В таблица 3.3 са обобщени основните технически параметри на камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS.



Фигура 3.7: Спектър на измерен и симулиран индуциран върху сигнален електрод заряд за единичен и двоен газов процеп с ширина на газовата меж-дина 2 mm



Фигура 3.8: Разпределение на времената на закъснение на сигналите от единичен и двоен газов процеп получени чрез симулирането на газови процепи с ширина 2 mm

3.5 Детекторна електроника

Формата на токовия импулс, получен на сигналния електрод на RPC в следствие преминаване на йонизираща частица се описва приблизително от фун-

Таблица 3.3: Основни конструктивни параметри на RPC

Дебелина на бакелитените плоскости	2 mm
Съпротивление на бакелита	$1 - 6.10^{10} \Omega.cm$
Газова смес	96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% <i>iso</i> - C_4H_{10} и 0.3% SF_6
Работно напрежение	9.4 – 9.8 kV
Брой на газовите междини	2

кцията [15]

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad 0 \leq t \leq 15 ns \quad (3.3)$$

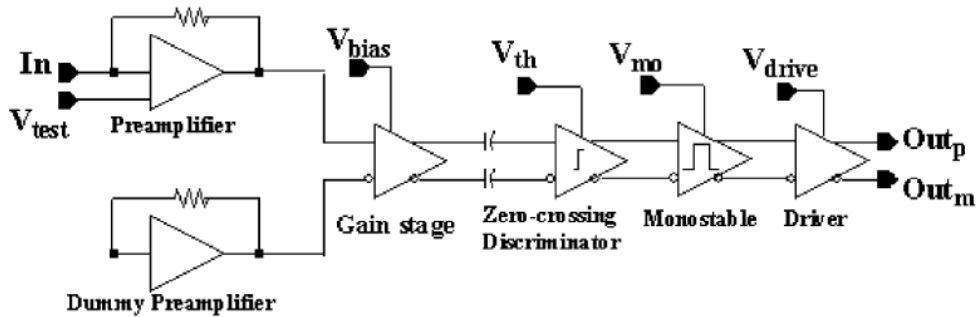
където τ е газовата времеконстанта, която се определя по формулата $\tau = 1/(\eta v_D)$ (η - ефективен коефициент на Таунсенд, v_D - дрейфова скорост на електроните). За фреон-базирани газови смеси и работно напрежение 9.4 – 9.8 kV за τ се получава $\sim 1 ns$. Очакваният диапазон от заряди е от 20 fC до 20 pC.

Сигналните електроди на RPC в цилиндричната част на CMS са дълги 1.3 m, ширината им варира между 2 и 4 cm. От това следва, че тяхното характеристично съпротивление е съответно в интервала от 40 до 15 Ω , а капацитетът им - в интервала от ~ 160 до $\sim 420 pF$. Индуцираният сигнал има време на нарастване ($\sim 1 ns$) по-малко от времето за разпространение му по сигналния електрод. Следователно, електродите се държат като двупроводна линия (линия с разпределени параметри) и трябва да се терминират правилно, за да бъдат избегнати отраженията от краищата им. От единия край сигналните електроди се терминират от входния импеданс на предусилвателя, а от другия - чрез резистор.

Сигналите от всеки електрод се обработват посредством електронна верига (фиг. 3.9) състояща се от предусилвател, усилвател, дискриминатор с пресичане на нулевото равнище, моновибратор и изходно стъпало[57].

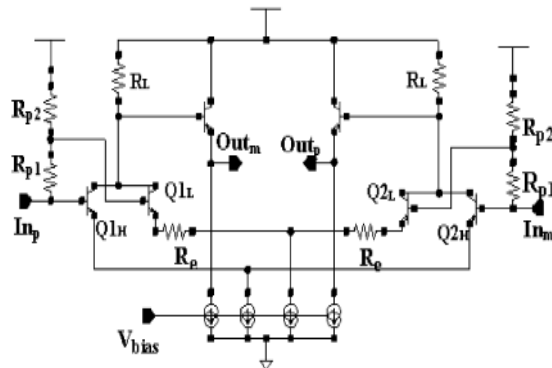
Предусилвателят е свързан директно към сигналния електрод и представлява многостъпален усилвател на ток свързан в схема общ емитер. Входното му съпротивление е 15 Ω при честоти в интервала от 100 до 200 MHz, за да терминира правилно сигналните електроди с ширина 4 cm. За правилно терминиране при свързване към по-тесните електроди се добавят външни резистори с необходимото съпротивление.

Изходът на предусилвателя е свързан директно към входа на усилвателя. С цел да бъдат балансирани флуктуациите на тока там е свързан и изхода



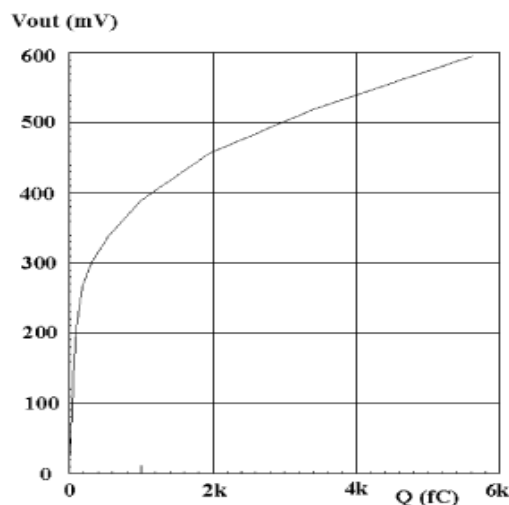
Фигура 3.9: Блок-схема на електронната верига обработваща сигналите от един сигнален електрод. Означените звена са: предусилвател (Preamplifier), фиктивен предусилвател (Dummy Preamplifier), усилвател (Gain Stage), дискриминатор с пресичане на нулевото равнище (Zero-Crossing Discriminator), моновибратор (Monostable), изходно стъпало (Driver).

на фиктивен предусилвател. **Усилвателят** е проектиран така, че да няма насищане в целия работен диапазон като по този начин се осигурява правилната работа на следващия в схемата дискриминатор. Усилването за заряди по-малки от 100 fC трябва да е линейно. За по-големи амплитуди нелинейността не е проблем. Тази функционалност се постига чрез използването на



Фигура 3.10: Схема на усилвателя.

два диференциални усилвателя с различни коефициенти на усилване и обща изходна верига. Схемата на усилвателя е представена на фиг. 3.10. Външният усилвател ($Q1_H, Q2_H, R_L$) е с постоянноотокково усилване по напрежение около 7, докато вътрешният ($Q1_L, Q2_L, R_L$) има усилване по напрежение 0.25 и усилва сигналите по-големи от 200 fC . Входно-изходната характеристика е показана на фиг. 3.11. Общата чувствителност на стъпалото е 2 mV/fC за



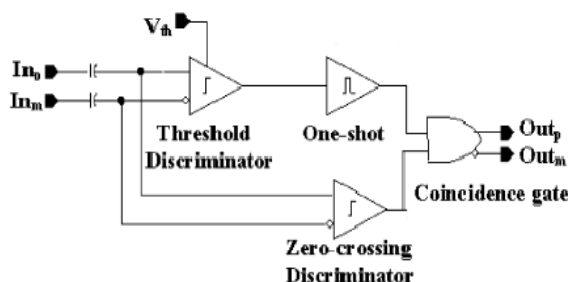
Фигура 3.11: Входно-изходна характеристика на усилвателя.

заряди по-малки от 100 fC .

RPC се използват за прецизно определяне на времето на пресичане на групите частици в точката на взаимодействие и точно привързване на събитията с него. Големият амплитуден диапазон на сигналите от RPC е с разхвърляне по време на сигналите получени при използване на дискриминиране по нарастващ преден фронт ($\sim 10\text{ ns}$). Амплитудно-независимо дискриминиране може да бъде постигнато чрез използването на дискриминиране по пресичане на нулевото равнище. RC-верига се използва за диференциране на входния сигнал. Получава се биполярен импулс пресичащ нулевото равнище в момента, в който входният сигнал достига пиковата си стойност[58]. Ако всички сигнали имат едно и също време за достигане на максимална стойност, то дискриминирането по пресичане на нулевото равнище не зависи от амплитудата на сигналите. В конкретния случай **дискриминаторът** е реализиран по следния начин (виж фиг. 3.12). Диференциалните изходи на усилвателя се подават на силно диференцираща верига с времеконстанта 4 ns като това гарантира бързо възстановяване на основното ниво ($< 50\text{ ns}$ при 20 fC входен заряд). След това сигналът се подава на входа на обикновен дискриминатор¹ с праг в интервала $5 \div 500\text{ fC}$, а после на моновибратор², изработващ импулс с ширина около 20 ns . Дискриминаторът с пресичане на

¹означен с “Threshold discriminator” на фиг 3.12

²означен с “One-Shot” на фиг 3.12



Фигура 3.12: Схема на дискриминиране с пресичане на нулевото равнище.

нулевото равнище³ няма зададен праг и получава сигнала от диференциращата верига, а изходния му сигнал, едновременно с изходния сигнал от моновибратора се подават на схема на съвпадение⁴. Схемата на съвпадение изработва изходния сигнал на дискриминатора.

Сигналите от RPC, работещи в лавинен режим, често имат заден фронт - от 0 до десетки наносекунди. **Моновибраторът** в схемата на фиг. 3.9 изработва импулс с продължителност 100 ns като така се предотвратява вторични сработвания вследствие на шумови импулси подадени на входа на дискриминатора. Мъртвото време внесено от дискриминатора е $\sim 10\text{ ns}$. Изборът на тази продължителност е компромис между вероятността за появата на вторично сработване и мъртвото време на детектора като цяло. Така при очаквана скорост на броене по-малка от 400 kHz на канал и избраната ширина на изходния импулс 100 ns се постига мъртво време от 4%.

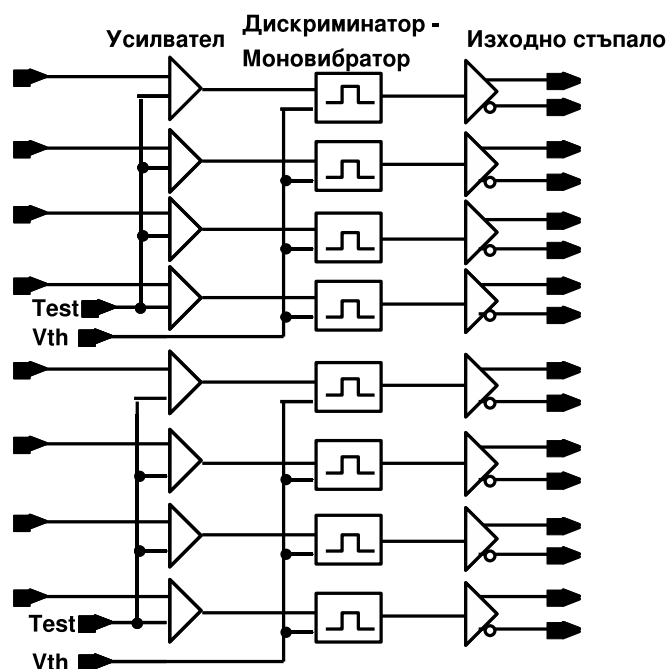
Изходното стъпало може да захранва усукана двойка със сигнал с пад на напрежение 250 mV върху съпротивление с големина $100\ \Omega$ съобразно стандарта LVDS.

Осем такива вериги са интегрирани в един чип (фиг. 3.13). Сигналите от 16 електрода се обработват от една електронна платка, на която са монтирани:

- 2 чипа всеки с по 8 канала усилвател, дискриминатор и конвертор;
- синхронизиращ елемент;
- цифрово аналогов преобразовател (ЦАП);

³означен с “Zero-Crossing Discriminator” на фиг 3.12

⁴означена с “Coincidence Gate” на фиг 3.12



Фигура 3.13: Принципна схема на чиповете, обработващи сигналите от електродите на RPC.

- контролер;

Синхронизиращият елемент (СЕ) съхранява изходните данни на контролера, ако те попаднат в предварително зададен времеви прозорец в периода на пресичането на групите протони и ги синхронизира с избран период на пресичане. В СЕ се запълват хистограми за честотата на сработване на всеки канал. Контролерът има следните функции:

- съхранява и задава праговете на дискриминаторите на всички чипове;
- задава тестови шаблони и последователности като прецизно ги синхронизира и подава към входовете на чиповете;
- задава времевия прозорец на СЕ;
- изчита тестовите хистограми от СЕ;

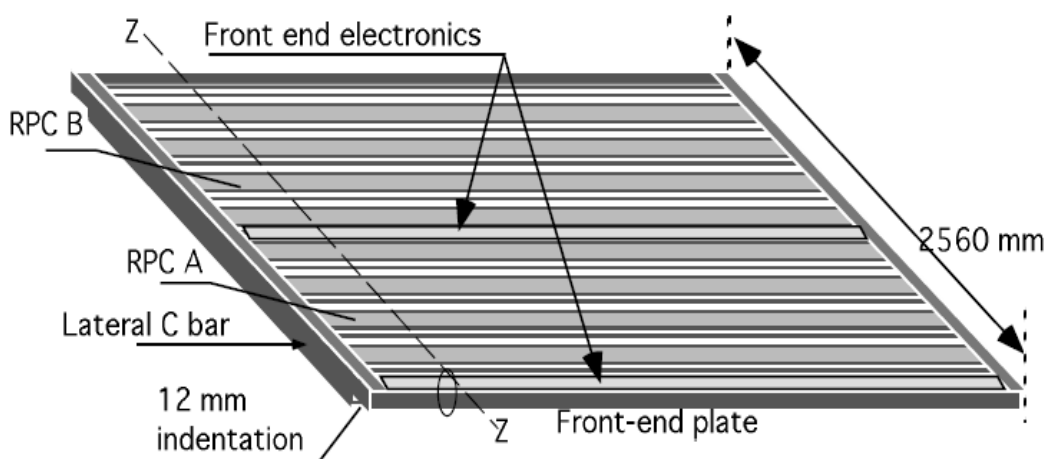
Праговете на дискриминаторите задават еквивалентен заряд в интервала от 10 fC до 300 fC с точност 1.22 fC като за това се използва десет битов ЦАП.

3.6 Механична конструкция и производство

Общият брой на RPC в цялата цилиндрична част е 480. В зависимост от тяхното положение в мюонната система те се състоят от два или три двойни газови процепи с брой и ширина на сигналните електроди указани в раздел 3.2. За конструирането на всички RPC са необходими общо 2040 единични процепа.

Изработването на всяка от камерите със съпротивителна плоскост има следната последователност[65]:

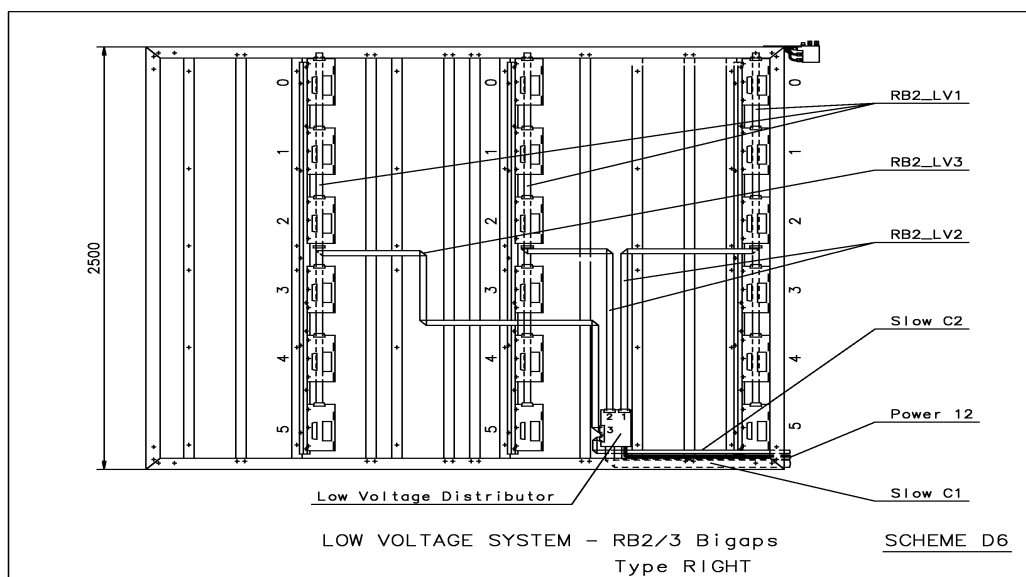
- производство на бакелитените електроди;
- изработване на единичните газови процепа;
- формиране на двоен газов процеп от два единични газови процепа поставени един върху друг;
- конструиране на RPC от два или три двойни газови процепа като газовите процепа се поместват в алуминиев пакет;
- изследване на работните характеристики на камерите с космични мюони.



Фигура 3.14: Механична конструкция на камера със съпротивителна плоскост.

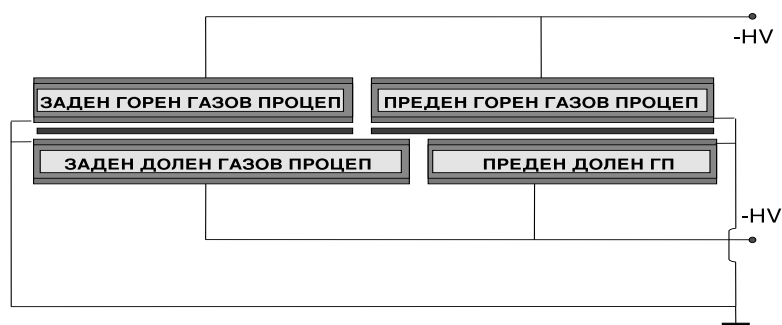
Алуминиевият пакет позволява монтирането на RPC в детектора CMS и поддържа газовите процепа така, че да не се огъват под действие на собственото си тегло. В пакета са монтирани платките на детекторната електроника, конекторите за високоволтовото захранване и конекторите за свързване

с газовата система и водното охлаждане. На фиг. 3.14 е показан общ изглед на алуминиевия пакет, състоящ се от П-профили, Г-профили и поддържащи правоъгълни профили. П-профилите обгръщат четирите страни на камерата и на тях са монтирани Г-профилите и поддържащите правоъгълни профили. На Г-профилите са закрепени платките на детекторната електроника. Те осигуряват и охлаждането на газовите процепи. Поддържащите правоъгълни профили са огънати с такъв радиус на кривината, че газовите процепи са равнинни независимо от положението им в детектора CMS. Платките на детекторната електроника в една камера са свързани към разпределителна платка на нисковоково захранване(означен с “Low Voltage Distributor” на фиг. 3.15). Чрез този елемент електрониката се захранва с необходимото напрежение, като същевременно осигурява и комуникация с платките по I^2C шината.



Фигура 3.15: Пример за разположение на платките на детекторната електроника и местоположение на свързващите ги шини в RPC от типа RB2 с три двойни газови процепи.

На фиг. 3.16 е показан начинът, по който се захранват газовите прицепи. Двойният газов процеп намиращ се до предният панел на камерата, от дясно на фиг. 3.16, ще бъде наричан преден, а газовия процеп в другия край - заден. При камери с три двойни газови процепи, този по средата ще бъде наричан среден. Единичните газови процепи, намиращи се от страната, където са

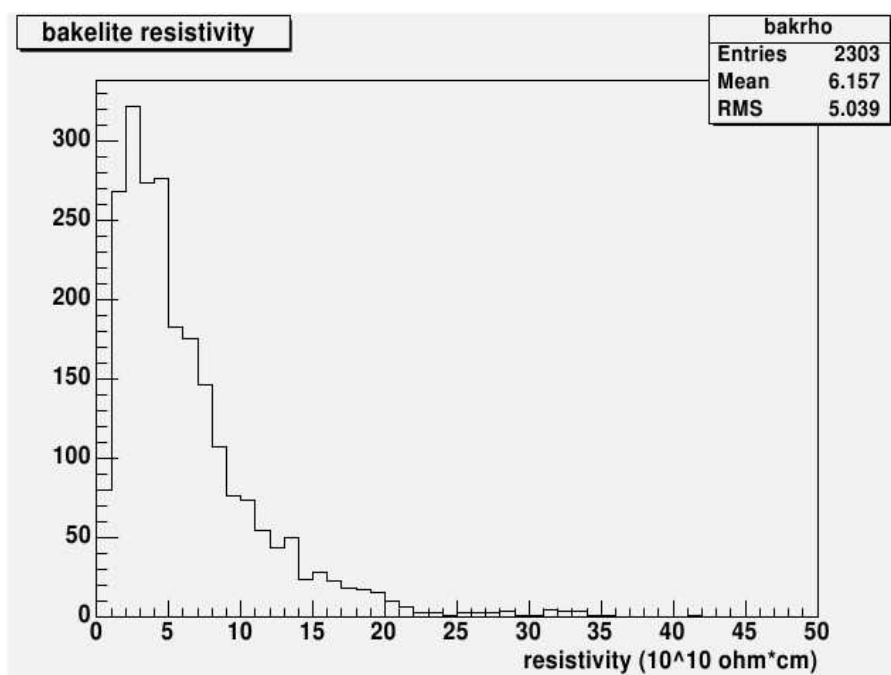


Фигура 3.16: Захранване на газовите процепи с високо напрежение.

поставени платките на детекторната електроника ще бъдат наричани горни, а останалите - долни.

3.6.1 Производство на бакелита

Бакелитените електроди се произвеждат от предприятието “PanPla” (Павия, Италия). Фундаменталният параметър, който се държи под контрол по време на производството е специфичното съпротивление на бакелита, тъй като прекалено високите стойности намаляват ефективността на детекторите при голям поток на йонизиращи частици, а малкото съпротивление води до по-малка стабилност на детекторите, увеличаване на тока през тях и шума. Специфичното съпротивление на всяка произведена бакелитена плоскост се проверява в девет различни точки. За целта се използват електроди с диаметър 5 cm , които се пристискат от двете страни на плоскостите с бутало, чиито натиск е 70 kg . На електродите се подава напрежение 500 V и съпротивлението се пресмята по измерения ток. На фиг. 3.17 е показано разпределението на специфичното съпротивление на произведените бакелитени плоскости. Само тези със специфично съпротивление между $1 \times 10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ и $6 \times 10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ са използвани за изработване на съпротивителни електроди за газовите процепи. Стандартното отклонение от средната стойност на деветте измервания



Фигура 3.17: Специфично съпротивление на всички произведени бакелитени плоскости. Бакелитените листове се приемат ако съпротивлението им е между $1 \times 10^{10} \Omega \cdot cm$ и $6 \times 10^{10} \Omega \cdot cm$.

за всеки бакелитен лист е около 20 %. Стойностите на специфичното съпротивление са коригирани за температура $20^\circ C$ съгласно формулата

$$\frac{\rho}{\rho_{20}} = e^{(20-T)/7.8} \quad (3.4)$$

където T е в $^\circ C$ и 7.8 е емпиричен параметър известен от предишни измервания.

3.6.2 Производство на единични и двойни газови проце-пи

Един газов процеп се формира от два бакелитени електрода с дебелина $2 mm$, поддържани на разстояние $2 mm$ чрез поликарбонатни цилиндрични елементи с диаметър $8 mm$, поставени по върховете на квадратна мрежа с елементарна клетка със страна $100 mm$. Един газов процеп е направен от два единични газови процепа, долепени един до друг като между тях са поставени сигнални електроди изработени от мед. Така получената конструкция е ек-

ранирана с медно фолио.

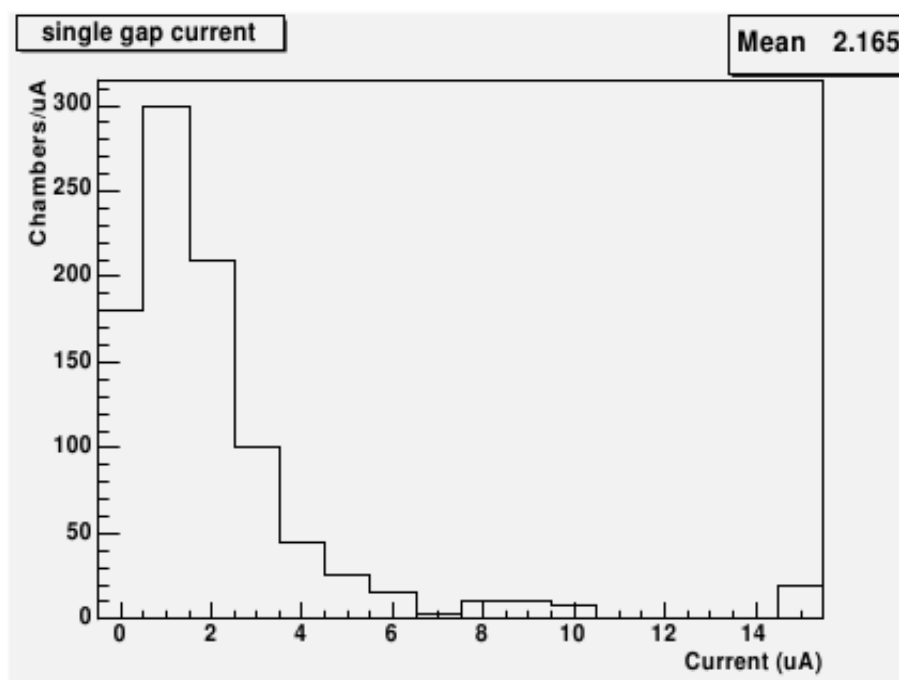
Единичните и двойните газови процепи са произведени от “General Tecnica” (Фросиноне, Италия). Бакелитените плоскости са разделени на две групи в зависимост от специфичното си съпротивление: група А със съпротивление между 1 и $3 \times 10^{10} \Omega.cm$ и група В - между 3 и $6 \times 10^{10} \Omega.cm$. Анода и катода на един газов процеп се избират така, че да са направени от бакелит от една и съща група.

Всеки газов процеп се проверява за херметичност, стабилност на залепените поддържащи елементи и се извършват изпитания при високо напрежение.

Херметичността се проверява като налягането в газовия процеп се повиши до $5\,mbar$ и се следи за неговата стабилност за фиксиран интервал от време. Газовите процепи, при които се наблюдава изтичане на газ се отхвърлят. Поддържащите елементи се изпитват при налягане $20\,mbar$. Процепите с дори един отлепен поддържащ елемент се отхвърлят. Високоволтовият тест е последен и се състои в проверяване на тока през газовите процепи работещи с газова смес от $C_2H_2F_2$ (96%) и *iso* – C_4H_{10} (4%) при увеличаване на захранващото напрежение до $9.5\,kV$ със скорост $1\,kV/30\,min$. В началото на производствения процес процепите с ток по-голям от $5\,\mu$ бяха отхвърляни. Забелязано бе обаче, че при газовите процепи с ток по-голям от $3.5\,\mu A$ се наблюдава нестабилност в поведението на тока по време на тестовете на вече сглобените камери със съпротивителна плоскост. Поради тази причина критерия за отхвърляне бе направен по-строг като беше поставена горна граница от $3.5\,\mu A$. В [65] са представени резултатите за 1655 произведени единични газови процепа, от които 283 са отхвърлени като 66 % от тях са с изтичане на газ или недобре залепени поддържащи елементи и 34 % с висок ток. На фиг. 3.18 е показано разпределението на тока на процепите при $9.5\,kV$.

След това се изследва стабилността на тока през газовите процепи за период от 12 часа като стойностите му се записват на всяка минута.

Газовият процеп се отхвърля и когато при дълго наблюдение на тока се появят многократни резки увеличавания на неговата стойност за много кратко време, тъй като това е сигурен знак за искрене. Причините за това могат да бъдат нарушаване на изолацията на високоволтовия проводник, лошо свързване на проводника към високоволтовия електрод, дефекти на вътрешната повърхност на бакелитения електрод, получени в производствения процес на газовия процеп и други не добре изолирани области. Газовите



Фигура 3.18: Разпределение на тока през газовите процепи при 9.5 kV .

процепи се отхвърлят и ако токът се повиши с повече от 50 % от стойността в началото на периода на изследване на стабилността му.

В края на 12 часовия период на наблюдение на тока се прави волт-амперна характеристика в областта от напрежения от 1 до 6 kV . По този начин се изследва омовото съпротивление на газовия процеп. Само тези газове с ток по-малък от $0.7\text{ }\mu\text{A}$ не се отхвърлят.

Всички описани по-горе тестове се повтарят и при производството на двойни газови процепи.

3.6.3 Производство на RPC

По време на сглобяването на RPC, двойните газови процепи се поставят в алуминиев пакет и се монтират платките на детекторната електроника, кабелите необходими за захранване с високо и ниско напрежение, кабели служещи за комуникация между платките, и тръбите за водно охлаждане. Камерите се произвеждат в “General Tecnica” - RB1, RB2 и RB4, в лабораториите в Бари, Италия и в София, България - RB3. След като бъдат произведени работните характеристики на камерите се изследват в лабораториите в Бари, София и Павия, Италия.

Навсякъде, където се произвеждат камерите със съпротивителна плоскост беше установена поредица от тестове, на които те бяха подлагани след сглобяването им. Херметичността на газовата и охлаждащата системи се проверяват чрез повишаване на налягането съответно до 5 mbar и 20 bar . След преминаване на газова смес с количество еквивалентно на 10 обема, съставена от $C_2H_2F_2$ (96 %) и *iso* – C_4H_{10} (4 %) се прави волта-амперна характеристика и се измерват шумовете на всеки сигнален електрод, за да се провери правилната работа на детекторната електроника.

3.7 Заключение

Камерите със съпротивителна плоскост играят основна роля в тригерната система от първо ниво, при привързването на събитията към съответното пресичане на групите частици в точката на взаимодействие. Съпротивителните им електроди са изработени от бакелит със специфично съпротивление $1 \div 6 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ и дебелина 2 mm . Използва се двупроцепен дизайн с ширина на газовата междина 2 mm . Работната газова смес е базирана на $C_2H_2F_4$ с малки примеси на *iso* – C_4H_{10} и SF_6 . Детекторната електроника позволява амплитудно-независимо дискриминиране като за целта се използва дискриминатор с пресичане на нулевото равнище. Описана е механичната конструкция на камерите и накратко са представени реализираните по-важни процедури за контрол на качеството по време на производствения процес.

Глава 4

Отделяне на HF в RPC за CMS

4.1 Въведение

Настоящата глава е посветена на изследването на състава на отработената газова смес на изхода на RPC[33]. Разгледани са случаите на последователно свързване на газови процепи и работа на RPC в затворена газова система. Първият случай дава възможност за оценяване на динамиката на отвеждане на получения, вследствие на работата на RPC, флуороводород (HF), а във втория случай може да бъде определено качеството и правилното функциониране на използваните в затворената газова система, пречистващи модули.

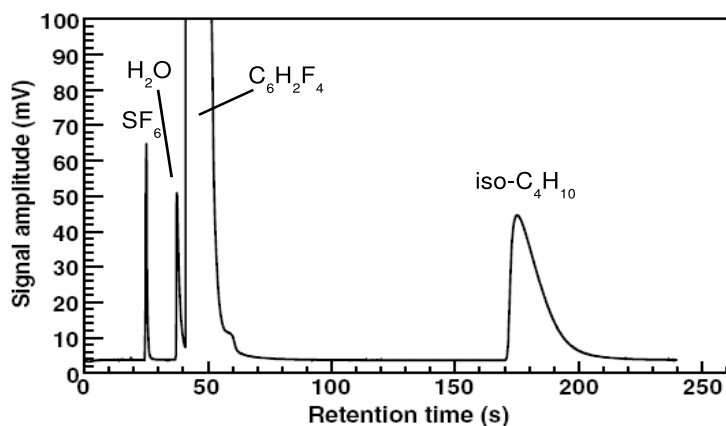
4.2 Експериментална апаратура и материали

Бяха изследвани няколко единични бакелитени газови процепи с размери $50 \times 50 \text{ cm}^2$ (ще бъдат наричани накратко процепи) и две камери от тип RB1. Единичните газови процепи бяха разделени на две групи свързани по различен начин към отворена газова система¹:

- 7 газови процепи бяха свързани последователно, т. е. свързани по такъв начин, че газовата смес минава последователно през всички процепи;
- 4 процепи бяха свързани успоредно към газовата система, т.е. всеки процеп работи със “свежа” газова смес.

¹При отворена газова система преминалата през детекторите газова смес се изпуска в атмосферата.

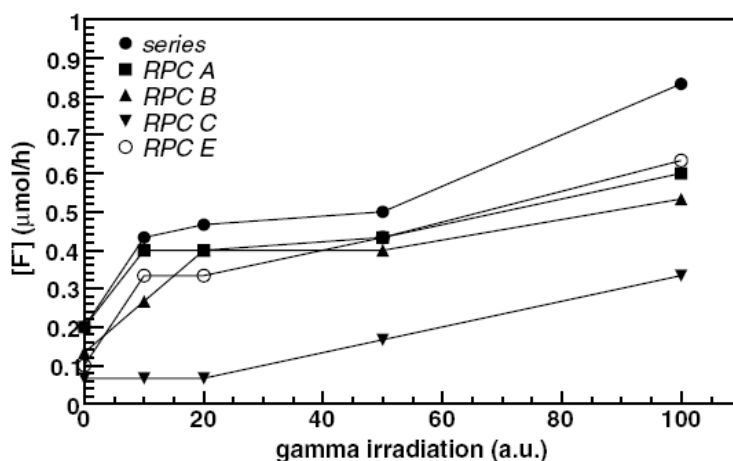
Камерата от тип RB1, $239 \times 205 \text{ cm}^2$ двупроцесна камера със съпротивителни плоскости, беше свързана към затворена газова система[60]. Това означава, че газовата смес от изхода на камерата се подава на пречистващи модули и след това на нейния вход. Използваната газова смес е съставена от 96% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* – C_4H_{10} и 0.5% SF_6 като по време на изследванията относителната ѝ влажност беше поддържана около 40 % чрез добавянето на водни пари. С цел да бъде имитирана реална работна обстановка и изяснено влиянието на радиоактивния фон, камерите бяха поставени на разстояние 2.5 m от ^{137}Cs източник на гама лъчение. При тази конфигурация максималната скорост на сработване на сигналните електроди беше 300 Hz/cm^2 , а дозата - 0.8 cGy/h . По време на цялото изследване бяха записвани следните данни: тока консумиран от детекторите, скоростта на сработване на сигналните електроди и състава на газовата смес. За последното беше използван хроматограф. На фиг. 4.1 е показана типична хроматограма, където се виждат сигналите от $C_2H_2F_4$, *iso* – C_4H_{10} , SF_6 , водни пари и въздух. Това е относително бърз метод позволяващ проверяването на състава на газовата смес при сравняване с референтна хроматограма.



Фигура 4.1: Типична хроматограма на работната газова смес, получена чрез хроматограф GC Varian CP2002P. Наблюдаваните сигнали са от SF_6 , водни пари, $C_2H_2F_4$ и *iso* – C_4H_{10} (от ляво на дясно). Сигналите около 18 s, показващи наличието на въздух са пренебрежими.

4.3 Отделяне на HF в единичните газови проци

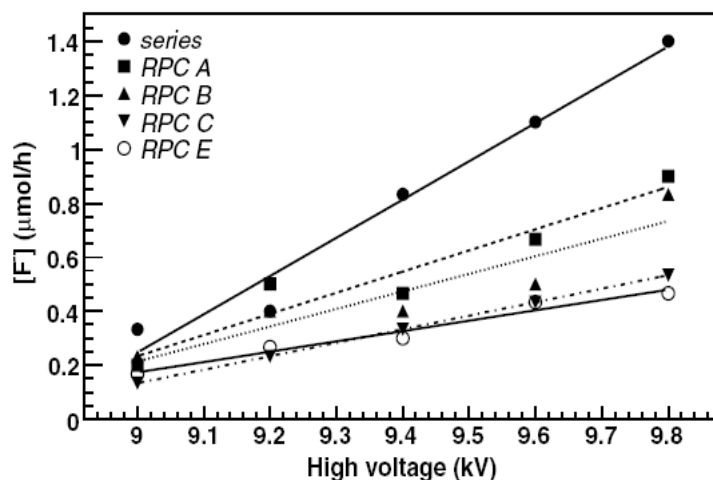
Много газови проби бяха събрани при различни експериментални условия и бяха анализирани чрез използването на две различни техники: флуориден електрод[61] и високо ефективен течен хроматограф(HPLC²)[62, 63]. Беше изследвано количеството на отделения HF в зависимост от интензитета на потока на γ -лъчението, а резултатите за всички детектори запазени с напрежение 9.4 kV са представени на фиг. 4.2. По абсцисата е нанесен интензитета на γ -лъчението в относителни единици(а.у) като 100 а.у. съответства на максимално облъчване (скорост на броене около 200 Hz/cm^2), а 0 а.у. - на работа без облъчване (скорост на броене $< 0.5\text{ Hz/cm}^2$).



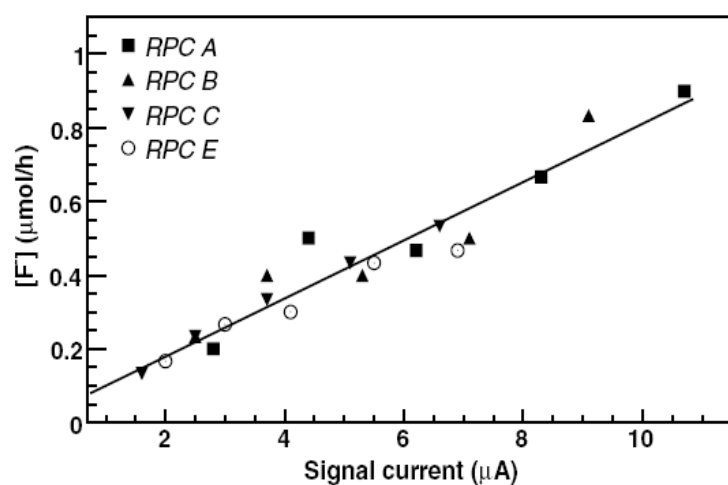
Фигура 4.2: Концентрация на флуоридните йони в различните проби, събрани от изходящата от RPC газова смес, при различен интензитет на потока на γ -лъчението. Запазващото напрежение е 9.4 kV .

От резултатите на фиг. 4.2 следва, че флуоридните йони се наблюдават в отработената газова смес даже и когато камерите не се облъчват. Следователно разпадането на фреон-съдържащите съединения под йонизиращото действие на γ -квантите от ^{137}Cs изглежда не е еднозначно определен източник на флуоридните йони. Измерените концентрации са свързани с активността на детекторите, която може да се характеризира например със скоростта на сработване на сигналните им електроди.

²от английски High Pressure Liquid Chromatograph



Фигура 4.3: Концентрация на флуоридните йони, в изходящата от RPC газова смес, в зависимост от захранващото напрежение при максимален интензитет на γ -лъчението.



Фигура 4.4: Концентрация на флуоридните йони, в изходящата от RPC газова смес, в зависимост от тока през газовите процепи (стойности са получени след изваждане на омовата съставна).

Както се вижда от фиг. 4.3 скоростта на отделяне на флуоридни йони е приблизително правопрпорционална на захранващото напрежение като коефициентите на пропорционалност са различни за различните детектори. На фиг. 4.4 е представена зависимостта на концентрацията на флуоридните йони от тока през RPC, след изваждане на омовата съставна, за газовите

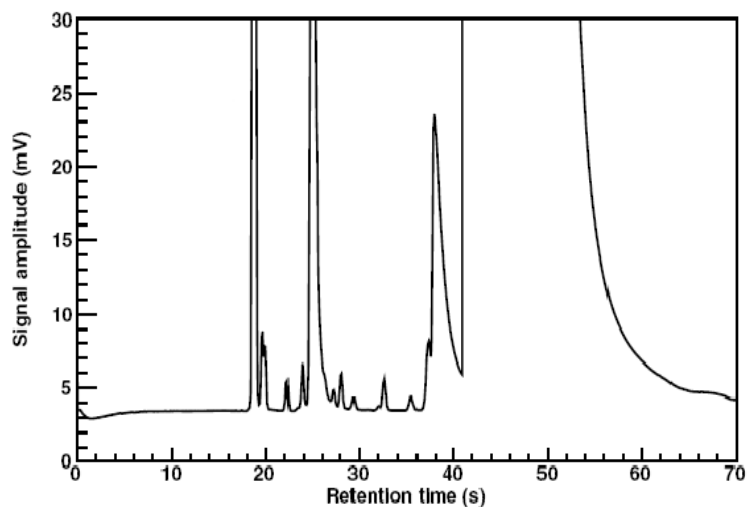
процепи свързани успоредно към газовата система, която отново може да се приеме за линейна. От факта, че всички зависимости имат един и същ наклон може да се направи заключението, че токът получен вследствие на газовото усилване е основния фактор определящ скоростта на отделяне на флуоридни йони.

От фиг. 4.3 може също така да се заключи, че голяма част от HF, получен в газовите процепи свързани последователно към газовата система, остава в газовите обеми на детекторите. Например при захранващо напрежение 9.6 kV би се очаквал общ поток на HF около $3.3\text{ }\mu\text{mol/h}$ (тъй като 7-те единични газови процепи са свързани последователно), измерената стойност, обаче е $1\text{ }\mu\text{mol/h}$. На практика грубата оценка показва, че около половината от HF взаимодейства вътре в газовите процепи. Направените химически анализи на вътрешната повърхност на процепите, които ще бъдат описани в раздел 4.5, потвърждават големите количества на отделени флуоридни йони.

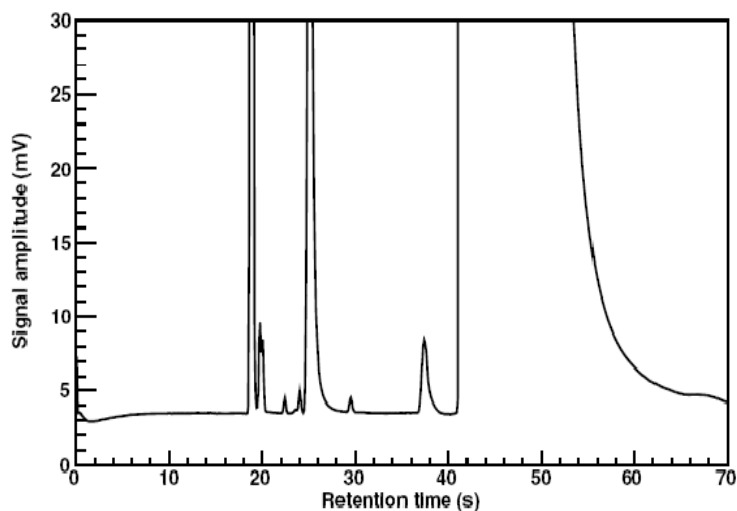
4.4 Отделяне на HF в камерите от тип RB1

Отделянето на примеси в газовите процепи може да доведе до увреждане на детекторите като това е особено важно за газова система от затворен тип. В действителност, многократното циркулиране на газовата смес води до натрупване на примеси, които променят работните характеристики на камерите. Това налага използване на пречистващи средства за отстраняване на примесите. На фиг. 4.5 са показани хроматограми на газовата смес, използвана един месец, преди 4.5а и след 4.5б пречиствателния модул. Сигналите от трите основни компоненти на газовата смес остават непроменени, докато сигналите от примесите с малко време на задържане са значително намалени. Единственото изключение е сигналът от водните пари около 40 s , който е намалял вследствие използването на молекулни филтри.

Ефективността на пречистването също бе изследвана. Средната концентрация на HF беше около $23.3\text{ }\mu\text{mol/h}$ преди пречиствателния модул и $0.1\text{ }\mu\text{mol/h}$ след него. Като се вземе предвид отношението на обемите на двата детектора, стойността на концентрацията на HF преди пречистване се съгласува добре с измерените стойности при единичните газови процепи ($0.5\text{ }\mu\text{mol/h}$).



(a)



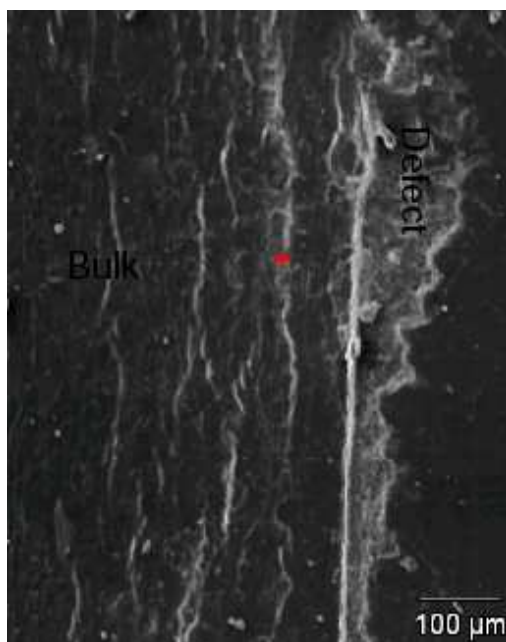
(б)

Фигура 4.5: Сравнение на състава на газовата смес в затворена система преди (a) и след пречиствателния модул (б)

4.5 Анализ на повърхността на бакелитените електроди

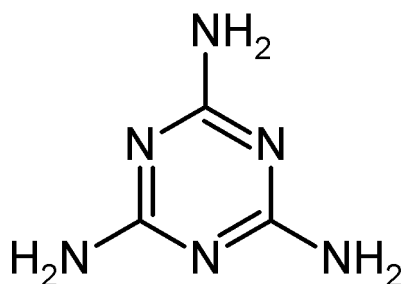
Беше изследван химичният състав на няколко проби от вътрешната повърхност на бакелитените електроди от камери тип RB1. При оглеждане на повърхностите се наблюдават много дефекти както на катода, така и на анода. Наблюдаваните дефекти са с максимален диаметър около 1 mm и оцветяване

главно в два цвята: бяло и оранжево-кафяво. Химичния състав на отложението беше изследван чрез рентгенофлуорисцентен анализ, като за целта беше използван електронен микроскоп с рентгенов спектрометър (SEM EDS/X-ray). На фиг. 4.6 се вижда повредена област от вътрешната повърхност. Рентгеновия $K\alpha$ спектър на незасегнатата бакелитена повърхност, която



Фигура 4.6: Повредена област от вътрешната повърхност на RPC тип RB1.

бе използвана като еталон, показва сигнали от химичните елементи въглерод, кислород и азот. Това е напълно обяснимо поради факта, че меламинавата



Фигура 4.7: Структурна формула на химичното съединение меламина.

смола ($C_3H_6N_6$ виж. фиг. 4.7) е съставена главно от тези елементи и тя се

използва за покриване на бакелитените електроди. Резултатите от подобен анализ на областите с повредена повърхност показват наличието в флуор с концентрации по-големи от тези в еталонната повърхност. Освен това се появяват сигнали от натрии, а сигналите от азот изчезват. Липсата на азот показва, че в областите с повредена повърхност меламинавия слой е напълно разрушен, защото бакелитените плоскости са изработени от фенолова смола, в чиито химичен строеж няма азот. Сигналите от натрий са резултат от наличието остатъци от натриев хидроксид ($NaOH$), който се използва като катализатор при производството на фенолна смола.

4.6 Заключение

За първи път е изследвано качеството на работната газова смес за камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS. Доказано е наличието на флуороводород (HF) в газовата смес на изхода на RPC като концентрацията му е измерена по два различни начина. Получените стойности са около $1.6 \mu mol/h$ при поток през газовия процеп равен на един обем на час. Механизма на получаването на HF не е изяснен напълно, но най-вероятно съединението е резултат от разпадането на $C_2H_2F_4$ под действието на фотони от UV-областта, излъчени при газовото умножение. В Приложение 1 [64] е описан един от възможните процеси, протичащи при облъчване с фотони.

Анализирането на газовите проби от детекторите свързани последователно към газоподаващата система показва, че около половината от образувания се HF остава в газовите процепи и реагира химически с веществата съставлящи електродите. Това твърдение е подкрепено и от наблюдаваното чрез рентгенофлуорисцентен анализ значително количество флуор, отложено върху вътрешната повърхност на съпротивителните електроди. Получилите се дефекти причиняват локално деформиране на хомогенното електрично поле в газовия обем и по този начин ускоряват отделяне на HF.

Глава 5

Мюонни телескопи за изследване на характеристиките на RPC за експеримента CMS

5.1 Въведение

След като бъдат сглобени, камерите със съпротивителна плоскост се подлагат на изследване на техните работни характеристики. Мюонните телескопи използвани за изследване на работните характеристики на RPC за детектора CMS по принцип се състоят от:

- Тригерна система - за тригерни детектори се използват сцинтилационни броячи поставени под и над чувствителната област на RPC намиращи се в кафеза;
- Високоволтова система - осигурява необходимото високо напрежение за работата на RPC. Важно е да се отбележи, че тази система трябва да позволява задаване на напрежението и измерване на тока с точност около 0.1 %;
- Нисковоолтово захранване - осигурява необходимото електрическо захранване на детекторната електроника като се подава отделно захранване на дигиталната и аналоговата част, и се измерва тока през двете поотделно;
- Система за събиране на данни (DAQ)- при получаване на сигнал от тригерната система, системата за събиране на данни изчита състоянието

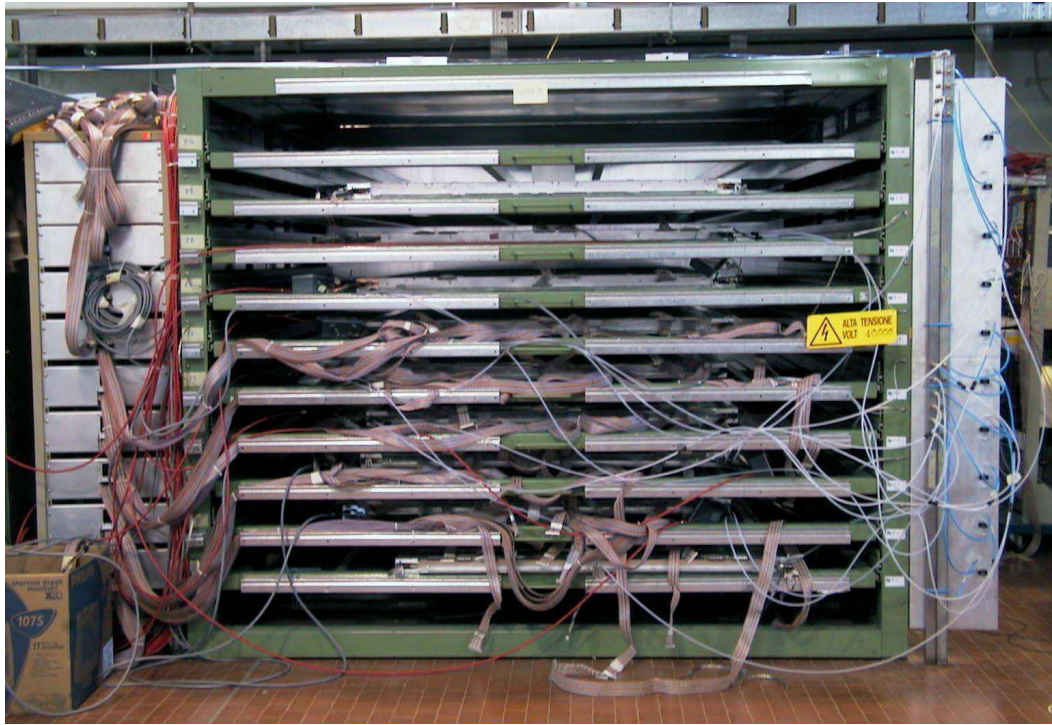
на всички сигнални електроди и го записва за по-нататъшна обработка;

- Газова система - осигурява постоянен приток на работната газова смес необходимия поток и относителна влажност;
- Система за наблюдение и контрол - служи за следене на температурата в помещението и атмосферното налягане, задаване на праговете на дискриминаторите на детекторната електроника и записва стойностите на високото напрежение и тока през камерите;
- Фарадеев кафез - той служи за екраниране на външните електромагнитни полета. В него се поставят камерите, които се изследват;

Мюонните телескопи в трите лаборатории, в Бари, София и Павия, където бяха изследвани RPC за цилиндричната част на CMS използват не много различни реализации на отделните системи.

5.2 Мюонен телескоп в Бари

Мюонният телескоп в Бари (5.1) използва фарадеев кафез, в който може да се поставят и изследват едновременно до 10 камери. Използват се четири тригерни сцинтилационни детектора, свързани в схема на съвпадение. За подтискане на тригерирането по електромагнитни лавини се използват два вето сцинтилационни детектора. Основни елементи в системата за събиране на данни са време-цифрови преобразователи (ВЦП) с общ стоп. Системата за събиране на данни работи с тактова честота 40 MHz . При получаване на сигнал от тригерната система DAQ записва състоянията на сигналните електроди за период от 2000 ns . Газовата система позволява подаването на газова смес с контролиран поток и точно определена концентрация на компонентите. Използва се трикомпонентна газова смес, съставена от $C_2H_2F_4$, $iso - C_4H_{10}$ и SF_6 . Данните за температурата и налягането се записват всяка минута и се използват за коригиране на получените данни. Високоволтовата система е с 20 канала и позволява задаването на напрежението с точност 1 V , а измерването на тока с точност $0.01\text{ }\mu\text{A}$. Комуникацията с високоволтовата система се извършва чрез TCP/IP интерфейс. За задаване на праговете на дискриминаторите на предната електроника се използва I_2C интерфейс.

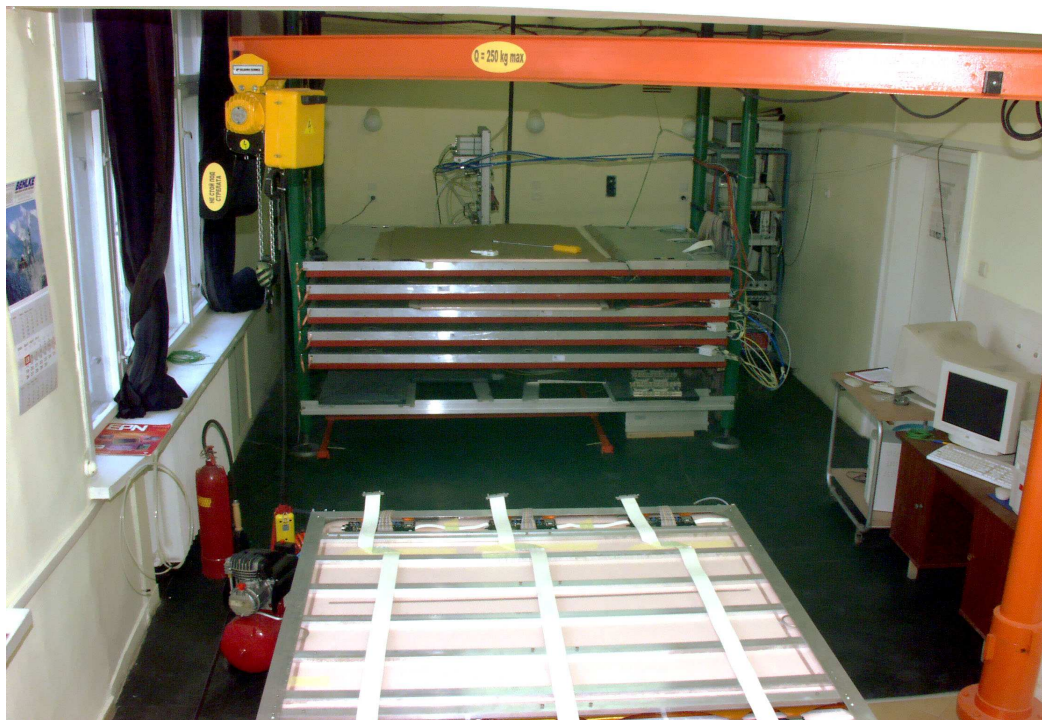


Фигура 5.1: Мюонен телескоп в лабораторията за изследване на характеристиките на RPC в Бари, Италия.

5.3 Мюонен телескоп в София

Мюонният телескоп с София (5.2) се намира в ИЯИЯЕ, БАН-София. Стендът позволява едновременното изследване на пет камери. Тригерната система се състои от осем сцинтилационни детектора като четири са включени в схема на съвпадение над предната част на камерите и четири - над задната част. Системата за събиране на данни изчита и записва състоянието на сигналните електроди във времеви прозорец с ширина 100 ns около тригерния сигнал. DAQ се състои от модули поставени в крейт SAMAC и всеки модул обработва сигналите от шест платки на детекторната електроника. Главният модул е свързан с РС (персонален компютър) чрез RS232 интерфейс. Програмируемият микроконтролер в главния модул осигурява контролиране за събирането на данните и комуникация с контролните платки на камерите (измерване на температурата, изчитане и задаване на праговете на дискриминаторите на детекторната електроника). На персоналния компютър работи софтуер, който записва събраните данни, извършва онлайн анализ и подава команди за изчитане и задаване на праговете. От друга страна, РС

е свързан с високоволтовата система по RS232 и чрез необходимия за това софтуер задава захранващото напрежение и записва стойностите на тока и напрежението.



Фигура 5.2: Мюонен телескоп в лабораторията за изследване на характеристиките на RPC в София.

5.4 Методи за изследване на характеристиките на RPC

Мюонните телескопи бяха използвани за изследване на характеристиките на камерите със съпротивителна плоскост. След преминаване на 7 обема газова смес през камерите, поставени в мюонния телескоп, те се захранват с високо напрежение и се прави волт-амперна характеристика. Напрежението се повишава постепенно с $1000\text{ V}/30\text{ min}$. Използват се следните стойности на захранващото напрежение: 0, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 8500, 9000, 9200, 9400, 9600, 9800 V. Следващата стъпка има за цел построяване на зависимостта на ефективността, средната големина на кластерите и шума на всеки сигнален електрод от захранващото напрежение при регист-

риране на космични мюони. Тези характеристики се измерват за 9000, 9200, 9400, 9600 и 9800 *V*, при три режима на работа на камерите:

- когато са захранени само горните газови процепи;
- когато са захранени само долните газови процепи;
- когато едновременно са захранени горните и долните газови процепи.

Зависимостите построени по този начин позволяват проверяване на работоспособността на камерата като цяло и всички единични газови процепи, съставлящи двойните процепи, правилната свързаност на електрониката и на сигналните електроди към платките на детекторната електроника.

5.4.1 Анализ на данните от космични мюони

Свойствата на работната газова смес зависят от температурата и налягането, и за да могат да бъдат сравнявани резултатите, получени при различни условия, се използва корекция за температура и налягане. Корекцията се прави за захранващото напрежение HV_{app} като вместо него се използва ефективно напрежение HV_{eff} , чиито смисъл е на напрежението, което трябва да се приложи при температура $T_0 = 293\text{ K}$ и налягане $P_0 = 1010\text{ mbar}$, за да се наблюдават същите характеристики на камерата. Ефективното напрежение се пресмята по следната формула[67]

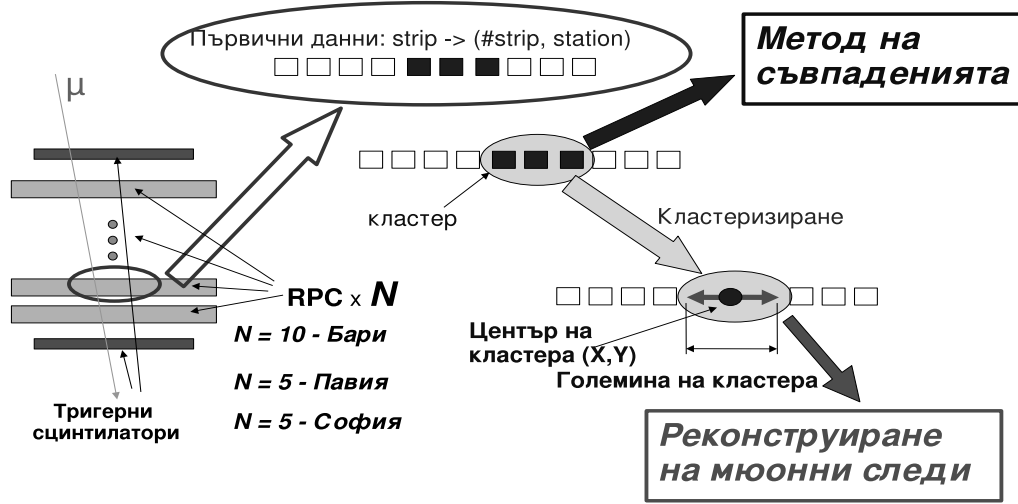
$$HV_{eff} = HV_{app} \times \frac{T}{T_0} \times \frac{P_0}{P}, \quad (5.1)$$

където P и T са съответно температурата и налягането. Нататък в изложението ще се работи само с ефективно напрежение и за краткост ще бъде наричано захранващо напрежение.

За всяко напрежение от петте, посочени по-горе и всеки режим на работа се събират по 10 000 събития¹.

Първичните данни от мюонните телескопи, които се записват, представляват състоянията на сигналните електроди във всяка от изследваните камери при сработване на тригерната система. При офлайн обработването на данните за всяко събитие сработилите съседни електроди се групират в кластери (фиг. 5.3). Кластерите се характеризират с големина, която е равна на броя на сигналните електроди във всеки от тях. След това обработването

¹Под събитие тук се разбира сработване на тригерната система



Фигура 5.3: Блок схема на обработването на данните от мюонните телескопи.

на данните продължава по два начина - метод на съвпаденията и метод на реконструиране на мюонни следи.

5.4.2 Метод на съвпаденията

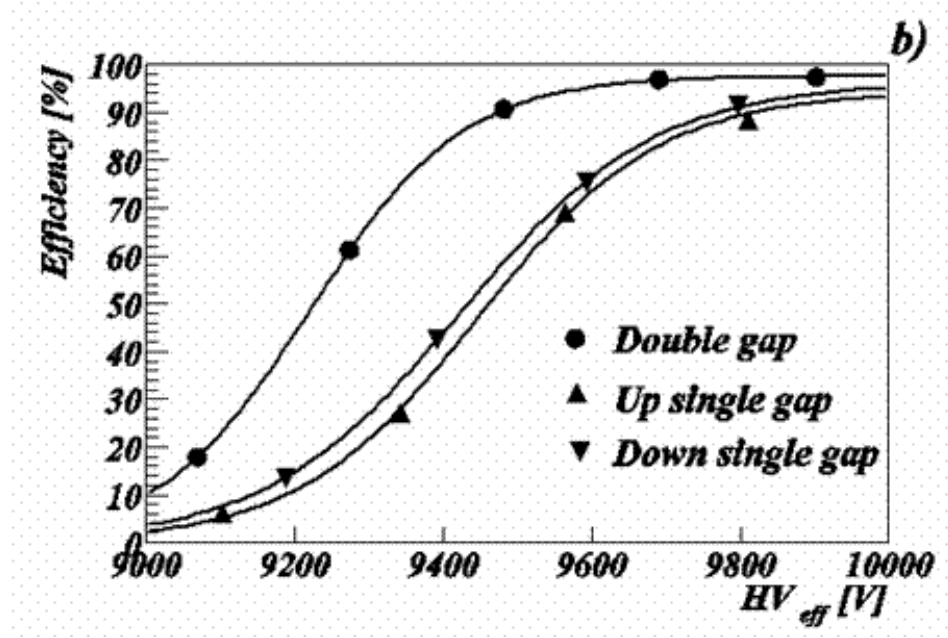
При използване на този метод една камера се счита за ефективна, ако във времеви прозорец от 100 ns около тригерния сигнал в нея има поне един кластер. За N_{trigg} събития, от които в N камерата е била ефективна, ефективността на камерата е

$$\epsilon_{nc} = N/N_{trigg}. \quad (5.2)$$

Не трябва да се забравя, обаче че появата на кластер във времевия прозорец може да не е в резултат на преминалия мюон през телескопа. Следователно трябва да се направи корекция и ако S е вероятността във времевия прозорец да се появи шумов кластер, то ефективността на камерата се пресмята по следния начин:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{nc} - S}{1 - S} \quad (5.3)$$

S се пресмята по същия начин както и ϵ_{nc} , но за времеви прозорец отместен далеч от тригерния сигнал.



Фигура 5.4: Зависимост на ефективността от захранващото напрежение, получена чрез метод на съвпаденията за трите режима на работа: включени само горните газови процепи (“Up Single Gaps”), само долните газови процепи (“Down Single Gaps”) и включени всички газови процепи (“Double Gap”).

Стандартното отклонение на величината пресметната чрез уравнение 5.2 е

$$\Delta\epsilon_{nc} = \sqrt{\frac{\epsilon_{nc}(1 - \epsilon_{nc})}{N_{trigg}}} \quad (5.4)$$

За стандартното отклонение на коригираната ефективност ϵ , при условие, че некоригираната ефективност и вероятността за случайни сработвания на камерите са определени чрез един и същи брой събития N_{trigg} се получава

$$\Delta\epsilon = \sqrt{(1 - \epsilon_{nc}) \frac{s(1 - \epsilon_{nc}) + (1 - s)\epsilon_{nc}}{(1 - s)^3 N_{trigg}}} \quad (5.5)$$

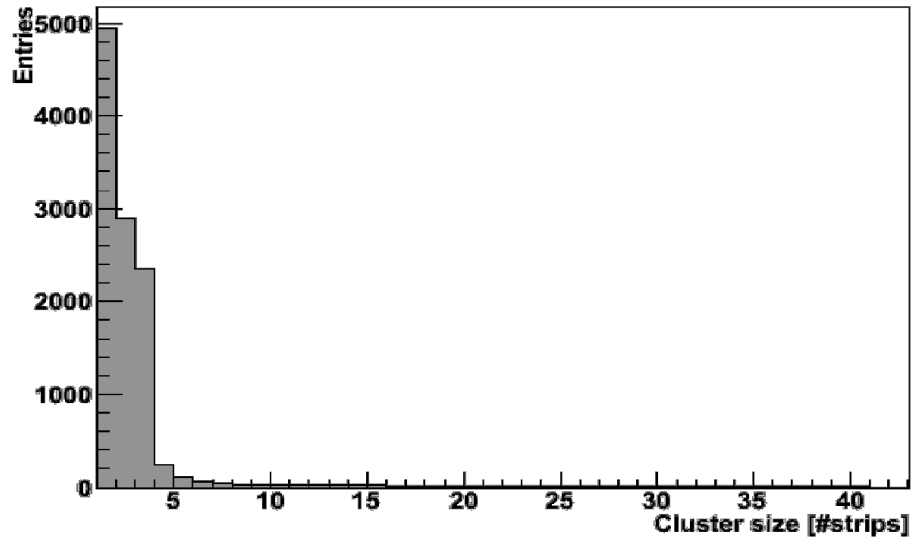
За не коригирани ефективности ϵ_{nc} около 95 %, S около 1 % и 10 000 събития

се получават следните резултати:

$$\Delta\epsilon_{nc} = 0.179\% \quad \epsilon = 94.9\% \quad \Delta\epsilon = 0.202\% \quad (5.6)$$

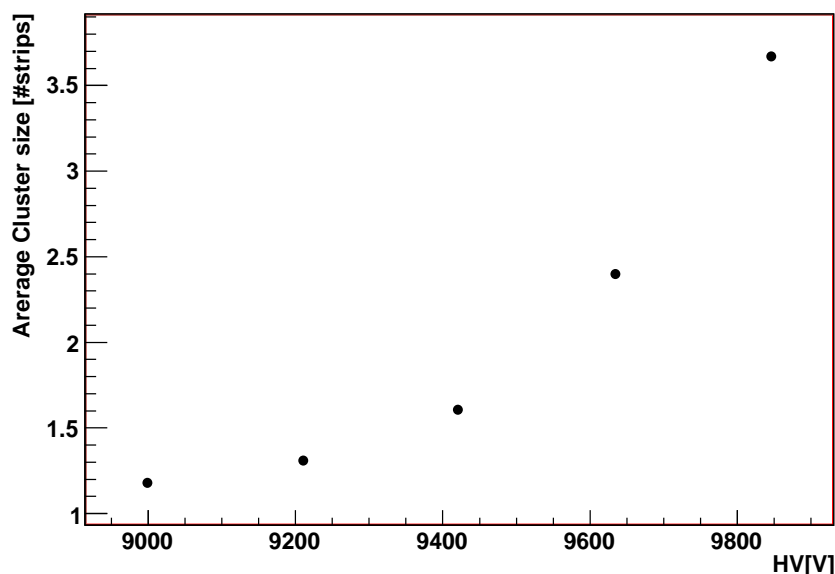
или казано по друг начин, ако $s \ll 1$, то $(1 - s) \approx 1$, от уравнение 5.5 следва, че $\Delta\epsilon \approx \Delta\epsilon_{nc}$.

На фиг. 5.4 е представена типична зависимост на ефективността от захранващото напрежение. Както се вижда ефективността на камерата, когато тя работи в двупроцепен режим е по-голяма при по-малки напрежения от ефективността за еднопроцепен режим и освен това при двупроцепния режим се достигат по-големи максимални ефективности. Големината на клъс-



Фигура 5.5: Примерно разпределение на големината на кластерите, получено чрез метод на съвпаденията.

терите за всички събития се запълват в хистограма. Пример за такова разпределение е показан на фиг. 5.5, а средната стойност на тази хистограма се нарича средна големина на кластерите. На фиг. 5.6 е представена типична зависимост на средната големина на кластерите от напрежението.



Фигура 5.6: Зависимост на средната големина на кластерите от захранващото напрежение.

5.4.3 Реконструиране на мюонни следи

Както вече беше казано в мюонните телескопи в лабораториите в Бари и София могат да се изследват едновременно по най-много 10 и 5 камери съответно. За обработване на данните получени от телескопа в Бари се използва метод за реконструиране на мюонни следи описан в [71]. Поради малкия брой камери в мюонния телескоп в София беше използван следния метод, който в случая е по-подходящ. Всъщност една от камерите се определя за тестова, а останалите за реферни. Мюонните следи се реконструират само чрез реферните камери, а характеристиките на тестовата камера се изследват посредством тези следи. В анализа се вземат предвид само събитията, в които е реконструирана мюонна следа.

Нека използваната декартова координатна система Oxy е такава, че нейното начало O да е привързано към най-левия сигнален електрод на най-долната камера в телескопа, оста Ox е успоредна на равнината на сигналните електроди и перпендикулярна на дългата им ос, и оста Oy да е перпендикулярна на равнините на сигналните електроди и сочи нагоре. В първичните данни сигналните електроди имат за координати номер на сигнален електрод и номер на камерата, в която се намира сигналния електрод като камерите се

броят от долу нагоре (1, 2, 3, 4, 5), а сигналните електроди от ляво на дясно (1,2...42²). Координатите на m -тия сигнален електрод намиращ се в камера на позиция st в мюонния телескоп се пресмятат по следния начин

$$x = (m - 1)p_{strip} \quad y = (st - 1)p_{st}, \quad (5.7)$$

където p_{strip} е разстоянието между центровете на два съседни сигнални електрода, а p_{st} - разстоянието между равнините, в които лежат сигналните електроди на две камери поставени на съседни позиции в телескопа. На всеки кластер получен от първичните данни се съпоставя център и ширина. Ширината на кластер w_{cls} състоящ се от n_s сигнални електрода се изчислява по формулата

$$w_{cls} = \frac{x_r - x_l}{p_{strip}}, \quad (5.8)$$

а x -координата на центъра му се дава от израза

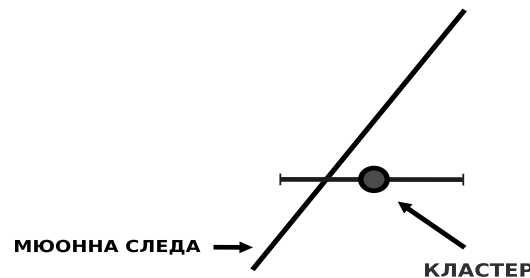
$$x_{cls} = \frac{x_r + x_l}{2}, \quad (5.9)$$

където x_l и x_r са съответно x -координатите на центровете на напречните сечения на най-левия и най-десния сигнални електроди, съставляващи кластера. y -координатата се определя в зависимост от това в коя камера се намира кластера.

За реконструиране на мюонни следи се избират само събития, в които има само по един кластер, в най-малко три от реферните камери. Избира се двойка кластери и през техните центрове се прекарва права. Изчисляват се координатите на точките, в които правата пробощда другите реферни камери. Ако там има кластери с центрове намиращи се на разстояние по-малко от предварително избрана стойност δ , то те се избират и по метода на най-малките квадрати се построява права, минаваща на най-малко разстояние от групата състояща се от избраните кластери и първоначалната двойка. След това се започва от друга двойка кластери и по същия начин се реконструира права. Ако са намерени повече от една права се избира тази, с най-малък χ^2 . В хистограми за всяка камера се запълват разстоянията между точките, които избраната права пробощда съответната камера и центъра на кластера използван за нейното реконструиране. Причината средните стойности на хистограмите да са различни от нула е разместване на камерите т.е. съот-

²В София се изследват камери от тип RB3, които имат по 42 сигнални електрода във всеки от двойните си газови процепи

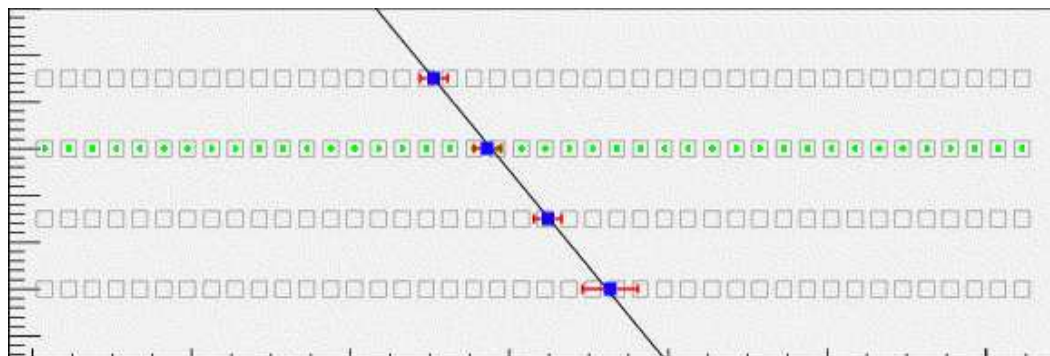
ветните сигнални електроди не се намират точно един под друг. Ето защо за всяка камера се прави корекция при изчисляване на x -координатите сигналните електроди и отново се повтаря процедурата за реконструиране. Една реконструирана права се избира за мюонна следа, ако тя апроксимира най-малко три кластера, всеки с големина по-малка от 7 сигнални електрода, т.е. не се вземат предвид кластери получени от стримери, което е обяснено в раздел 6.4, и е съвместима с тях. На фиг. 5.7 е показано графично значението на понятието съвместим с мюонната следа кластер. На фиг. 5.8, 5.9 и



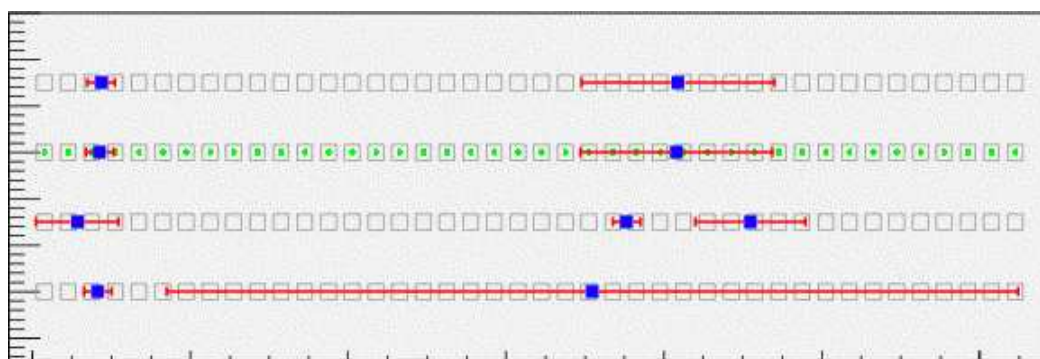
Фигура 5.7: Кластер съвместим с мюонната следа.

5.10 са показани примерни събития като с празните квадратни маркери са обозначени сигналните електроди на реферните камери, а сигналните електроди на изследваната камера - с квадратни маркери с точка в центъра. На фиг. 5.8 е представено събитие, в което е реконструирана мюонна следа, а в тестовата камера има съвместим с нея кластер. Отхвърлено събитие с много кластери в реферните камери се вижда на фиг. 5.9, а на фиг. 5.10 е показано събитие само с два кластера в реферните камери, поради което не може да бъде реконструирана мюонна следа.

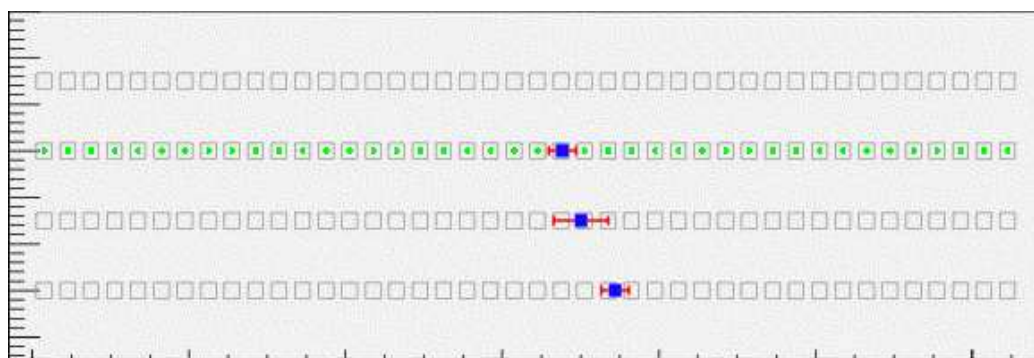
Тестовата камера се счита за ефективна, ако в нея се намира кластер съвместим с реконструираната мюонна следа. Големината на кластера в брой сигнални електроди се запълва в хистограма. Средната големина на кластерите се изчислява като средното на разпределението на големините на кластерите, както беше описано по-горе. Ефективността на камерата се пресмята



Фигура 5.8: Реконструирана мюонна следа като в конкретния случай в изследваната камера има съвместим със следата кластер.



Фигура 5.9: Събитие с голяма множественост, при което не се реконструира мюонна следа.



Фигура 5.10: Събитие, в което не се реконструира мюонна следа, поради малък брой кластери в референтните камери.

като

$$\epsilon_{reco} = \frac{N}{N_{track}} \quad (5.10)$$

където N_{track} е броя на реконструирания мюонни след, а N - броя на случаите, в които в тестовата камера е намерен кластер съвместим с мюонната следа. Средното квадратично отклонение на ефективността се пресмята по същия начин както за некоригираната ефективност при метода на съвпаденията (виж уравнение 5.4) като вместо ϵ_{nc} се използва ϵ_{reco} и вместо N_{trigg} се използва съответно N_{track} .

Апроксимиране на зависимостта на ефективността на RPC от захранващото напрежение

При обработване на резултатите от изследването на характеристиките на камерите със съпротивителна плоскост е нужно пресмятането на ефективността за произволно напрежение в интервала, който се сканира. За тази цел се използва апроксимиране на получената зависимост на ефективността от напрежението с функцията

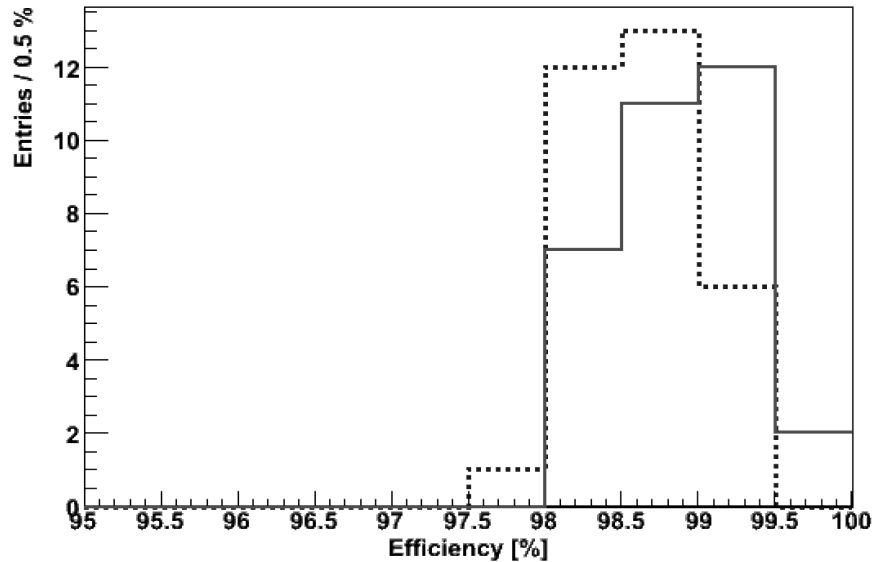
$$\epsilon(V) = \frac{\epsilon_{max}}{1 + e^{-\alpha(V-V_0)}}, \quad (5.11)$$

където V е захранващото напрежение, $\epsilon(V)$ - ефективността при напрежение V , ϵ_{max} - достигната максимална ефективност, V_0 е напрежението, при което ефективността е 50 % от ϵ_{max} . α е такъв коефициент, че изрази $\frac{\ln 81}{\alpha}$ дава разликата в напреженията ΔV , при които ефективността е съответно 90 % от ϵ_{max} и 10 % от ϵ_{max} .

5.5 Резултати

Стойностите за ефективността на камерите, получени по двата метода се различават малко поради факта, че при метода с реконструиране на мюонни следи се избират събития, в които през изследваната камера със сигурност е преминал мюон.

При използване на метода на съвпаденията са вероятни събития, в които тригерната система е запусната от два мюона минали едновременно през двете групи тригерни сцинтилатори, но нито един от мюоните не е минал през изследваната камера. На фиг. 5.11 е показано сравнение на разпределението на ефективностите на 16 камери (32 двойни газови процепа), изследвани на мюонния телескоп в София, при $NV=9,6 \text{ kV}$. Както се вижда от фигурата, средната стойност на разпределението на ефективността получена чрез

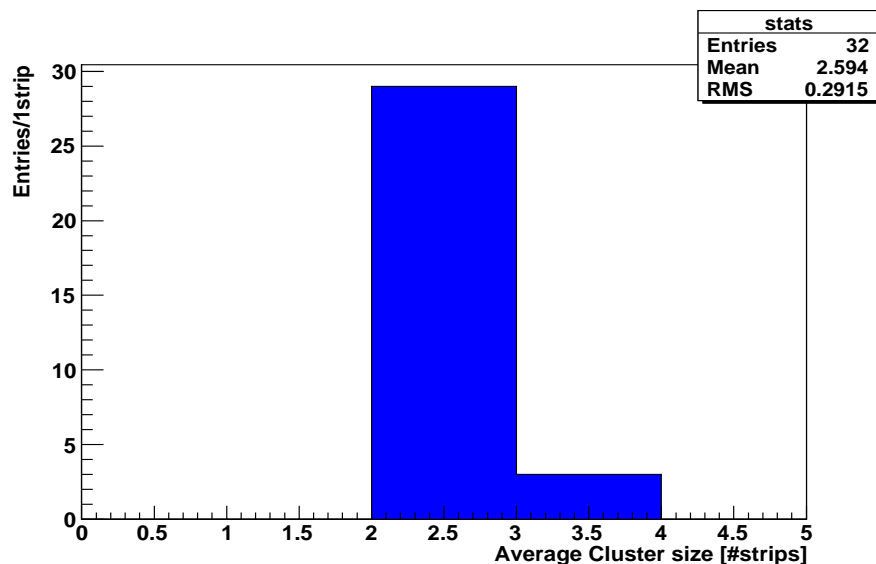


Фигура 5.11: Разпределение на ефективностите на 16 камери (32 двойни газо-ви процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$ получени по метод на съвпаденията (прекъсва линия на графиката) и по метода използващ реконструиране на мюонни сле-ди (непрекъсната линия на графиката).

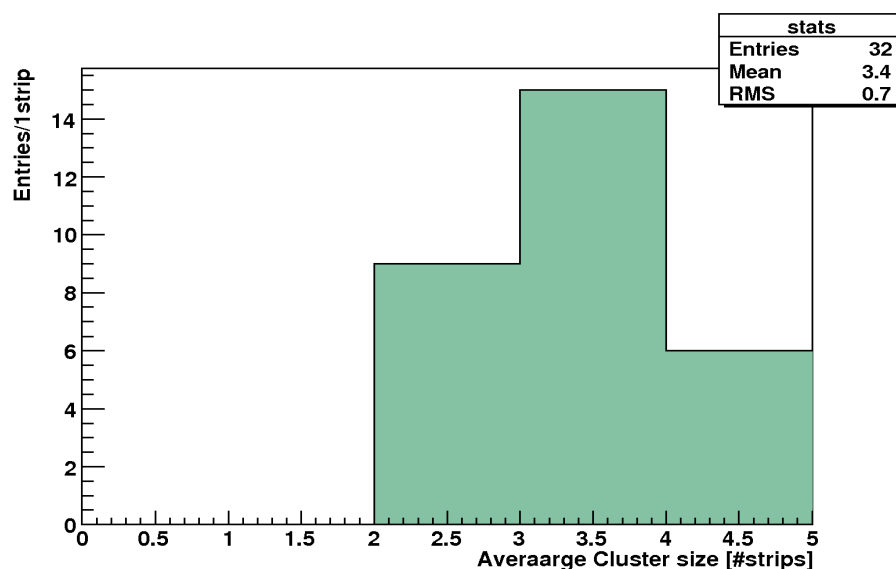
метода на реконструиране на мюонни слеци е по-голяма от тази на разпре-делението на ефективността получена по метода на съвпаденията.

Средните стойности на разпределенията на големината на кластерите по-лучени по двата метода също се различават. Това е резултат от невъзмож-ността в метода на съвпаденията да се различат кластерите получени при преминаването на мюон от кластерите получени при шумови сработвания. Поради факта, че шумовите сработвания са предимно с големина на кластера един сигнален електрод, при метода на съвпаденията средната големина на кластерите е изместена леко на ляво към по-малките стойности. И за разлика от ефективността получена по метода на съвпаденията, средната големина на кластерите по този метод не може да бъде коригирана. На фиг. 5.12 е показано разпределението на средната големина на кластерите за 16 камери (32 двойни газо-ви процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$ получени по метод на съвпаде-нията, а на фиг. 5.13 разпределението на средната големина на кластерите за същите 16 камери (32 двойни газо-ви процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$, получени по метода използващ реконструиране на мюонни слеци, като са анализирани

същите данни.



Фигура 5.12: Разпределение на средната големина на кластерите за 16 камери (32 двойни газови процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$, получени по метод на съвпаденията.



Фигура 5.13: Разпределение на средната големина на кластерите за 16 камери (32 двойни газови процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$, получени по метода използващ реконструиране на мюонни следи.

Резултатите от изследването на характеристиките на камерите със съп-

ротивителна плоскост за всяка от посочените стойности на захранващото напрежение, напровено в която и да е от трите лаборатории се записва в база данни. С цел проверяване на качеството на данните преди записването им в базата данни е реализирано програмно приложение. Компютърната програма позволява визуализиране на разпределенията по сигнални електроди на събитията и шума, а също така и разпределението на големината за кластерите. Друга нейна функционалност е систематизиране и визуализиране на информацията, касаеща измерването.

5.6 Заключение

Бяха представени в общи линии мюонните телескопи в Бари и София. Данните от мюонните телескопи се обработват по два метода: на съвпаденията и чрез реконструиране на мюонни следи. Разликите в резултатите, получени при използването на двата метода, са коментирани с цел обосноваване на използването на метода с реконструиране на мюонни следи за обработване на данните необходими за сравняването на характеристиките на камерите работещи с три газови смеси, описано в следващата глава.

Глава 6

Изследване на RPC за CMS работещи в лавинен режим

6.1 Въведение

Вероятността за поява на стример е параметър от съществено значение, когато се избира газова смес за RPC в лавинен режим. В [40][68] е показано, че добавянето на малки количества SF_6 има много силен ефект при подтискането на стримерния разряд т.е. измества прехода лавинен-стримерен режим към по-големи напрежения. Използването на флуор-съдържащи съединения, обаче може да причини увреждане на вътрешната повърхност на съпротивителните електроди поради отделянето на флуоридни йони в относително голяма концентрация под действие на газови разряди [33][34]. Увеличаването на концентрацията на изобутан в работната газова смес е един от начините за намаляване на вредното действие на флуоридните йони[69].

Следващите изследвания са представени в [70].

6.2 Използвани данни и тяхното анализиране

В това изследване на характеристиките на RPC са използвани три различни групи камери означени съответно с N_1 , N_2 , N_3 , които работиха с три различни газови смеси. Използвани са мюонните телскопи в София и Бари като за всяка от задаваните стойности на високото напрежение са събрани по 10000 събития и данните са обработени по метода на реконструиране на мюонни следи.

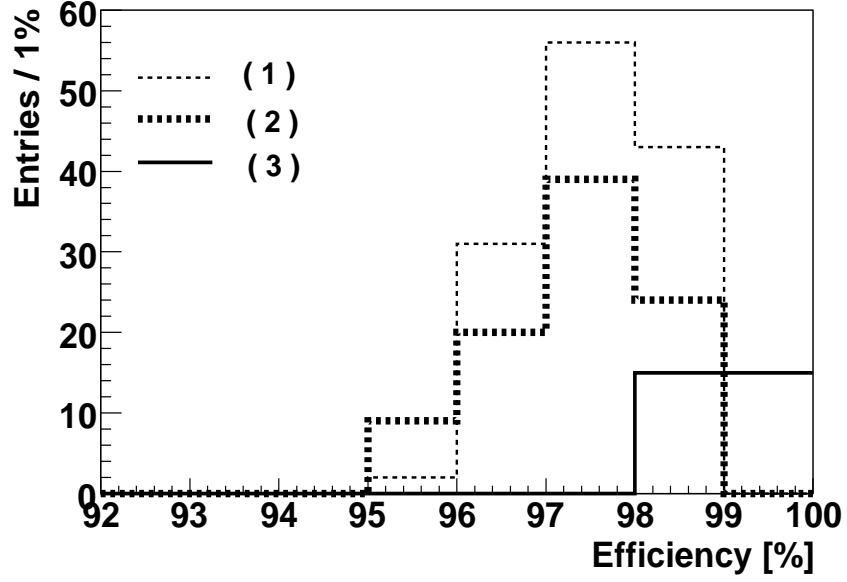
Първата извадка от данни е събирана в продължение на шест месеца с работна газова смес със състав 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% $iso-C_4H_{10}$ и 0.3% SF_6 . Резултати получени от тези данни са означени с “(1)” на всички фигури в изложението, което следва. Втората извадка от данни съответства на друг шестмесечен прериод като използваната газова смес (стандартна газова смес, с която са изследвани болшинството от камерите за CMS) е - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso-C_4H_{10}$ и 0.3% SF_6 , а получените резултати са означени с “(2)”. Резултатите от третата извадка са означени с “(3)” на фигурите, включва данни събрани с газова смес - 96.5% $C_2H_2F_4$ и 3.5% $iso-C_4H_{10}$.

6.3 Ефективност и средна големина на кластерите

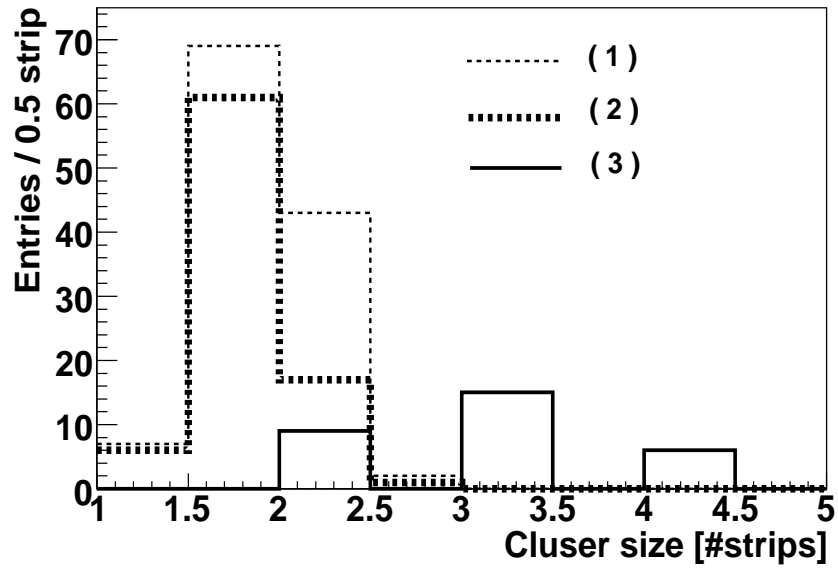
Ефективността на камерите със съпротивителна плоскост е една от най-важните характеристики. На фиг. 6.1 се вижда разпределението на ефективността на камерите от трите изследвани групи. Стойностите на ефективността са пресметнати за ефективно напрежение 9.6 kV, което се намира в работното плато[71] на камерите. Средната стойност на разпределението за стандартната газова смес “(2)” е 97.35 %, а ефективността за газовата смес “(1)” се отличава само с 0.2 %. Средната стойност на ефективността на камерите работещи с газова смес без SF_6 надвишава 98.5 %.

На фиг. 6.2 са представени разпределенията на средната големина на кластерите при ефективно напрежение 9.6 kV. Средните стойности за газовите смеси “(1)” и “(2)” са около 1.88. Значението на средната големина на кластерите за газовата смес “(3)”, обаче е значително по-високо. Това се получава в резултат на значително по широкото разпръскване на отделения свободен електронен заряд вследствие йонизация от фотони с голям свободен пробег поради липсата на SF_6 [40]. Така получения по-голям заряд добре обяснява по-голямата ефективност на камерите работеща с третата газова смес (фиг. 6.1).

Използването на газова смес с по-голяма концентрация на изобутан подобрява химическите характеристики на газовата смес[69]. Така се избягва появата на пробиви в газовия процеп и вътрешната повърхност на бакелита се запазва неповредена. По този начин детекторите работят в по-безопасен режим, което води до по-малка консумация на ток и стабилност на тока при продължителна експлоатация. Поради това е важно да се изследва как



Фигура 6.1: Разпределение на ефективността на камерите за всяка от изследваните работни газови смеси при ефективно напрежение 9.6 kV .



Фигура 6.2: Разпределение на средната големина на кластерите на камерите за всяка от изследваните работни газови смеси при ефективно напрежение 9.6 kV .

увеличаването на концентрацията на $iso-C_4H_{10}$ влияе на работните характеристики на RPC. Както вече беше отбелязано, от фиг. 6.1 и 6.2 се вижда, че увеличаването на концентрацията на $iso-C_4H_{10}$ с 1.5% за сметка на концентрацията на фреон не променя особено ефективността и средната големина на кластерите. Следователно увеличаването на концентрацията на изобутан в газовата смес не влошава характеристиките на камерите в сравнение със стандартната газова смес и освен това се наблюдава подобряване на стабилността на тока и намаляване на стойностите му.

6.4 Вероятност за поява на стример

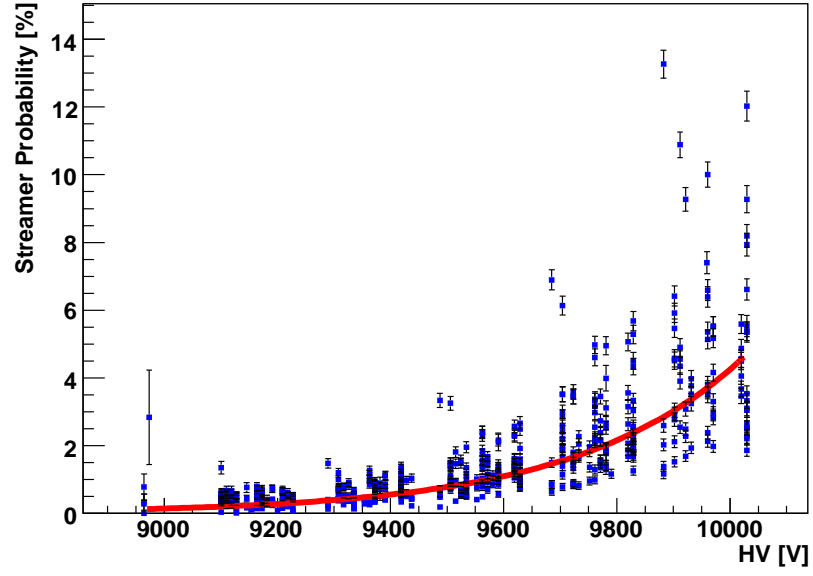
RPC за CMS трябва да работят в лавинен режим, далеч от прехода лавинен-стримерени режим. Ако те работят близо до този преход, то появата на стримери би се проявила като внезапно намаляване на ефективността или поява на много големи кластери като и двете са свързани с отделянето на голям свободен заряд в газовата междина.

Зарядовата чувствителност на усилвателите на детекторната електроника е $2mV/fC$ за входни сигнали по-малки от $100fC$ [57]. Следователно за прагове около $200mV$ зарядовия праг е около $120fC$. Сработването на голям брой съседни сигнални електроди е без съмнение доказателство, че в газовата междина се е развил стример и може да се дефинира вероятност за поява на стример като вероятността да се появи кластер с размер по-голям от 7 [68]

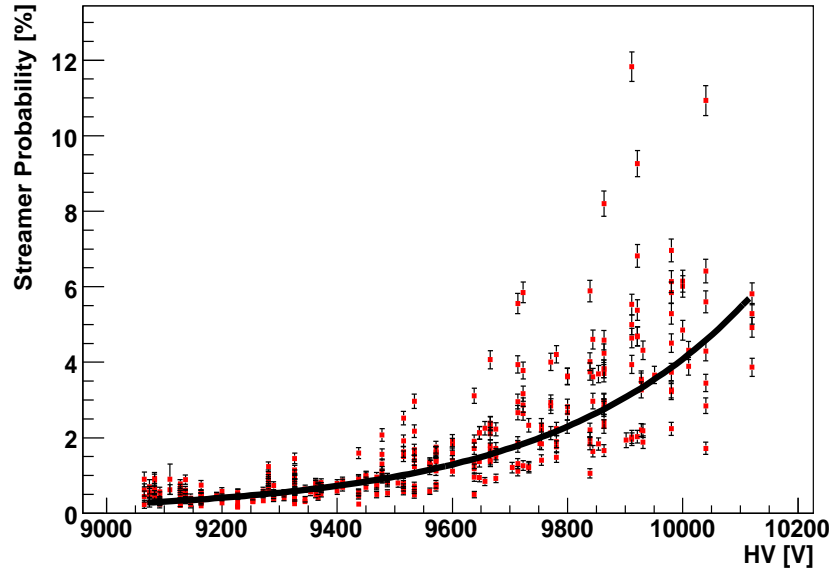
$$P_s = \frac{N_{CS>7}}{N}, \quad (6.1)$$

където $N_{CS>7}$ е броя на кластерите с размер по-голям от 7, а N е броя на всички кластери. Едно от изискванията към камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS е вероятността за поява на стример да е по-малка от 10%.

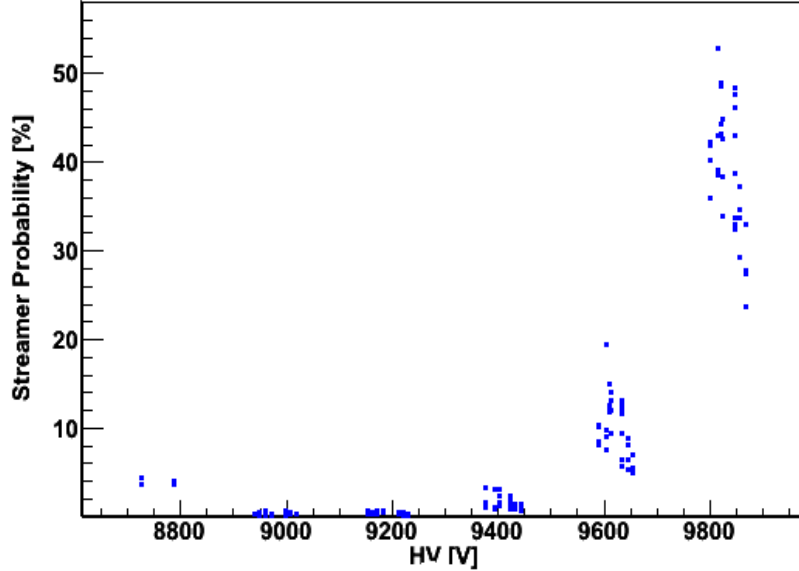
На фиг. 6.3, 6.4 и 6.5 са показани зависимостите на вероятността за поява на стример от захранващото напрежение за газовите смеси “(1)”, “(2)” и “(3)” съответно. Както се вижда, различната концентрация на изобутан в първите две газови смеси не влияе на вероятността за поява на стример, а стойностите и са около 4% дори и при $10kV$. При третата газова смес границата от 10% се достига още при ефективно напрежение $9.6kV$. При липса на SF_6 процесите на фотойонизация преобладават, което води до увеличаване на пълния заряд от свободните електрони и областта, в която той се получава. Прехода между



Фигура 6.3: Вероятност за поява на стример за газова смес “(1)” - 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% *iso* - C_4H_{10} , 0.3% SF_6



Фигура 6.4: Вероятност за поява на стример за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* - C_4H_{10} , 0.3% SF_6



Фигура 6.5: Вероятност за поява на стример за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* - C_4H_{10}

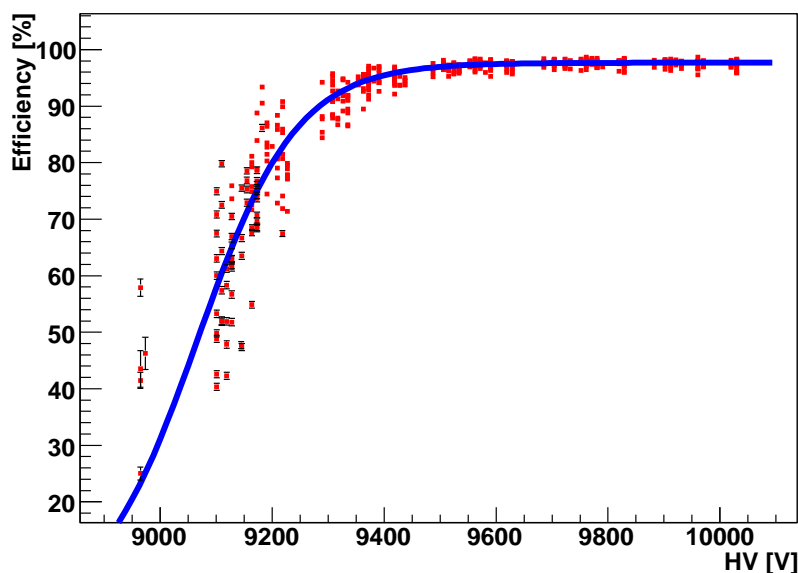
лавинен и стримерен режим се измества към по ниски напрежения. Това потвърждава заключението направено в [40], а именно, че коефициента за захващане на електрони при малки концентрации на SF_6 е малък в етапа на нарастване на електронната лавина и много голям, когато лавината започва да се насища. Ето защо е много важно, добавянето на съставка подтискаща процесите на фотойонизация.

6.5 Работно плато

Работното плато е друга важна характеристика, която ще бъде използвана при сравняването на трите газови смеси. Тя се дефинира като интервала от работни напрежения, където определени работни характеристики изпълняват предварително зададени условия. Работното плато започва от напрежението, където ефективността на камерата става равна на 95% от максималната ефективност [71] и продължава до това напрежение, при което или вероятността за поява на стример или средна големина на кластера достигнат граничните стойности съответно 10% или 3. При това разглеждане е наложено по-силно условие за началото на платото - то да започва от 95%

абсолютна ефективност.

На фиг. 6.6, 6.7 и 6.8 са показани ефективностите в зависимост от напрежението за трите газови смеси.

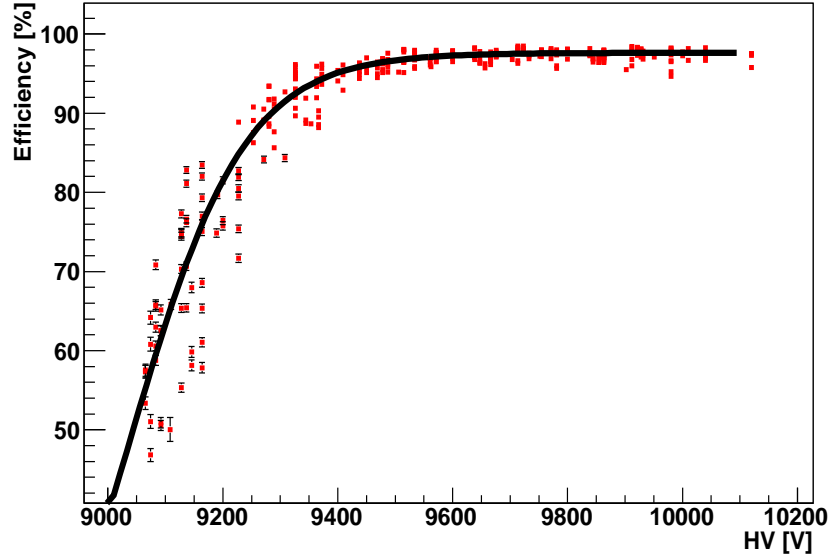


Фигура 6.6: Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(1)” - 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% *iso* – C_4H_{10} , 0.3% SF_6

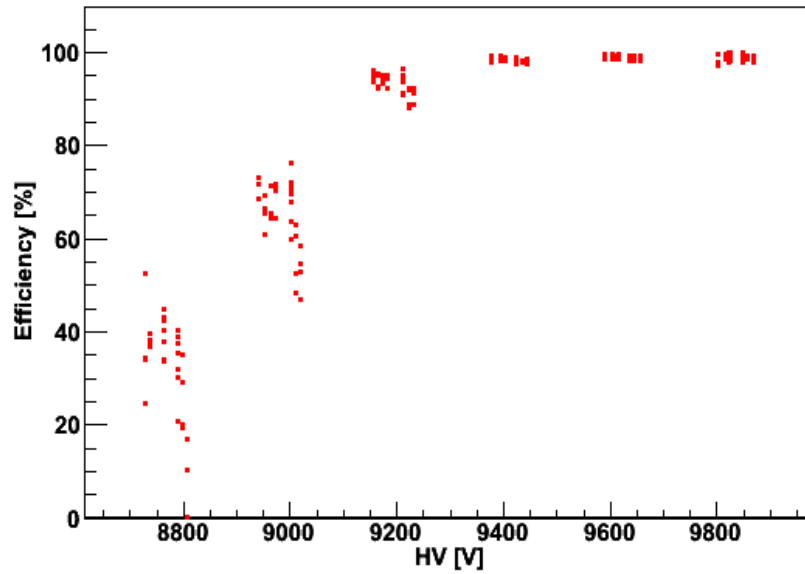
Работните плато за първата и втората газови смеси започват от около 9.4 kV и завършват около 9.9 kV, където средната големина на кластерите става равна на границата от 3 сигнални електрода. Вероятността за поява на стример при 9.9 kV е по-малка малка от границата от 10% както се вижда от фиг. 6.3 и 6.4.

Що се отнася до работното плато на третата газова смес то започва от 9250 V и продължава до 9.6 kV, където вероятността за поява на стример достига 10%. Платото за тренава газова смес е по-късо в сравнение с тези на другите две газови смеси и е отместено към по-ниски напрежения.

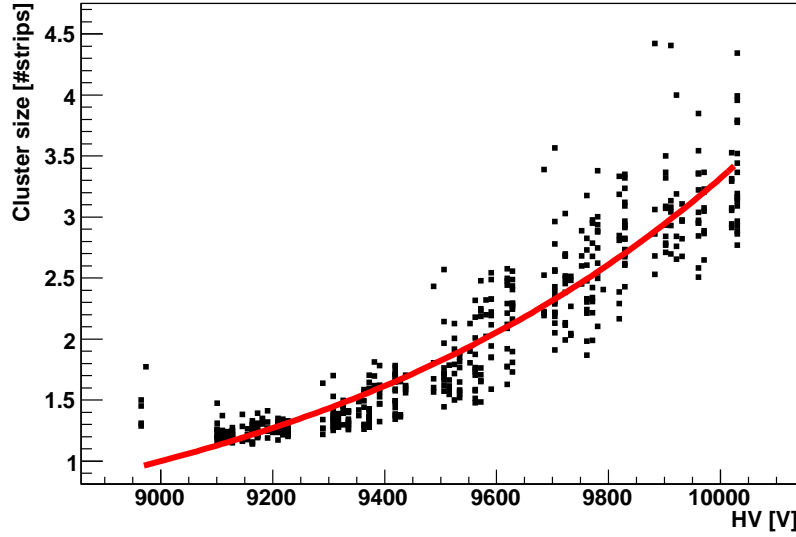
Според изискванията средната големина на кластерите трябва да е не по-голяма от два сигнални електрода[15]. За газовите смеси, съдържащи SF_6 , средната големина на кластерите надвишава два сигнални електрода при напрежение малко над 9.6 kV (виж фиг. 6.9 и 6.10). Това стеснява работното напрежение между 9.4 kV и 9.6 kV. За третата газова смес, не съдържаща SF_6 , средната големина на кластерите надвишава границата при напрежения около 9.5 kV (виж фиг. 6.11).



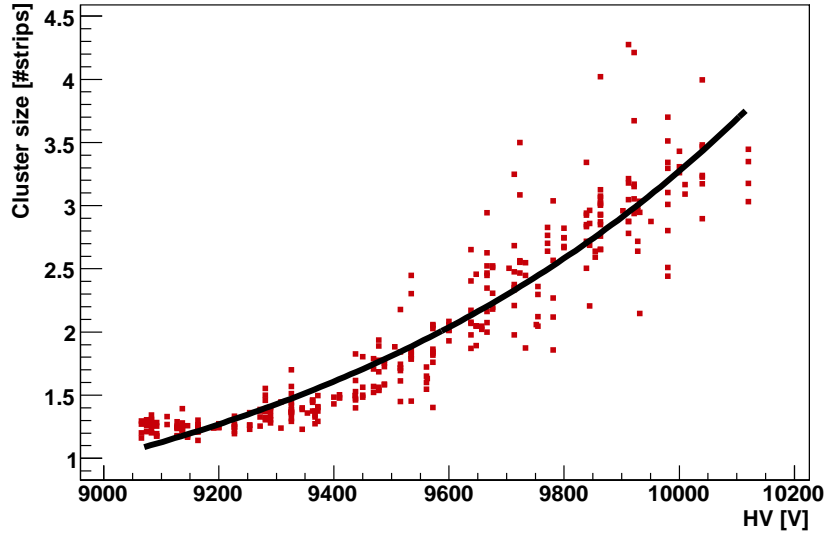
Фигура 6.7: Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* - C_4H_{10} , 0.3% SF_6



Фигура 6.8: Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* - C_4H_{10}



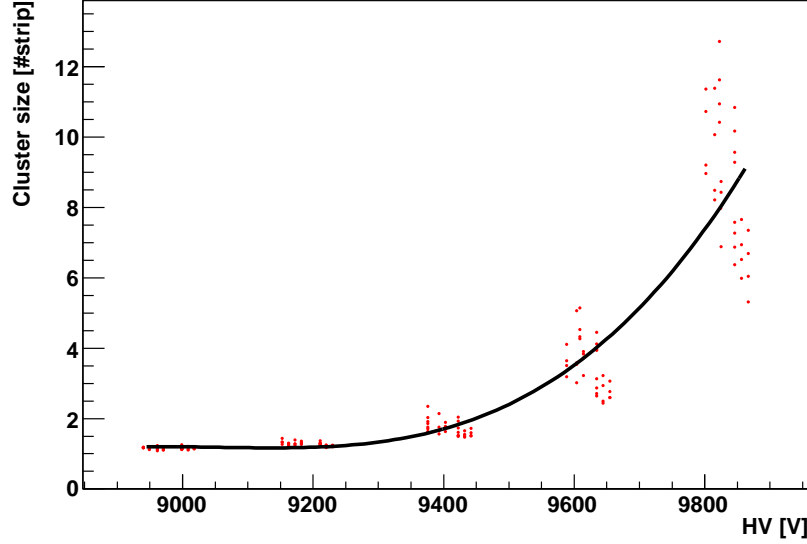
Фигура 6.9: Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(1)” - 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% *iso* – C_4H_{10} , 0.3% SF_6



Фигура 6.10: Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* – C_4H_{10} , 0.3% SF_6

6.6 Заключение

RPC работещи с изследваните газови смеси с различна концентрация на C_4H_{10} не показват разлика в работните характеристики - ефективност и



Фигура 6.11: Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% *iso* - C_4H_{10}

средна големина на кластерите. Вероятността за поява на стример за двете газови смеси, съдържащи съответно 5% и 3.5% *iso*- C_4H_{10} , е около 4% при 10 kV, което е в много добро съгласие с изискванията.

Основните изследвани характеристики се променят значително в случая на работна смес не съдържаща SF_6 . Средната големина на клъстерите е значително по-голяма при газовата смес без SF_6 . Вероятността за поява на стример надвишава 10% още при 9.6 kV.

Дължината на работното плато на камерите работещи с 0.3% SF_6 , даже и при различна концентрация на изобутан е около 500 V, докато за RPC работещи с газова смес без SF_6 то е с дължина около 350 V поради голямата вероятност за стример при по-високи напрежения.

Беше показано, че най-доброто работно напрежение е 9.6 kV, защото при него за удовлетворени всички изисквания към RPC са CMS.

Научни приноси

- Разработен е мюонен телескоп и е реализирана система за неговото управление и мониторинг.
- Разработен е софтуер за контрол и визуализация, с чиято помощ са изследвани повече от 300 камери.
- Разработен е програмен пакет за реконструиране на следите от космични мюони на мюонен телескоп. Изследвани са три групи камери, работещи с различни газови смеси и са измерени техните:
 - ефективност;
 - средна големина на кластерите;
 - вероятност за поява на стример;като функция на захранващото напрежение.
- Показано е, че ефективността за регистриране на мюони и средната големина на кластерите не се отличават при концентрация на *iso* – C_4H_{10} 3.5 % и 5 %.
- Показано е, че добавянето на 0.3% SF_6 към $C_2H_2F_4$ -базирана смес значително намалява вероятността за поява на стример като тя достига 10 % при захранващи напрежения над 10 kV.
- Показано е, че при захранващо напрежение 9.6 kV, средната големина на кластерите намалява с 1 сигнален електрод, а ефективността на намалява с 1 % при добавяне на 0.3 % SF_6 към $C_2H_2F_4$ -базирана смес.
- Определени са работните плати за трите газови смеси и е показано, че оптималния режим на работа на камерите е при захранващо напрежение 9.6 kV с газова смес съставена от 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% *iso* – C_4H_{10} , 0.3% SF_6 .
- Измерена е концентрацията на флуоридни йони в газовата смес преминала през камерите и са разгледани последствията от отделения HF върху работните характеристики на камерите.
- Установено е, че половината от получения в газовите процепи HF, остава в газовия обем на процепите.

Публикации, на които се базира дисертацията

- M. Abbrescia,... P. Petkov,... *et al.*, “Cosmic ray tests of double-gap resistive plate chambers for the CMS experiment”, Nucl. Instr. and Meth. A **550**, 2005, 116-126
- M. Abbrescia,... P. Petkov,... *et al.*, “Production and quality control of the Barrel RPC chambers of the CMS experiment”, Nuclear Physics B, **150**, 2006, 290-294
- M. Abbrescia,... P. Petkov,... *et al.* “Quality control tests for the CMS Barrel RPCs”, Nuclear Physics B, **158**, 2006, 73-77
- M. Abbrescia,... P. Petkov,... *et al.*, “HF production in CMS-Resistive Plate Chambers” ,Nuclear Physics B, **158**, 2006, 30-34
- M. Abbrescia,... P. Petkov,... *et al.*, “Investigation Of CMS Barrel Resistive Plate Chambers In Avalanche Operation Mode” , in preparation

Доклади на конференции

- T. Anguelov,... P. Petkov,... *et al.*, “CMS Barrel Resistive Plate Chambers - construction and tests”, Meetings in Physics at University of Sofia, vol.2, 2001
- T. Anguelov,... P. Petkov,... *et al.*, “CMS barrel resistive plate chambers - tests and results”, Meeting in Physics at University of Sofia, vol.3, 2003
- A. Dimitrov,... P. Petkov,... *et al.*, “Estimation of Effective Townsend Coefficient for the Standard Compact Muon Solenoid Resistive Plate Chamber Gas Mixture”,Meetings in Physics at University of Sofia, vol. 6, 2005

Благодарности

С дълбоко уважение бих искал да изкажа най-искрените си благодарности на моя научен ръководител доц. д-р Леандър Литов, за това че с голям професионализъм, търпение и всеотдайност ме води по интересния и трънлив път на научните изследвания. Благодаря му за градивните критики, ценните съвети и проявеното разбиране, а също така и за предоставените възможности да работя по актуални и важни проблеми в световно известни лаборатории като CERN и INFN.

Благодаря на Антон Димитров за помощта, разбирането и упоритостта в съвместната ни работа. Бих искал да благодаря на него и на Борислав Павлов за доброто приятелство и изпълнения с приятни моменти и дългите полезни дискусии престой в Бари. Благодаря и на инж. Константин Абаджиев за безценната му помощ по време на престоя ни в Италия.

Благодаря на групата от Института за Ядрени Изследвания и Ядрена Енергетика към БАН: ст. н. с. Владимир Генчев, ст. н. с. Георги Султанов, ст. н. с. Пламен Яйджиев, Цветомир Ангелов, Румен Траянов, Иван Атанасов, Стефан Пиперов, Божидар Панев, Петър Ванков, Николай Дърменов и Стефка Стойкова за помощта, ползотворната съвместна работа и приятната атмосфера.

Бих искал да благодаря на проф. Джузепе Ясели и групата, ръководена от него, в Националния институт за ядрени физика, Бари (Италия) и по-специално Габриела Пулиезе, Анна Колалео, Марчело Абреша, Марчело Маджи, Рафаело Трентадуе и Флавио Лоддо за топлото посрещане, приятелското отношение, интересната работа, възможността да се фокусирам върху интересните за мен проблеми, отзивчивостта, оказаната помощ, полезните разяснения и за това че ме накараха да се почувствам пълноценен член на колектива.

Благодаря на членовете на Групата по физика на елементарните части при СУ "Св. Климент Охридски" за колективния дух, отзивчивостта и приятелската атмосфера като по специално бих искал да спомена доц. д-р Румен Ценов, Милена Дюлендарова, Венелин Кожухаров, Евелина Маринова, Стоян Стойнев, Мартин Макариев, Васил Вергилов, Мариян Богомилов и Галина Ванкова.

Бих искал да благодаря на моята съпруга, Камелия Камбурова-Петкова, за това че се отнесе с разбиране към работата през нощта и дългите командировки.

Благодаря на моите родители за това, че винаги ме подкрепят и напътстват.

И не на последно място искам да благодаря на Петко Петков за полезните разяснения относно химията на някои от наблюдаваните процеси протичащи в камерите със съпротивителна плоскост.

Списък на фигурите

1.1	Парциална вероятност за разпад на Хиггс бозона на CM в зависимост от неговата маса	6
1.2	Пълната естествена ширина на Хиггс бозона в зависимост от неговата маса	6
1.3	Детекторната система CMS	12
1.4	Относителна неопределеност при определяне на напречния импулс на мюонни следи при различни напречни импулси в зависимост от псевдобързината η	13
1.5	Една четвърт от надлъжното сечение на мюонната система на CMS	15
1.6	Схема на единична клетка на дрейфова камера	15
1.7	Схема на катодна стрипова камера	17
2.1	Принципна схема на газов процеп.	20
2.2	Схематично представяне на тегловната функция на сигнален електрод участващ в система от електроди. Представени са два примера за индуцирания ток пресметнат като скалярно произведение на скоростите на движещи се заряди и тегловното поле.[27]	23
2.3	Форма на токови импулси получени на сигнален електрод при различни работни напрежения. Сигнал от лавина (a, 9.4 kV). Сигнал от стример появил се след лавина (b, 9.6 kV). Сигнал от стример появил се след лавина с по-малко закъснение (c, 10.2 kV) и сигнали от лавина и стример слети в един импулс(d, 11.4 kV)[28].	24

2.4	(а) двупроцепен дизайн с поставени между единичните процепи сигнални електроди, (б) двупроцепен дизайн със сигнални електроди поставени от външната страна, (в) многопроцепен дизайн	25
3.1	Схема на глобалния муонен тригер	35
3.2	Тригерна ефективност за муони симулирани с напречен импулс $50 < p_T < 70 \text{ GeV}$ и псевдобързина $ \eta < 0.09$ за муони с напречен импулс $p_T^{cut} = 5 \text{ GeV}$	37
3.3	Rz -разрез на системата от RPC. Физическо и логическо сегментиране на камерите.	39
3.4	Напречен разрез на муонната системата в цилиндричната част.	40
3.5	Сегментиране на RPC във втора муонна станция на цилиндричната част по η	42
3.6	Ефективност и вероятност за поява на стример получени чрез симулация и измерени експериментално за газови процепи с ширина 2 mm и 3 mm	44
3.7	Спектър на измерен и симулиран индуциран върху сигнален електрод заряд за единичен и двоен газов процеп с ширина на газовата междина 2 mm	45
3.8	Разпределение на времената на закъснение на сигналите от единичен и двоен газов процеп получени чрез симулирането на газови процепи с ширина 2 mm	45
3.9	Блок-схема на електронната верига обработваща сигналите от един сигнален електрод. Означените звена са: предусилвател (Preamplifier), фиктивен предусилвател (Dummy Preamplifier), усилвател (Gain Stage), дискриминатор с пресичане на нулевото равнище (Zero-Crossing Discriminator), моновибратор (Monostable), изходно стъпало (Driver).	47
3.10	Схема на усилвателя.	47
3.11	Входно-изходна характеристика на усилвателя.	48
3.12	Схема на дискриминиране с пресичане на нулевото равнище.	49
3.13	Принципна схема на чиповете обработващи сигналите от електродите на RPC.	50
3.14	Механична конструкция на камера със съпротивителна плоскост.	51

3.15	Пример за разположение на платките на детекторната електроника и местоположение на свързващите ги шини в RPC от типа RB2 с три двойни газови процепи.	52
3.16	Захранване на газовите процепи с високо напрежение.	53
3.17	Специфично съпротивление на всички произведени бакелитени плоскости. Бакелитените листове се приемат ако съпротивлението им е между $1 \times 10^{10} \Omega.cm$ и $6 \times 10^{10} \Omega.cm$	54
3.18	Разпределение на тока през газовите процепи при $9.5 kV$	56
4.1	Типична хроматограма на работната газова смес, получена чрез хроматограф GC Varian CP2002P. Наблюдаваните сигнали са от SF_6 , водни пари, $C_2H_2F_4$ и $iso - C_4H_{10}$ (от ляво на дясно). Сигналите около $18 s$, показващи наличието на въздух са пренебрежими.	59
4.2	Концентрация на флуоридните йони в различните проби, събрани от изходящата от RPC газова смес, при различен интензитет на потока на γ -лъчението. Захранващото напрежение е $9.4 kV$	60
4.3	Концентрация на флуоридните йони, в изходящата от RPC газова смес, в зависимост от захранващото напрежение при максимален интензитет на γ -лъчението.	61
4.4	Концентрация на флуоридните йони, в изходящата от RPC газова смес, в зависимост от тока през газовите процепи (стойности са получени след изваждане на омовата съставна). . . .	61
4.5	Сравнение на състава на газовата смес в затворена система преди (а) и след пречиствателния модул (б)	63
4.6	Повредена област от вътрешната повърхност на RPC тип RB1.	64
4.7	Структурна формула на химичното съединение меламина. . . .	64
5.1	Мюонен телескоп в лабораторията за изследване на характеристиките на RPC в Бари, Италия.	68
5.2	Мюонен телескоп в лабораторията за изследване на характеристиките на RPC в София.	69
5.3	Блок схема на обработването на данните от мюонните телескопи. . .	71

5.4	Зависимост на ефективността от захранващото напрежение, получена чрез метод на съвпаденията за трите режима на работа: включени само горните газови процепи ("Up Single Gaps"), само долните газови процепи ("Down Single Gaps") и включени всички газови процепи ("Double Gap").	72
5.5	Примерно разпределение на големината на кластерите, получено чрез метод на съвпаденията.	73
5.6	Зависимост на средната големина на кластерите от захранващото напрежение.	74
5.7	Кластер съвместим с мюонната следа.	76
5.8	Реконструирана мюонна следа като в конкретния случай в изследваната камера има съвместим със следата кластер.	77
5.9	Събитие с голяма множественост, при което не се реконструира мюонна следа.	77
5.10	Събитие, в което не се реконструира мюонна следа, поради малък брой кластери в реферните камери.	77
5.11	Разпределение на ефективностите на 16 камери (32 двойни-газовипроцепи) при $HV=9,6\text{ kV}$ получени по метод на съвпаденията (прекъсналиния на графиката) и по метода използващ реконструиране на мюонни следи (непрекъсната линия на графиката).	79
5.12	Разпределение на средната големина на кластерите за 16 камери (32 двойни газови процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$, получени по метод на съвпаденията.	80
5.13	Разпределение на средната големина на кластерите за 16 камери (32 двойни газови процепи) при $HV=9,6\text{ kV}$, получени по метода използващ реконструиране на мюонни следи.	80
6.1	Разпределение на ефективността на камерите за всяка от изследваните работни газови смеси при ефективно напрежение 9.6 kV	84
6.2	Разпределение на средната големина на кластерите на камерите за всяка от изследваните работни газови смеси при ефективно напрежение 9.6 kV	84
6.3	Вероятност за поява на стример за газова смес "(1)" - $94.7\% C_2H_2F_4$, $5\% iso - C_4H_{10}$, $0.3\% SF_6$	86

6.4	Вероятност за поява на стример за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$, 0.3% SF_6	86
6.5	Вероятност за поява на стример за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$	87
6.6	Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(1)” - 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% $iso - C_4H_{10}$, 0.3% SF_6 . . .	88
6.7	Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$, 0.3% SF_6 . .	89
6.8	Ефективността в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$	89
6.9	Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(1)” - 94.7% $C_2H_2F_4$, 5% $iso - C_4H_{10}$, 0.3% SF_6	90
6.10	Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(2)” - 96.2% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$, 0.3% SF_6	90
6.11	Средната големина на кластерите в зависимост от захранващото напрежение за газова смес “(3)” - 96.5% $C_2H_2F_4$, 3.5% $iso - C_4H_{10}$	91
1	Етап 1	108
2	Етап 2	109
3	Етап 3	110
4	Прекъсване на веригата.	110
5	Взаимодействието на метансфлуор	110

Списък на таблиците

1.1	Работни характеристики на ускорителя LHC	4
1.2	Експериментално наблюдаеми канали на разпад на H в зависимост от неговата маса m_H	7
1.3	Параметри на свръхпроводящия соленоид на CMS	14
2.1	Някои характеристики на материалите използвани за съпротивителни електроди	27
2.2	Газови компоненти за RPC с различно приложение	28
2.3	Тригерни и трекови системи базирани на RPC работещи в стримерен режим	30
2.4	TOF системи от RPC работещи в лавинен режим	31
3.1	Основни изисквания към RPC за CMS	38
3.2	Размери на камерите със съпротивителна плоскост за цилиндричната част.	41
3.3	Основни конструктивни параметри на RPC	46

Библиография

- [1] T.L.S. Group, “The Large Hadron Collider Conceptual Design”, *CERN-AC-95-05* (**1995**).
- [2] W-M Yao *et al.* 2006 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **33** 1
- [3] P. W. Higgs, Spontaneous Symmetry Breakdown Without Massless Bosons, Phys. Rev. **145** (1966), 1156.
- [4] G.W. Anderson and D.J. Castano, hep-ph/9409419, Phys. Lett. B347 (1995) 300.
- [5] The LEP Collaborations (ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL), the LEP Electroweak Working Group and the SLD Heavy Flavour Group, A combination of preliminary Electroweak measurements and constraints on the Standard Model, hep-ex/0412015; <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG>.
- [6] M. Spira, “QCD Effects in Higgs Physics”, **CERN-TH/97-68**
- [7] C. Wultz, “CMS Physics Overview”, CMS CR **2001/016**
- [8] A. Djouadi, “The Anatomy of Electro-Weak Symmetry Breaking. I: The Higgs boson in the Standard Model”, arXiv:hep-ph/0503172v2
- [9] CMS Collaboration, “The Compact Muon Solenoid Technical Proposal,” *CERN/LHCC* (**1994**). LHCC/P1.
- [10] CMS Coll., “Tracker Technical Design Report”, *CERN/LHCC* **1998-006** (1998); Addendum CERN/LHCC 2000-016 (2000).
- [11] Paolo Azzurri, “The CMS Silicon Strip Tracker”, Journal of Physics: Conference Series **41** (2006) 127134

- [12] CMS Coll., “ECAL Technical Design Report”, CERN/LHCC **1997-033** (1997).
- [13] CMS Coll., “HCAL Technical Design Report”, CERN/LHCC **1997-031** (1997).
- [14] CMS Coll., “The Magnet Project, Technical Design Report”, CERN/LHCC **1997-10** (1997)
- [15] CMS Coll., The Muon Project Technical Design Report, CERN/LHCC **1997-32** (1997). CMS TDR 3.
- [16] S. Lacaprara, “The CMS Muon System: Physics Performance,” CMS CR **2003/025**
- [17] CMS Coll., “The TriDAS Project Technical Design Report, Volume 1: The Trigger Systems,” CERN/LHCC **2000-38** (2000). CMS TDR 6.1.
- [18] CMS Coll., “The TriDAS Project Technical Design Report, Volume 2: Data Acquisition and High-Level Trigger” CERN/LHCC **2002-26** (2002). CMS TDR 6.2.
- [19] R. Santonico and R. Cardarelli Nucl. Instr. and Meth. **187** (1981), 377
- [20] R. Cardarelli, V. Makeev and R. Santonico, “Avalanche and streamer mode operation of resistive plate chambers”, Nucl. Instr. Meth. A **382** (1996), 470.
- [21] R. Santonico and R. Cardarelli., “Progress in resistive plate counters. Nucl. Instr. and Meth.”, A **263** (1988)
- [22] H. Genz, “Single electron detection in proportional gas counters”, Nucl. Instr. and Meth. **112** (1973) 83
- [23] M. Abbrescia *et al.*, “The simulation of resistive plate chambers in avalanche mode: charge spectra and efficiency”, Nucl. Instr. Meth. A **431** (1999), 413
- [24] Werner Riegler, Christian Lippmann and Rob Veenhof, “Detector physics and simulation of resistive plate chambers Nucl. Instr. Meth. A **500** (2003), 144
- [25] F. Sauli. Yellow Report. CERN 77-09. 1977.

- [26] Б.А.Князев, “Низкотемпературная плазма и газовый разряд”, Новосибирск 2000
- [27] C. Lippmann, PhD thesis, Frankfurt am Main, 2003
- [28] R. Cardarelli, V. Makeevb, R. Santonicoa “Avalanche and streamer mode operation of resistive plate chambers”, Nucl. Instr. and Meth. A **382** (1996), 470.
- [29] Yu. N. Pestov, “Review on counters with localized discharge”, Nucl. Instr. Meth. A **494** (2002), 477.
- [30] M. Abbrescia *et al.*, “Properties of $C_2H_2F_4$ based gas mixture for avalanche mode operation of Resistive Plate Chambers”, CMS NOTE 1997/004
- [31] E. Cerron Zeballos *et al.*, “A new type of resistive plate chamber: The multigap RPC”, Nucl. Instr. and Meth. A **374** (1996), 132.
- [32] P. Fonte, A. Smirnitski and M.C.S. Williams, “A new high-resolution TOF technology”, Nucl. Instr. and Meth. A **443** (2000), 201.
- [33] M. Abbrescia *et al.*, “HF production in CMS-Resistive Plate Chambers”, (2006) Nucl. Instr. Meth. B(Proc.Suppl.) **158**, (2006), 30-34
- [34] G. Aielli *et al.*, “Fluoride production in RPCs operated with F-compound gases”, Nucl. Instr. Meth. B(Proc.Suppl.) **158** (2006), 143-14
- [35] Ch. Lu, “RPC Experience: Belle, BaBar and BESIII”, 2006, SLAC-PUB-11744
- [36] S. Afanasev, *et al.*, “The NA49 large acceptance hadron detector” ,Nucl. Instr. and Meth. A **430** (1999), 210.
- [37] C. Gustavino *et al.*, “A glass resistive plate chamber for large experiments”, Nucl. Instr. and Meth. A **457** (2001), 558.
- [38] A. Ferretti, “A low-resistivity RPC for the trigger of the ALICE dimuon arm”, ALICE-PUB-2001-53
- [39] S. Dusini *et al.*, “Design and prototype tests of the RPC system for the OPERA spectrometers”, Nucl. Instr. and Meth. A **508** (2003), 175

- [40] P. Camarri *et al.*, “Streamer suppression with SF_6 in RPCs operated in avalanche mode”, Nucl. Instr. and Meth. A **414** (1998), 317
- [41] H. Sakulin and A. Taurok, “The L1 Global Muon Trigger for the CMS experiment”, CMS-CR-2003-04 (2003).
- [42] M. Andlinger *et al.*, “Pattern Comparator Trigger (PACT) for the Muon System of the CMS Experiment”, CERN-PPE / 94-227 (1994)
- [43] A. Kalinowski, J. Krolikowski, P. Zych, “Muon Trigger Algorithms Based on 6 RPC Planes” CMS NOTE 2001/045
- [44] G. Iaselli, F. Loddo, A. Ranieri, “Study of Detailed Geometry of Barrel RPC Strips”, CMS IN 2000/044
- [45] G. Bruno, “Simulation study of the RPC muon trigger for CMS”, CMS IN 1998/004
- [46] M. Abbrescia *et al.*, Test beam results on Resistive Plate Chambers for the CMS experiment, CMS NOTE **1997/062**.
- [47] M. Abbrescia *et al.*, “Performance of Resistive Plate Chambers for the muon detection at CMS”, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 78 (1999) 90-95
- [48] M. Abbrescia *et al.*, “Effect of the linseed oil surface treatment on the performance of resistive plate chambers” ,Nucl. Instr. and Meth. A **394** (1997) 13-20.
- [49] P. Bernardini *et al.*, “Precise measurements of drift velocities in helium gas mixtures”, Nucl. Instr. and Meth. A **355** (1995), 428.
- [50] M. Abbrescia *et al.*, “Performance of a Resistive Plate Chamber operated in avalanche mode under ^{137}Cs irradiation”, Nucl. Instr. and Meth. A **392** (1997) 155-160.
- [51] M. Abbrescia *et al.*, “An environmental safe gas mixture for resistive plate chambers operated at low pressure”, Nucl. Instr. and Meth. A **417** (1998) 16
- [52] M. Abbrescia *et al.*, “Properties of $C_2H_2F_4$ -based gas mixture for avalanche mode operation of resistive plate chambers”, Nucl. Instr. and Meth. A **398** (1997), 173

- [53] V. Ammosov *et al.*, "STUDY OF SF_6 ADDITION INFLUENCE ON NARROW GAP RPC PERFORMANCE", IHEP 99-53
- [54] M. Abbrescia *et al.*, "Resistive Plate Chambers in avalanche mode: a comparison between model predictions and experimental results", Nucl. Instr. and Meth. A **409**, (1998), 1
- [55] M. Abbrescia *et al.*, "Recent results and developments on double-gap RPCs for CMS", Nucl. Instr. and Meth. A **409** (1998), 43
- [56] M. Abbrescia **et al.**, "Local and global performance of double-gap resistive plate chambers operated in avalanche mode", Nucl. Instr. and Meth. A **434** (1999) 344-253
- [57] M. Abbrescia **et al.**, "New developments on front-end electronics for the CMS Resistive Plate Chambers". Nucl. Instr. and Meth. A **456** (2000), 143
- [58] M.L. Simpson *et al.*, "An Integrated, CMOS, Constant-Fraction Timing Discriminator for Multichannel Detector Systems", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-42 (4) (1995), 762.
- [59] http://www.national.com/appinfo/lvds/files/National_LVDS_Owners_Manual_4th_Edition_2008.pdf
- [60] F. Hahn, Closed Loop Gas System: Operating Instruction
- [61] ORION Combination Fluoride Electrodes. Instruction manual.
- [62] D. A. Skoog, Analytical Chemistry, Saunders College Publishing (2000)
- [63] R. Guida, "Neutron and gamma background effects on the RPC detectors for the CMS experiment", PhD Thesis, Universita di Pavia, Dipartiments di Fisica Nucleare e Teorica (Pavia, 2002).
- [64] Галин Петров, "Органична Химия", Университетско издателство "Св. Климент Охридски"София 1996 трето издание
- [65] M. Abbrescia **et al.**, "Production and quality control of the Barrel RPC chambers of the CMS experiment", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **150** (2006), 290
- [66] M. Abbrescia **et al.**, "Quality control tests for the CMS Barrel RPCs", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **158** (2006), 73

- [67] M. Abbrescia *et al.*, “Resistive plate chambers performances at cosmic rays fluxes”. (1995) **NIM A** **359**, 603
- [68] S. H. Ahn *et al.* “Effects of SF_6 on the Avalanche Mode Operation of a Real-Sized Double-Gap Resistive Plate Chamber for the Compact Muon Solenoid Experiment”. (2005) **Journal of the Korean Physical Society**, Vol. **46**, 1090
- [69] G. Aielli *et al.*, “New Results on ATLAS RPC’s Aging at CERN’s GIF”. (2006) **IIIE Transactions on Nuclear Science**, Vol. **53**, No. **2**, 567
- [70] M. Abbrescia, . . . P. Petkov, . . . *et al.*, “Investigation Of CMS Barrel Resistive Plate Chambers In Avalanche Operation Mode”, in preparation
- [71] M. Abbrescia *et al.*, “Cosmic ray tests of double-gap resistive plate chambers for the CMS experiment”. (2005) **NIM A** **550**, 116

Приложение 1

Халогениране на алкани

Алканите са въглеводороди, чиито молекули са изградени от химичните елементи въглерод и водород. В молекулите си съдържат само прости връзки, поради което те са най-богатите на водород въглеводороди. Ето защо те се наричат още наситени въглеводороди.

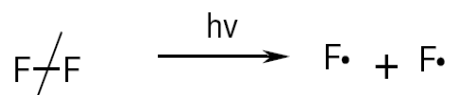
Въглеводородите от даден хомоложен ред имат сходен строеж на молекулите си, поради което проявяват сходство и в химичните си свойства.

Названието парафини за наситените въглеводороди е свързано с тяхната инертност при обикновени условия спрямо най-често използваните реагенти - киселини и основи. Сега е известно, че при подходящи условия парафините участват в разнообразни реакции с различни вещества.

Поради наличието на практически неполярни връзки в молекулите си, наситените въглеводороди са склонни към заместителни реакции, свързани с разкъсване на връзките между въглерода и водорода (C-H връзката) и в крекинг процеси, свързани с разкъсването на въглерод-въглеродни връзки (C-C). Тези реакции протичат преимуществено по свободно-радикалов механизъм.

Халогениране

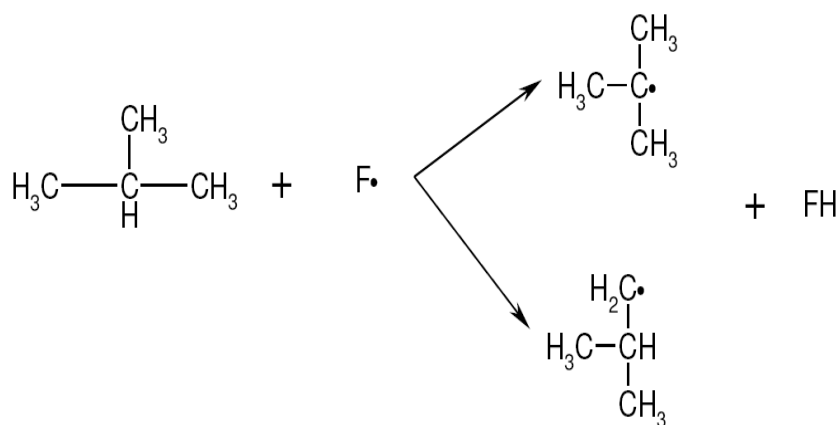
Взаимодействието е типично за алкановите въглеводороди и протича като заместителна реакция по верижно-радикалов механизъм в три етапа, на първия етап който се нарича инициращ етап се осъществява хомолитично разкъсване на молекулата на халогенният атом, което става най-често при облъчване със светлина:



Фигура 1: Етап 1

На вторият етап от реакцията протича взаимодействие между получените хлорен атом и съответният алкан при което се отцепва един H атом от молекулата на алкана, образува се халогеноводород (ХН) и се получава алкилов радикал (в случая е изобутилов радикал). При алкани с разклонена

въглеродна верига е възможно да се получат първични, вторични и третични алкилови радикали. Стабилността на тези частици нараства от първичен към вторичен и третичен алкилов радикал. Което означава, че при халогениране на изобутан ще се получат първичен и третичен изобутилови радикала, като третичният е по стабилен.

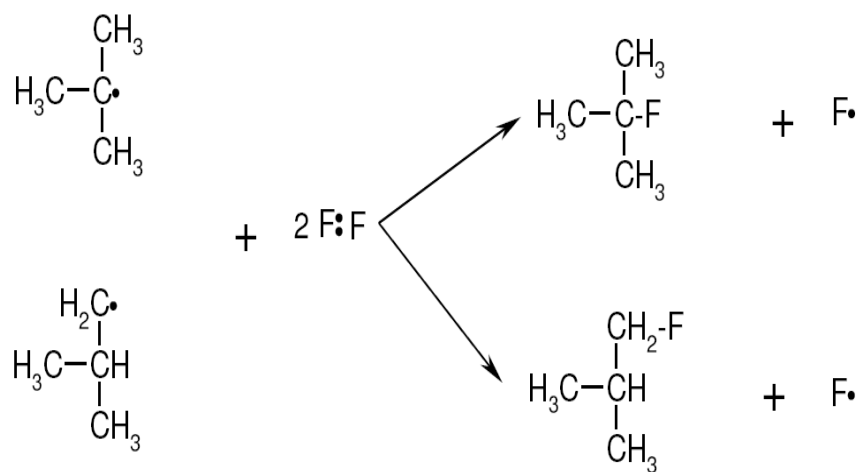


Фигура 2: Етап 2

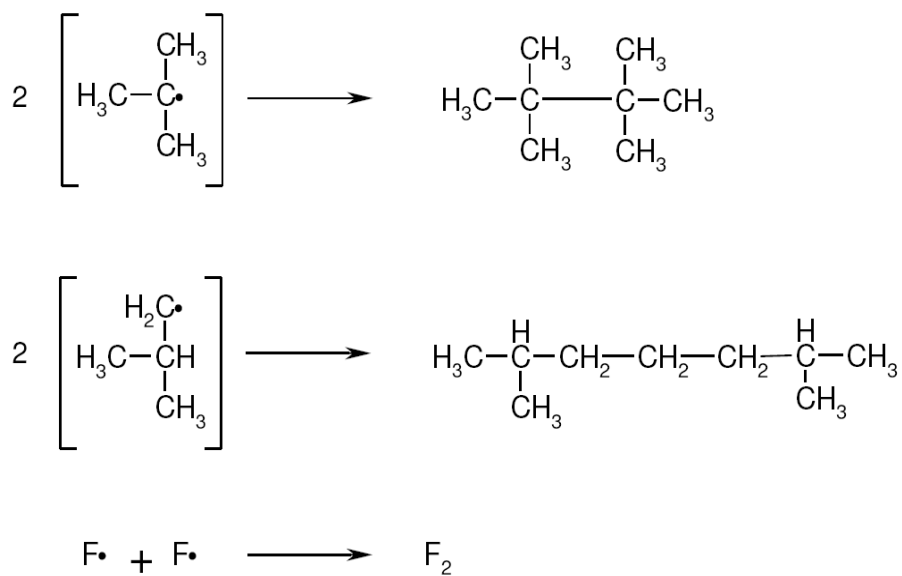
В третият етап полученият изобутилов радикал взаимодейства с нова молекула халоген, при което се получава продуктът на халогениране (съответният халогеноалкан) и нов халогенен атом. Полученият халогенен атом в етап 3 взаимодейства с нова молекула въглеродород по етап 2 и т.н. до изчерпване на реагентите.

При среща на две активни частици в резултат на която се получава неактивна частица, реакционната верига се прекъсва фиг. 4.

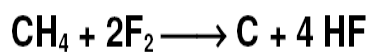
По принцип под халогениране на алкани се разбира взаимодействие със хлор или бром, тъй като флуорът е много активен и деструктира алканите, а йодът - обратно поради малката си активност практически не взаимодейства с тях. С алкани при обикновени условия флуорът реагира с взрив (фиг. 5), затова флуорирането може да се осъществи със смес на флуор с инертен газ или с по-малко реакционноспособни флуориращи реагенти.



Фигура 3: Етап 3



Фигура 4: Прекъсване на веригата.



Фигура 5: Взаимодействие на метан с флуор