

---

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

---

Борислав Атанасов Павлов

**Разработване и изследване 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*  
*Научен консултант: ст.н.с. д-р Владимир Генчев*  
София, 2007 г.

# Съдържание

<b>1 Програма за физични изследвания на експеримента CMS</b>	<b>1</b>
1.1 Основни цели на експеримента CMS . . . . .	1
1.2 Стандартен модел на элементарните частици . . . . .	2
1.3 Търсене на Хиггс бозона . . . . .	4
1.4 Суперсиметрия . . . . .	6
1.5 Търсене на суперсиметрия . . . . .	9
1.6 Търсене на нови массивни векторни бозони . . . . .	12
1.7 Търсена на допълнителни измерения . . . . .	12
1.8 Изследване на Стандартния модел . . . . .	13
1.9 Физика на тежките иони . . . . .	13
1.10 Заключение . . . . .	14
<b>2 Експеримента CMS</b>	<b>15</b>
2.1 Ускорителя LHC в CERN . . . . .	15
2.2 Системи на експеримента CMS . . . . .	16
2.3 Магнитна система . . . . .	17
2.4 Централен треков детектор . . . . .	17
2.5 Електромагнитен калориметър . . . . .	17
2.6 Адронен калориметър . . . . .	18
2.7 Преден калориметър . . . . .	18
2.8 Мюонна система . . . . .	19
2.9 Тригер на експеримента CMS . . . . .	23
2.10 Заключение . . . . .	27
<b>3 Камери със съпротивителна плоскост</b>	<b>28</b>
3.1 Принцип на действие на RPC . . . . .	28
3.2 Видове камери със съпротивителна плоскост . . . . .	36
3.3 Заключение . . . . .	46
<b>4 RPC камери на експеримента CMS</b>	<b>47</b>
4.1 Електроника . . . . .	51
4.2 Детекторна електроника . . . . .	51
4.3 Процедура за конструиране и контрол на качеството на камерите със съпротивителна плоскост за централната част на експеримента CMS . . . . .	54
<b>5 Изследване на стареенето на RPC камери на комплекса GIF</b>	<b>69</b>
5.1 Източници на фоново лъчение в мюонните станции . . . . .	70
5.2 Възможни механизми на стареене . . . . .	71
5.3 Експериментален комплекс GIF . . . . .	72
5.4 Радиоактивен източник . . . . .	75
5.5 Система за промяна на потока . . . . .	76
5.6 Сноп . . . . .	77

5.7 Резултати от изследванията на GIF . . . . .	79
5.8 Изводи . . . . .	83
5.9 Заключение . . . . .	86
<b>6 Мюонни телескопи за изследване на RPC камери</b>	<b>87</b>
6.1 Космични лъчи на земната повърхност . . . . .	88
6.2 Мюонен телескоп в София . . . . .	89
6.3 Мюонен телескоп в Бари . . . . .	94
6.4 Мюонен телескоп в Павия . . . . .	98
6.5 Експериментална установка в тунела на ISR . . . . .	98
6.6 Заключение . . . . .	100
<b>7 Изследване на характеристиките на камерите</b>	<b>101</b>
7.1 Характеристики на камерите . . . . .	101
7.2 Ток на камерата . . . . .	103
7.3 Ефективност по метода на съвпаденията . . . . .	104
7.4 Шум . . . . .	109
7.5 Среден размер на клъстерите . . . . .	111
7.6 Индуциран кръстосан паразитен сигнал . . . . .	111
7.7 Заключение . . . . .	117
<b>8 Изследване на характеристиките на камерите с реконструирани мюонни следи</b>	<b>118</b>
8.1 Реконструиране на мюонни следи . . . . .	118
8.2 Разпознаване на образ . . . . .	118
8.3 Анализ и резултати . . . . .	124
8.4 Глобални характеристики на камерите . . . . .	124
8.5 Локални характеристики на камерите . . . . .	125
8.6 Заключение . . . . .	131
<b>9 Научни приноси</b>	<b>132</b>
<b>10 Благодарности</b>	<b>135</b>

## **Абстракт**

Настоящата дисертация представя разработването и изследването на характеристиките на камерите със съпротивителна плоскост на експеримента CMS.

Отбелязани са основните пунктове от физичната програма на експеримента CMS, като са представени различни сценарии за търсене на Хиггс бозона, възможностите за наблюдаване на суперсиметрични частици, допълнителни измерения на пространство-времето и мини черни дупки. Дискутиирани са предимствата на CMS при изследване на взаимодействие на тежки йони и b-физика.

Представен е накратко детекторът CMS, като е акцентирано върху описаните на мюонната му система. Описано е принципното устройство на тригерната система, като са представени повече подробности за начина на формиране на мюонния тригер.

Описан е принципът на действие на камерите със съпротивителна плоскост, като са дадени примери за различни типове и приложения на камерите. Описани са специфичните особености на камерите със съпротивителна плоскост за централната част на експеримента CMS, както и методиката за конструирането им.

Представени са изградените мюонни телескопи, използвани за изследван на камерите, както и получените от тях резултати.

Представени са резултатите от изследванията проведени на комплекса GIF за стареене на камерите със съпротивителна плоскост в следствие на облъчване с ионизиращо лъчение.

Изложени са разработените методите за изследване на характеристиките на камерите и реконструкция на мюонни следи. Представени са резултатите получени с помощта на тези методи. Резултатите касаят характеристиките на камерите, като ефективност, шум и размера на кълстерите. Експерименталните данни са обработени по два различни метода - с и без използване на реконструирани мюонни следи.

# 1 Програма за физични изследвания на експеримента CMS

Експериментът CMS е оптимизиран за търсене на Хиггс бозона от стандартния модел на силните и електрослабите взаимодействия. На CMS е възможно също така да се регистрират и суперсиметрични частици, както и други нови физични феномени. Експериментът може да изследва и екзотични обекти, като например мини черни дупки, ако такива се раждат при енергиите достъпни на ускорителя LHC. Експериментът CMS също така ще покрие важни аспекти от физиката на В-мезоните и физиката на тежките йони.

В настоящата глава е дадено кратко описание на стандартния модел и неговото суперсиметрично разширение. Дискутиирани са възможните канали за детектиране на Хиггс бозона и суперсиметрични частици.

## 1.1 Основни цели на експеримента CMS

Въпреки, че Стандартният модел на електрослабите и силните взаимодействия (СМ) е проверен експериментално и съответно потвърден с изключителна точност, той се разглежда като ефективна теория, валидна до някаква енергетична скала от порядъка на  $TeV$ . В рамките на този модел се предсказва съществуването на една частица, наречена Хиггс бозон, играеща основна роля в механизма осигуряващ маси на фундаменталните частици (лептони и кварки) и преносителите на слабите взаимодействия, която все още не е наблюдавана експериментално. СМ не дава отговор на ред фундаментални въпроси като:

- какви са значенията на константите на взаимодействие
- каква е причината за спонтанното нарушение на електрослабата симетрия
- така наречения проблем на финна настройка, включващ в себе си проблемите с йерархия на масите, нарушилието на CP-инвариантността в силните взаимодействия, проблема със значението на космологичната константа и т.н.
- в рамките на модела не е възможно нетривиално обединение на електрослабите и силните взаимодействия с гравитационното.

Всичко това води до опити за създаване на нови модели, решаващи тези проблеми и едновременно с това имащи като своя нискоенергетична граница СМ. Опитите да се построят модели обединяващи силните и електрослабите взаимодействия (теории на великото обединение) не са довели до успех, но е разбрано, че без да се отчитат свойствата на пространство-времето или с други думи гравитацията, не е възможно да се построят непротиворечаващи на експерименталните резултати разширения на СМ. Нетривиалното обединение на гравитационното взаимодействие с останалите три взаимодействия налага въвеждането на нова по-силна

симетрия, третираща по един и същи начин бозони и фермиони - суперсиметрия. Минималното суперсиметрично разширение на СМ (MCCM<sup>1</sup>) предсказва съществуването на ред нови частици, суперсиметрични партньори на фундаменталните частици и преносители от СМ, чиито маси<sup>2</sup> трябва да са по-малки от 1  $TeV$ . В процеса на разработка на суперсиметричните теории е възродена и идеята, че в действителност пространство-времето може да има повече от 4 измерения. В частност, в най-активно разработваните през последните 10 години суперструнни модели, се предполага, че пространство времето е десетмерно. Всичко това води до появата на ред модели, предполагащи, със или без суперсиметрия, съществуването на допълнителни измерения, в рамките на които се предсказват ред следствия достъпни за експериментална проверка.

Адронните ускорители на насрещни спарови снопове са изключително подходящи за проверката на предсказанията, както на СМ, така и на моделите претенденти за негови разширения. Този тип машини позволяват достигането на енергии от порядъка на  $TeV$  и едновременно с това на висока светимост. Това осигурява раждането и съответно наблюдението на частици с маси в  $TeV$ -ов диапазон, както и наблюдението на изключително редки процеси.

## 1.2 Стандартен модел на елементарните частици

СМ [1] на елементарните частици е един от най-успешните модели в съвременната физика. Той описва много добре взаимодействието на съставните части на материята при достъпните на съвременните експерименти енергии, около 200  $GeV$  на ускорителя LEP и около 2  $TeV$  на Теватрона и разстояние  $10^{-18} m$ . Стандартният модел е квантовополева теория, която описва взаимодействията между точкоподобни фермиони със спин  $1/2$ , които се пренасят от калибровъчни бозони със спин 1.

Фундаментални фермиони са лептоните и кварките. Левите собствени състояния са дублети относно групата  $SU(2)_L$ , докато десните са синглети. Съществуват три поколения фермиони, които се различават едно от друго по масите. Класификация на фермионите е приведена в таблицата 1. Не е ясно каква е причината за съществуването на три различни поколения и защо е нарушена ароматната симетрия.

Съществуват три лептона със електрически заряд -1, това са електрона ( $e$ ), мюона ( $\mu$ ) и таона ( $\tau$ ) и три електрически неутрални лептона - електронно ( $\nu_e$ ), мюонно ( $\nu_\mu$ ) и тауонно неутрино ( $\nu_\tau$ ). Има три кварка с електрически заряд  $2/3$  горен (u), чаровен (c), върховен (t) кварк и три със заряд  $-1/3$  - долен (d), страничен (s) и красив (b). Кварките са триплет относно групата  $SU(3)_C$  и поради тази

---

<sup>1</sup>MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model)

<sup>2</sup>тук и по-надолу в текста за удобство ще представяме величините в система, където  $c = \hbar = 1$

причина имат още един заряд - цветен заряд.

Кварките не се срещат в свободно състояние в природата, но образуват безцветни частици. Те са съставни части на широк клас частици, наречени адрони (мезони - съставени от кварк-анти кварк или бариони - съставени от 3 кварка). Наименованията лептони и адрони идват от това в какви взаимодействия участват частиците - съответно слаби (от гръцки  $\lambda\epsilon\pi\tau\zeta$ ) и силни (от гръцки  $\alpha\delta\rho\zeta$ ).

Квантовата хромодинамика (КХД) [2] описва силното взаимодействие, като калибровъчна теория на групата  $SU(3)_C$ . Електрослабите взаимодействия се описват от модел на Глешоу-Вайнберг-Салам [3], като калибровъчна теория на групата  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Между трите поколения кварки има смесване, което се параметризира с матрицата на Кабибо-Кобаяши-Масакава (ККМ).

Поколения:	1	2	3	електрически заряд
Кварки:	u d	c s	t b	$\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$
Лептони:	e $\nu_e$	$\mu$ $\nu_\mu$	$\tau$ $\nu_\tau$	-1 0

Таблица 1: Фермионни поколения

Взаимодействието на частиците може напълно да се опише от локалните симетрии на Лагранжиана. СМ е калибровъчна теория, основаваща се на групата  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ , която описва силните, слабите и електромагнитните взаимодействия, чрез обмен на съответните бозонни калибровъчни полета: 8 безмасови глуона<sup>3</sup> (за силните), 1 безмасов фотон (за електромагнитните) и 3 масивни  $W^\pm, Z^0$  бозона (за слабите). Самите глуони носят цветни заряди и следователно взаимодействват помежду си. Поради тази причина константата на силното взаимодействие е малка за големи предадени импулси, но е голяма за малки предадени импулси, което води до удържане<sup>4</sup> на кварките в безцветни обекти - адрони. При опит да се "освободи" кваркът произвежда адронна струя, чрез раждането на кварк-антиваркови двойки и глуони.

Калибровъчната симетрия е спонтанно нарушена от електрослабата група до електромагнитната подгрупа:

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{\text{Спонтанно нарушение на симетрията}} SU(3)_C \times U(1)_{QED}$$

Спонтанното нарушение на симетрията (механизъм на Хиггс) генерира маси на  $W^\pm$  и  $Z^0$  калибровъчните бозони и също предсказва съществуването на

<sup>3</sup>от англ. glue - лепило, gluons - глуони

<sup>4</sup>от англ. confinement - удържане

нова скаларна частица - Хиггс бозон [4]. Лептоните и кварките също получават маси благодарение на Юкавско взаимодействие с Хиггсовото поле.

Досега експерименталното търсене на Хиггс бозона е довело до добра граница за неговата маса, отговаряща на енергиите, достъпни на ускорителите LEP и Теватрон [5]:

$$M_H > 114,4 \text{ GeV} \quad (95\% \text{ C.L.}) . \quad (1)$$

### 1.2.1 Параметри на стандартния модел

Успехът на стандартния модел на силните, слабите и електромагнитните взаимодействия води до повишено внимание върху неговите ограничения. В неговата най-опростена версия, без отчитане на масите на неутрина, модела има 18 параметъра, а именно:

- три константи на взаимодействието на калибровъчната група  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ,
- три лептонни и шест кваркови маси,
- четири параметъра (три ъгъла и една фаза), които описват смесването на кварките, т.е. матрицата на ККМ.
- два параметъра от Хиггсовия сектор

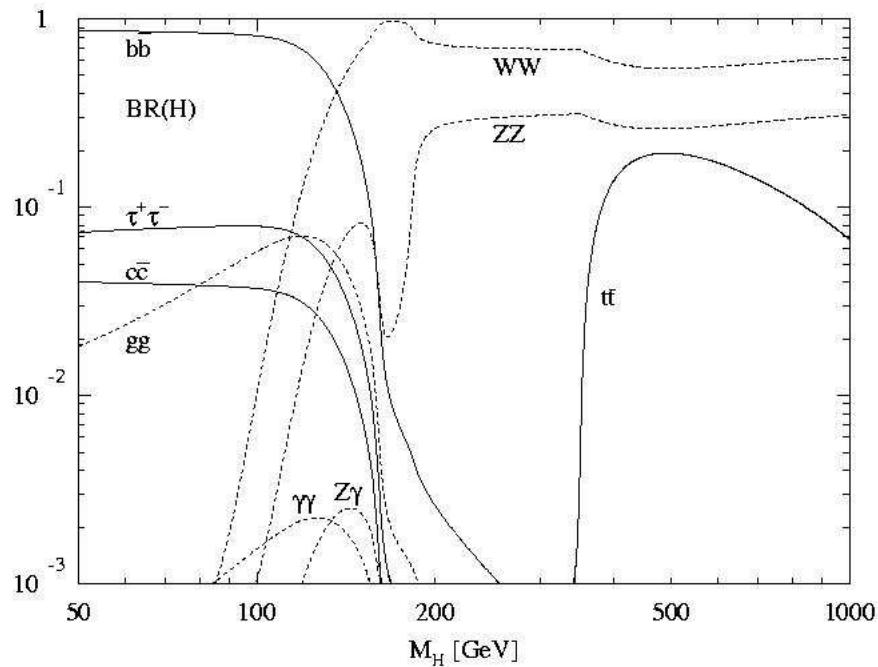
Стандартният модел и неговата част, основаваща се на калибровъчни взаимодействия е изследвана, но засега няма преки указания, които да подкрепят или да отхвърлят механизма на Хиггс за нарушение на електрослабата симетрия. Всички маси са привързани към скалата на Хиггсовия сектор. Въпреки, че модела не дава предсказание за масата на Хиггс, могат да се изведат ограничения от изчисления в рамките на модела, изисквайки взаимодействието на Хиггс да е крайно и положително до никаква енергетична скала. Такива изчисления са направени за двупримково ниво за горната и долната граница на масата на Хиггс бозона. Използвайки експериментални резултати за параметрите на стандартния модел и ако масата на Хиггс е в интервала от 160 до 170 GeV [6], то стандартният модел е пертурбативен и се държи добре до планковата скала  $\sim 10^{19} \text{ GeV}$ . С нарастване на масата, константата на самодействие и константата на взаимодействие с W и Z бозоните нараства. Тази особеност води до много важно следствие - или масата на Хиггс бозона е под 800 GeV или динамиката на WW и ZZ взаимодействията при енергии от порядъка на 1 TeV ще покаже нова структура. Това именно е основанието да се очаква "нова" физика при енергиите достъпни на ускорителя LHC.

### 1.3 Търсене на Хиггс бозона

В рамките на СМ ненулеви маси на частиците се осигуряват, чрез механизъм на спонтанно нарушение на симетрията [4]. В резултат се предсказва съществуването на нова частица Хиггс-бозон (H). Експерименталното наблюдение на тази

частица се разглежда като изключително важна задача, която може окончателно да потвърди СМ или да го отхвърли.

Ускорителят LHC в CERN предлага възможност за директно търсене на Хиггс бозона в пълния интервал от възможни маси [7]. В СМ и в МССМ, масата на Хиггс бозона  $m_H$  се явява свободен параметър, ограничен отдолу ( $m_H > 114,4 \text{ GeV}$ ) от измервания на ускорителя LEP [8]. Радиационните корекции към експериментално наблюдаваните електрослаби величини в стандартния модел не са много чувствителни към масата на Хиггс - те зависят от логаритъм от масата му. Апроксимацията към електрослабите данни дава "предпочтение" към лек Хиггс бозон с маса  $m_H = 114^{+69}_{-45} \text{ GeV}$  и 95% CL, горна граница от  $260 \text{ GeV}$  [9].



Фигура 1: Парциална вероятност за разпад на Хиггс бозона в зависимост от евентуалната му маса.

Експериментът CMS е оптимизиран за детектиране на тази частица. Парциалните вероятности за разпад на Хиггс са функция на масите на продуктите на разпад и са показани на фиг. 1. При различни маси на Хиггс, доминират едни или други моди на разпад. Тъй като масата му е неизвестна, експериментът CMS е оптимизиран за търсене на Хиггс по всички възможни канали на разпад. За успешното детектиране на Хиггс бозона е нужно, също така да се отчетат и съответните фонове. Ще се спрем накратко на каналите, които дават възможност за детектиране на Хиггс бозона:

- **Маса на Хиггс бозона от 114 до  $130\text{ GeV}$ .** В интервала около тази стойност, преобладаващата мода на разпад на Хиггс е адронна. Детектирането на Хиггс по тази мода на разпад е трудно, предвид големия КХД фон и относително недобрата разделителна способност за масите, определени чрез измерване енергията на адронни струи. Поради тази причина при търсенето на Хиггс ще се използват изолирани лептона и фотони в крайно състояние, въпреки по-малката вероятност Хиггс да се разпадне по лептонна или фотонна мода. Ширината на Хиггс бозона при маса в интервала  $114\text{ GeV} < m_H < 2m_Z$  е само няколко  $MeV$ -а и наблюдаваната ширина на евентуалния сигнал, ще бъде доминирана от разделителната способност на детекторната система. При маса на Хиггс в интервала от 114 до  $130\text{ GeV}$ , двуфотонният разпад е един от основните канали, които биха довели до статистически значим сигнал. Централно ексклузивно раждане на Хиггс може да предостави възможност за наблюдение на  $H \rightarrow b\bar{b}$  мода на разпад.
- **Маса на Хиггс бозона над  $130\text{ GeV}$  (но около  $130\text{ GeV}$ ).** В този случай става възможен разпада на Хиггс на два  $Z$  бозона. Ако масата е под прага за раждане на  $ZZ$ , единият бозон е виртуален ( $ZZ'$ ).
- **Маса на Хиггс в интервала от  $2m_Z$  до  $600\text{ GeV}$ .** При  $2m_Z < m_H < 600\text{ GeV}$ , разпадът на Хиггс на  $ZZ$  с последващ разпад на  $Z$  бозоните до 4 лептона е най-удобната за детектиране мода на разпад.
- **Маса на Хиггс в интервала от  $600\text{ GeV}$  до  $1\text{ TeV}$ .** При  $600 < m_H < 1000\text{ GeV}$ , сечението намалява, така, че трябва да се използва най-вероятната мода на разпад, детектирайки струи или  $E_T^{miss}$  (недостигаша напречна енергия) от  $W$  или  $Z$  разпади. Доминиращият механизъм за раждане на Хиггс при маси до  $700\text{ GeV}$  е глюон-глюонен синтез, посредством  $t$ -кваркова примка. Механизма на  $WW$  и  $ZZ$  синтез е важен за раждането на Хиггс бозон с голяма маса. В този случай кварките, изльчващи  $W$  или  $Z$ , ще имат напречен импулс от порядъка на масите на  $W$  и  $Z$ . Детектирането на получените високоенергетични струи в предните области ( $2 < |\eta| < 5$ ), може да се използва за отбеляване на реакцията, подобрявайки по този начин съотношението между сигнала и фона и разширявайки интервала от маси, при които Хиггс бозона може да бъде открит. Според най-новите проучвания, механизъмът на синтез също е подходящ за детектиране на Хиггс бозон с междинна маса, чрез канали като  $qq \rightarrow qqH$ , последвани от  $H \rightarrow \tau\tau$ .

## 1.4 Суперсиметрия

Систематично въведение в суперсиметрията може да се намери например в [10] [11].

Според мнението на повечето специалисти, СМ на силните и електрослабите взаимодействия, макар и да описва с голяма прецизност експерименталните данни, не е окончателна теория, а е “нискоенергетично” приближение на някаква

Супермултиплети	Бозонни полета	Фермионни партньори	$SU(3)_C$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
глуон/глуино калибр. бозон/гейджино	$g$	$\tilde{g}$	8	1	0
	$W^\pm, W^0$	$\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$	1	3	0
	B	$\tilde{B}$	1	1	0
слептон / лептон	$(\tilde{\nu}, \tilde{e}^-)_L$ $\tilde{e}_R^-$	$(\nu, e^-)_L$ $e_R^-$	1 1	2 1	-1 2
скварт / кварк	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$ $\tilde{u}_R$ $\tilde{d}_R$	$(u_L, d_L)$ $u_R$ $d_R$	3 3 3	2 1 1	1/3 -4/3 2/3
	$(H_u^+, H_u^0)$ $(H_d^0, H_d^-)$	$(\tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0)$ $(\tilde{H}_d^0, \tilde{H}_d^-)$	1 1	2 2	1 -1

Таблица 2: Представени са полетата на МССМ и техните  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  квантови числа [11]. Показано е само едно поколение кварки и лептони.

по-обща теория. Суперсиметрията е едно от най-добре обоснованите разширения на СМ. Поради това търсенето на суперсиметрични частици при енергии около  $1 \text{ TeV}$  е една от главните цели на експериментите на ускорителя LHC. Суперсиметрията е разширение на групата на Пуанкаре водещо до симетрия между бозони и фермиони и позволяваща нетривиално обединение на вътрешните с пространствените симетрии. В МССМ всеки кирален фермион  $f_{L,R}$  има скаларен суперсиметричен партньор (сфермион)  $\tilde{f}_{L,R}$  и всеки калибровъчен безмасов бозон със спиралност  $\pm 1$  има безмасов суперсиметричен партньор, наречен гейджино със спиралност  $\pm 1/2$ . В тази теория съществуват и два Хиггс дублета и асоциираните с тях хиггсина. Съответните полета и техните квантови числа са дадени в табл. 2.

Суперсиметрията 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 примковите поправки към масата на Хиггс бозона 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 суперсиметрията, корекциите към масата на Хиггс бозона и масите на другите фермиони стават пропорционални на масовата скала на суперсиметрията. 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  $1 \text{ TeV}$  [12].

Поради това, че експериментално не са наблюдавани суперсиметричните партньори на фундаменталните частици (кварки и лептони) и на основните преносители на взаимодействия, суперсиметрията би трябвало да е нарушена и то така, че да се осигурят достатъчно големи маси на съответните суперсиметрични

частици.

Изискванията за калибровъчна инвариантност и пренормираност са достатъчни, за да осигурят запазването на барионното и лептинното число в СМ. В суперсиметричните теории, обаче е възможно нарушаване на законите за запазване на барионното и лептинното 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 в лагранжиана могат да бъдат елиминирани чрез въвеждането на  $R$ -четността:

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S}, \quad (2)$$

където  $B$  е барионното число,  $L$  е лептонното число, а  $S$  е спина.  $R$ -четността е  $+1$  за всички частици от СМ и  $-1$  за всички суперсиметрични частици. Следователно, всички суперсиметрични частици се разждат по двойки и най-леката суперсиметрична частица LSP<sup>5</sup> е напълно стабилна, което я прави възможен кандидат за тъмна материя.

В СМ трите константи на взаимодействие при много големи енергии, близки до Планковата скала, не се обединяват. Стойностите на константите се изчисляват с помощта на уравнението на ренорм-групата. Обединение може да се получи, ако се проявят нови физични феномени, които могат да изменят хода на константите на взаимодействие над електрослабата скала. Пример на успешно обединение възниква в МССМ [13].

МССМ е суперсиметрично разширение на стандартния модел, съдържащо възможно най-малък брой частици и запазваща се  $R$ -четност. В МССМ суперсиметрията е нарушена изкуствено, като в лагранжиана са добавени малки, членове запазващи калибровъчната инвариантност относно групата  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ , което включва масови членове за всички суперсиметрични партньори и членове от трета степен. Появяват се още 105 параметра освен тези на СМ. Един от тези параметри е масата на хиггиното, която трябва да бъде от същия порядък като енергиите, при които суперсиметрията се наруши. Електрослабата симетрия не може да бъде нарушена "на ръка" в лагранжиана, тъй като това би нарушило калибровъчната инвариантност. Вместо това тя се нарушива, чрез механизъм на Хиггс, като по този начин кварките, лептоните,  $W$  и  $Z$  бозоните придобиват маса. 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 условия (хипотеза за универсалност), например при много големи енергии всички частици със спин 0 да имат едни и същи маси със стойност  $m_0$ , всички частици

---

<sup>5</sup>LSP (англ. lightest superparticle) - най-леката суперсиметрична частица

със спин  $1/2$  - маса  $m_{1/2}$  и всички членове от 3-та и 4-та степен в лагранжиана да имат един и същи вид на Юкавския суперпотенциал, МССМ остава с пет свободни параметъра определящи масовата скала

$$m_0, m_{1/2}, A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu), \quad (3)$$

$m_0$  и  $m_{1/2}$  са съответно масите на скаларните частици и на гейджината преди нарушаване на симетрията,  $\tan\beta$  е отношението между вакуумните средни на Хиггсовите полета,  $\text{sign}(\mu)$  е знака на Хиггсовия масов параметър,  $A_0$  е константата на обединеното взаимодействие [14].

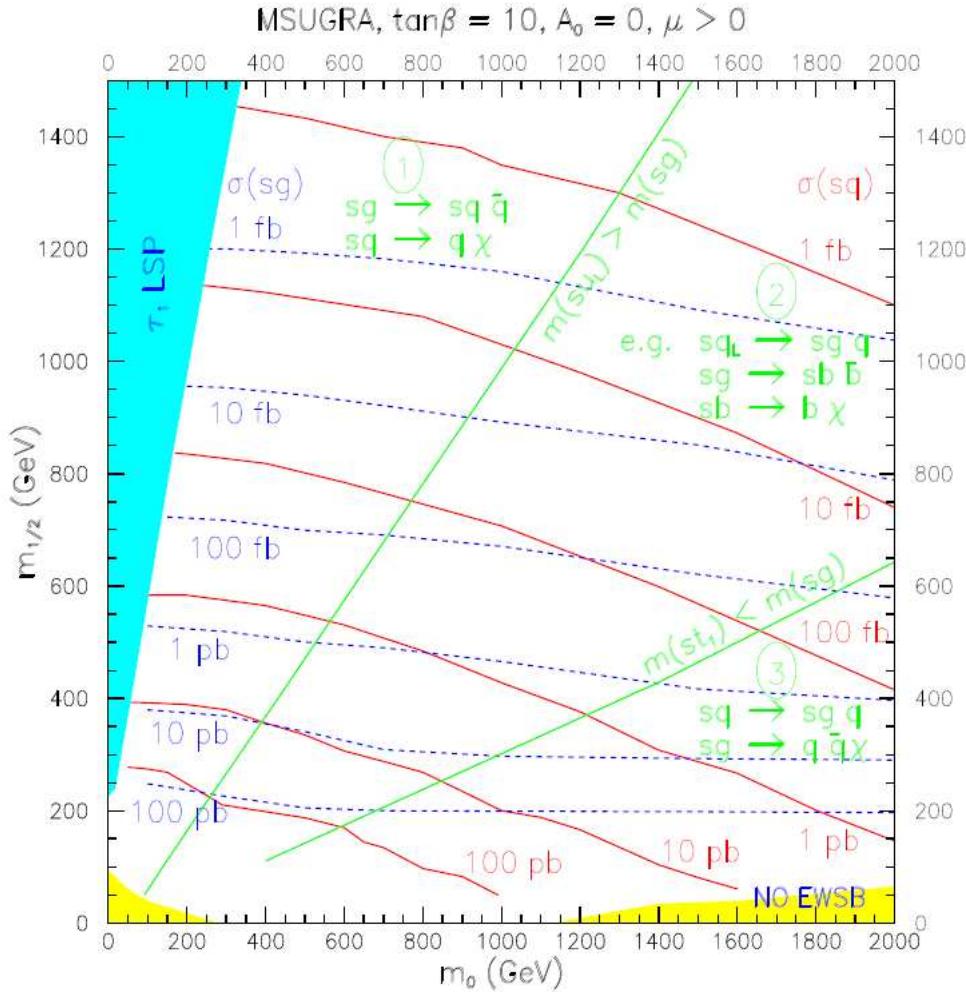
Разпадът на суперсиметричните частици, като скварки и глуина, включва каскади, които, при запазваща се R-честност, винаги съдържат най-леката суперсиметрична частица. Последната се очаква да взаимодейства много слабо с материята, което води до голяма  $E_T^{miss}$  в крайното състояние. Остатъкът от каскада дава изобилие от лептони и струи.

След като суперсиметрията и електрослабата симетрия бъдат нарушени, частиците с едни и същи квантови числа ще се смесят. Гейджината и хиггсина ще формират две чарджа и четири неутралнина. Поради Лоренц инвариантността левите и десните фермиони трябва да имат еднакви маси, но що се отнася до техните суперсиметрични партньори това не е така. В матрицата на квадрата на масите им се появяват не диагонални елементи, които са пропорционални на фермionните маси. Може да има смесване и между поколенията на суперсиметричните частици, като това включва и нов източник за получаване на CP-нарушение.

## 1.5 Търсене на суперсиметрия

Минималното суперсиметрично разширение на стандартния модел предвижда пет Хиггс бозона: лек скаларен бозон ( $h$ ), тежък скаларен бозон ( $H$ ), псевдоскалар ( $A$ ) и два заредени бозона ( $H^\pm$ ). Пространството от параметрите на МССМ най-общо се представя, като функция на масата на псевдоскалара  $m_A$  и отношението на вакуумните средни на двата Хиггсови дублета  $\tan\beta$ . В повечето симулации и изследвания за LHC, останалите параметри са фиксирани, със стойности използвани в изследванията на LEP [15]:  $M_2 = 200 \text{ GeV}$ ,  $\mu = -200 \text{ GeV}$ ,  $M_{\tilde{g}} = 800 \text{ GeV}$ ,  $M_{\tilde{q}, \tilde{l}} = 1 \text{ TeV}$ ,

Каналите с два фотона и с четири лептона са критично важни за откриването на Хиггс бозона от МССМ. Очаква се “тесен” Хиггс бозон с междинна маса. Необходима е отлична разделителна способност и добра геометрична ефективност на детекторната установка. Лекият неутрален скаларен Хиггс бозон от МССМ може да бъде открит, чрез двофотонния му разпад след интегрална светимост от  $10^5 \text{ pb}^{-1}$ , в голяма област от  $(m_A, \tan\beta)$ -параметрите, непокрита от LEP II ( $\sqrt{s} = 190 \text{ GeV}$ ).



Фигура 2: Области от  $m_0$  -  $m_{1/2}$  равнината, показващи сечението за раждане и основните разпади на скварките и глуината [14].

Търсенето на суперсиметрия ще се провежда, чрез инклузивни изследвания, базирани на основа на голяма недостигаша енергия и струи [16]. Ако скварките и глуината са кинематично достъпни на LHC, то се очаква те да се раждат с голяма вероятност. Сеченията за раждане за скварк и глуино са показани на фиг. (2), като почти диагоналните линии определят три области:

- в най-лявата област глуината са по-тежки от скварките. Очакваната верига на разпад на родените суперсиметрични частици е:

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

- в средната област някои скварки са по-тежки, а други са по-леки от глуиното. Поради тази причина са възможни и по-сложни канали, например:

$$\tilde{q}_L \rightarrow \tilde{g}q, \quad \tilde{g} \rightarrow \tilde{b}\bar{b}, \quad \tilde{b} \rightarrow b\chi,$$

понеже  $\tilde{q}_L$  от първите две поколения се очаква да бъдат сред най-тежките скварки, а  $\tilde{b}_1$  и  $\tilde{t}_1$  сред най-леките.

- в дясната област глуината са по-леки от който и да е от скварките. Тогава характерната верига от разпади е:

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

където разпадът на глуиното е тричастичен и се извършва, чрез обмен на виртуален скварк.

Съществуват също други възможности за нова физика, която не е обезателно свързана със скалата на нарушение на електрослабата симетрия. Може да има нови неутрални или заредени калибровъчни бозони с маса по-голяма от тази на  $Z$  и  $W$ ; може да има нови кварки, заредени лептони или массивни неутрини, или кварките и лептоните може да се окаже, че не са елементарни обекти. Доколкото нямаме окончателни очаквания за масите на тези обекти, експериментите поставени на ускорителя LHC трябва да са способни да ги търсят върху целия достъпен интервал от енергии.

Освен МССМ, съществуват и множество други суперсиметрични модели. Например, един съвременен суперсиметричен модел е “разцепена суперсиметрия”<sup>6</sup> [17] [18]. Моделът Split SUSY е съгласуван с най-новите космологични и астрофизични данни за наличието на “тъмна материя” във Вселената. Ако от суперсиметричните модели се изиска обединение на константите на взаимодействие и кандидат за тъмна материя, съобразен със съвременните експериментални данни, то Split SUSY е един от малкото модели отговарящи на тези изисквания [19]. Спектарът на суперсиметричните частици в тази теория е “разцепен” на две: скалари (сварки и слептони) с маси от порядъка на скалата на нарушение на суперсиметрията и фермиони (гейджина и хиггинса), чито маси са близо до електрослабата скала. В случай на Split SUSY глуиното и хиггиното са с маси достъпни на ускорителя LHC, а глуиното се разпада на кварк и скварк, което го прави сравнително дългоживущо ( $10^{-2} - 10^{14}$  s). В зависимост от възможното време на живот се очакват различни сигнали в детектора:

- краткоживущо глуино - разпада се в детектора след преминаване на определено разстояние - очаква се отместен вертекс
- дългоживущо глуино - напуска детектора или се спира в него и се разпада след време

Ако глуиното не се разпадне веднага, то може да адронизира до така наречения R-адрон. R-адрон е частица образувана от глуино и кварки. Split SUSY предсказва маси на глуиното и хиггиното под  $1\text{ TeV}$ .

---

<sup>6</sup>англ. Split SUSY - разцепена суперсиметрия

## 1.6 Търсене на нови массивни 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  $\mu^+\mu^-$ . 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  $P_T \approx 1 \text{ TeV}$ ) и геометрично покритие до псевдобързини  $|\eta| = 2,4$ .

## 1.7 Търсена на допълнителни измерения

В контекста на великото обединение, съществуват теории, които предсказват размерност на пространство-времето по-голяма от четири. В частност струнните теории включват по естествен начин и квантова гравитация с частица със спин 2, която се идентифицира с гравитон. Повечето подобни теории обаче изискват унифициране на взаимодействията при енергии близки до Планковата маса, което е значително над възможностите на съвременните и бъдещите ускорители. В последно време интересът към допълнителните пространствени измерения се поднови с модели, които предвиждат проявления на допълнителните измерения при скала от порядъка на  $\text{TeV}$ , която е достъпна за съвременните ускорители.

Такъв модел е например, модела на Рандал-Судрум (Randall-Sundrum) с едно допълнително измерение с радиус на компактификация  $r_c \sim 10^{-32} \text{ m}$ . Моделът също така решава проблема с йерархията на масите. Поради малкия радиус на компактификация в модела на Рандал-Судрум, не се наблюдава отклонение от Нютоновия закон за гравитацията, при експериментално достъпните разстояния за измерване. Отклонения се очакват при разстояния от порядъка на  $10^{-32} \text{ m}$ . От друга страна се проявяват массивни Калуца-Клайн възбуждения на гравитона с добре отделени маси. В модела на Рандал-Судрум тези резонанси са с маса от порядъка на  $\text{TeV}$  и могат да се детектират от експерименти поставени на ускорители. Съществуването на допълнителни измерения може да доведе до характеристична енергетична скала за квантовата гравитация  $M_D$ , която е аналог на Планковата маса в D-мерна теория и може да се намира близо над електрослабата скала. От феноменологична гледна точка, при енергия  $E$  могат да се разграничат три различни сценария:

- Cis-Planckian (допланков), при който  $E \ll M_D$ , водещ до сигнали включващи излъчване на гравитон, който “избягва” в допълнителните измерения, т.e.  $pp \rightarrow$  струя + гравитон  $\rightarrow$  струя +  $E_T^{miss}$
- Planckian (планков),  $E \sim M_D$ , водещ до моделнозависими сигнали. В мотивираните от теория на струните модели има Редже-подобни (Regge-подобни)

възбуждения, които се проявяват, като  $Z$ -подобни резонанси с разлика между техните маса от порядъка на  $TeV$ .

- Trans-Planckian (надпланков),  $E \gg M_D$ , водещи до раждането на две струи с аномално голяма маса и до раждане на черни дупки с ефектни разпади, включващи еднакво и “демократично” раждане на фундаментални частици, като лептони, фотони, неутрина,  $W$ ,  $Z$ , струи (кварки) и т.н.

На партонно ниво, гравitonите могат да бъдат получени на ускорителя LHC, чрез процесите  $q\bar{q} \rightarrow G$  или  $gg \rightarrow G$ . Очакваният сигнал е последващ разпад до  $e^+e^-$  или  $\mu^+\mu^-$ . Продуктите от разпада са с голям напречен импулс и дават чист пик на инвариантна маса. Фонът от СМ в случая е най-вече от Дрел-Ян процесите  $q\bar{q} \rightarrow \gamma$  и  $Z \rightarrow e^+e^-$ .

## 1.8 Изследване на Стандартния модел

Ускорителят LHC позволява също изследване на КХД, електрослабата и ароматната физика. Прецизните изследвания могат да дадат индикация за физика извън СМ, доставяйки допълнителна информация, освен директното търсене на частици. Например подробни тестове на КХД са възможни, чрез измерване на родените струи и фотони с напречни енергии до  $3 - 4 TeV$  и от измерване на редки процеси със сечения, които са подтиснати с 11 порядъка. На LHC ще се раждат сердно десет  $t$ -кварка за секунда, следователно е възможно да се изследват техните взаимодействия. Пътя към нова физика може да бъде открит, чрез търсенето на променящ аромата неутрален ток, чрез  $\tau \rightarrow 3\mu$ , измерване на  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ , измерване на тройни и четворни калибровъчни взаимодействия и т.н. Голямото сечение за раждане на двойки  $B$ -мезони на LHC дава възможност за измервания с достатъчна статистическа значимост на СР-нарушаващи ефекти в В системите. Чрез колаборация с експеримента TOTEM [20] [21], CMS ще покрие пълния регион от дифракционни физични явления.

## 1.9 Физика на тежките иони

Освен като протон-протонен ускорител на насрещни спонове, LHC ще се използва и за ускоряване и сблъскване на тежки иони, по-конкретно олово на олово, с енергия в център на масите от  $5,5 TeV$  на нуклонна двойка. Очаква се формирането на кварк-глуонна плазма при сблъсъци на тежки иони да доведе до голямо подтискане на раждането на  $\Upsilon'$  и  $\Upsilon''$  относно раждането на  $\Upsilon$  в сравнение с протон-протонни сблъсъци. Наличието на кварк-глуонна плазма също така води до подтискане раждането на струи. Основно предимство на CMS за изследване на физиката на тежките иони е това, че CMS разполага с отлична мюонна и калориметрична система [22].

## 1.10 Заключение

Физическата програма на CMS далеч не се изчерпва с търсенето на Хиггс бозона. Важна задача е и търсенето на суперсиметрични частици. Събития с много високоенергетични струи и голяма недостигаша напречна енергия са най-забележимите и моделно независими белези при търсенето на суперсиметрични партньори на кварките и глюоните.

Голямото сечение за раждането на двойки B-мезони при енергиите на ускорителя LHC дава възможност да се набере голяма статистика и да се изследват важни аспекти на физиката на B-мезоните.

Ускорителят LHC ще се използва и за сблъскване на тежки иони, при което могат да се изследват взаимодействията им. Въпреки, че за изследване на тежки иони на ускорителя LHC е поставен специализираният експеримент ALICE, в програмата на CMS също е предвидено да се изследват и взаимодействията на тежките иони, като основното предимство на CMS в случая е отличната му мюонна и калориметрична система.

Експериментът CMS ще търси също допълнителни пространствени измерения и мини черни дупки, както и други нови физични феномени при достъпните енергии.

## 2 Експеримента CMS

В настоящата глава е дадено кратко описание на ускорителя на насрещни снопове LHC и неговите параметри. Представен е експериментът CMS и неговите подсистеми - магнитна, треков детектор, електромагнитен и адронен калориметър, мюонна система, и тригерна система.

### 2.1 Ускорителя LHC в CERN

Експериментът CMS [23] ще бъде поставен на новостроящия се ускорител LHC (Large Hadron Collider) [24], [25], [26] в ЦЕРН, Женева. Това е ускорител на насрещни снопове, който в момента се изгражда в тунела на излезлия от експлоатация в края на 2000-ната година електрон-позитронен ускорител на насрещни снопове LEP. Целта на този ускорител е търсенето и изследването на нови массивни частици, а също така и търсене на редки процеси с малки сечения. Ускорителят LHC ще сблъсква протони с енергия в системата на центъра на масите  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ , а също така и оловни ядра с енергия  $1150 \text{ TeV}$ . Светимостта на ускорителя ще достигне  $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  за р-р и  $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  за Pb-Pb сблъсквания. За сравнение LEP в CERN сблъскваше  $e^+e^-$  с  $\sqrt{s} \sim 206 \text{ GeV}$  при светимост  $\mathcal{L} = (24 - 100) \times 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , а на ускорителя Tevatron във Фермилаб се правят опити да се достигнат  $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$  и  $\mathcal{L} = 2,8 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  в  $p\bar{p}$  сблъсъци. На този нов ускорител ще работят четири големи експеримента: CMS [23], ATLAS [27],[28] , ALICE [29] и LHCb [30], а също така и по-малкия експеримент TOTEM [20].

Експериментите CMS (Compact Muon Solenoid) и ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) са експерименти с “общо” предназначение, т.е. основната им цел е търсене на нови физични феномени и фундаментални изследвания. Докато ALICE (A Large Ion Collider Experiment) и LHCb (Study of CP violation in B-meson decays at the LHC collider) са с конкретно предназначение. ALICE е експеримент за изследване на събъсациите на тежки йони и търсене и изследване на кварк-глуонна плазма. Целта на LHCb е изследване на В-физика, т.е. физиката на b-кварките, в това число и нарушение на CP-четността в В-мезонните разпади. TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC) е експеримент посветен на измерването на пълното сечение на взаимодействие, еластично разсейване и на дифракционни процеси на ускорителя LHC.

Ускорителят LHC представлява цяла система от различни ускорителни съоръжения, които увеличават енергията на заредените частици постепенно до големи стойности . Най-напред протоните се ускоряват в линеен ускорител, протонният сноп се отвежда до ускорителя PS (Proton Synchrotron). Там снопът се ускорява допълнително и се прехвърля в по-големия ускорител SPS (Super Proton Synchrotron), след достигане на никаква определена енергия ( $450 \text{ GeV}$ ) снопът се прехвърля най-накрая в ускорителя LHC, където се ускорява до номиналната енергия. Цялата система е много комплексна и нейното реализиране

		протон-протон	тежки иони	
Енергия на нуклон	$E$	7	2,76	$TeV$
Магнитно поле	$B$	8,33	8,33	$T$
Проектна светимост	$\mathcal{L}$	$10^{34}$	$10^{27}$	$cm^{-2}s^{-1}$
Интервал между групите частици		25	100	$ns$
Брой на групите частици	$k_B$	2808	592	
Брой частици в група	$N_p$	$1,15 \times 10^{11}$	$7,0 \times 10^7$	

Таблица 3: Някои по-важни параметри на ускорителя LHC [31].

е връхна точка за съвременната техника. Дължината на ускорителя е около 27 km. Изгражда се от свръхпроводящи магнити с индукция на работното поле от 8,36  $T$ , поставени при температури от 1,9  $K$  поддържана със свръхфлуиден хелий. По-важните параметри на ускорителя LHC са дадени в табл. 3

Специалната конструкция на диполните магнити позволява създаването на магнитно поле, което може да удържи двата движещи се един срещу друг спона с един и същи магнит. Благодарение на това е възможно изграждането само на един пръстен за двата спона, което от своя страна спестява значителни финансови средства и прави възможна реализацията на проекта.

## 2.2 Системи на експеримента CMS

Целта на експеримента CMS е да се изследва широк диапазон от нови физични процеси, които се очаква да се проявят при енергийте, които ще бъдат достигнати на новия ускорител LHC в CERN.

CMS (Compact Muon Solenoid) е разчетен да работи при високата светимост на LHC. CMS е оптимизиран за търсене на предсказания в рамките на СМ на електрослабите и силни взаимодействия Хиггс бозон в масов диапазон от 90  $GeV$  до 1  $TeV$ .

Конструкцията на експеримента е разработена така [32], че да дава възможност за идентификация и прецизно измерване на характеристиките на продуктите от реакциите, като мюони, фотони, електрони, струи, недостигаща енергия и т.н. За да изпълнят поставените физически задачи на ускорителя LHC, детекторните системи на експеримента CMS трябва да отговарят на следните основни изисквания:

- Сигурна идентификация на мюоните и добра разделителна способност по импулси. Добра разделителна способност за инвариантната масата на двойки мюони ( $\sim 1\%$  при  $100\;GeV$ ). Сигурно определяне знака на електрическия заряд на мюони с импулси до  $1\;TeV$ .
- Добра разделителна способност за импулсите на заредени частици и висока

ефективност на реконструирането на следи във вътрешния треков детектор. Ефективно тригериране и “белязване” на  $\tau$ -лептони и b-струи, което изисква пикселни детектори, близо до точката на взаимодействие.

- Висока разделителна способност на електромагнитния калориметър. Добра разделителна способност за инвариантната маса ( $\sim 1\%$  при  $100 \text{ GeV}$ ) на дву-фотонни и дву-електронни събития. Широко геометрично покритие ( $|\eta| < 2,5$ ) на електромагнитния калориметър. Да може да се измерва посоката на полета на фотоните и/или да може коректно да се локализира вертекса на първичното взаимодействие. Да има ефективна фотонна и лептонна изолация при високи светимости.
- Добра енергетична разделителна способност за струи и напречна недостираща енергия, изискващи “херметични” адронни калориметри с голямо геометрично покритие ( $|\eta| < 5$ ) и с напречна сегментация  $\Delta\eta \times \Delta\phi < 0,1 \times 0,1$ .

### 2.3 Магнитна система

Избран е свръхпроводящ соленоид с дължина  $13 \text{ m}$  и вътрешен диаметър  $5,9 \text{ m}$  създаващ постоянно магнитно поле с интензитет  $4 \text{ T}$ , необходимо за измерване на импулсите на заредените частици по кривината на техните следи. Железният магнитопровод на системата служи също и за абсорбер, спомагащ за мюонната идентификация. Централната част на магнитопровода е разделена по оста на снопа на пет пръстена, всеки от които е дълъг приблизително  $2,6 \text{ m}$ . Всяка от страничните затварящи части е изградена от три отделни диска, които могат да бъдат разделяни един от друг, за да се осигури достъп до мюонните станции.

### 2.4 Централен треков детектор

Централният треков детектор [33] [34] [35] осигурява възможност за ефективно реконструиране на следите на частиците и вертексите, а също така и за прецизно измерване на напречните импулси на заредените частици. Базира се изцяло на полупроводникови силициеви детектори. Най-близо до точката на взаимодействие в централната цилиндрична част се намират пикселните детектори. Благодарение на използването на аналогова интерполяция на сигналите е възможно постигането на разделителна способност от около  $15 \mu\text{m}$ . Те са разположени в три цилиндрични слоя в централната част и в по два диска от двете страни на централната част. Силициевите микрострипови детектори са разположени общо в 6 слоя в централната част и 12 слоя в крайната част. В централната част детекторните модули са подредени в спирална структура, а в крайната част в дискови структури.

### 2.5 Електромагнитен калориметър

В конструкцията на детектора CMS е заложена идеята за изграждането на изключително прецизен електромагнитен калориметър [33] [36]. За реализацията

му са използвани сцинтилационни кристали от оловен волфрамат ( $PbWO_4$ ), които се отличават с малка радиационна дължина ( $0,89\text{ cm}$ ) и малък Молиеров радиус ( $2,19\text{ cm}$ ), както и с голяма бързина. Кристалният сцинтилационен детектор предлага възможно най-добрата енергетична разделителна способност, защото голяма част от своята енергия електроните и фотоните отдават в обема на хомогенните кристали на калориметъра. Конструктивно се използват кристали с напречни размери  $22 \times 22\text{ mm}^2$  и дължина  $26\text{ cm}$ . В централната част това отговаря на напречна гранулираност  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,0175 \times 0,0175$  и дебелина 26 радиационни дължини. Кристалите са разположени към точката на взаимодействието в почти проективна геометрия, но за да се избегне възможността частица да премине между два кристала, те са отместени на съвсем малък ъгъл от проективната геометрия. Светлинният сигнал от сцинтилаторите в централната част се регистрира от лавинни фотодиоди, а в крайната част от вакуумни фототриоди.

## 2.6 Адронен калориметър

Адронният калориметър осигурява измерване на енергията на адрони и адронни струи, а също така участва при формиране тригера на експеримента [33] [37]. Той обхваща електромагнитния калориметър и заедно с него измерва енергията и направлението на адронните струи, както и осигурява "херметичност", необходима за измерване на недостигащата напречна енергия. Регионът  $|\eta| < 3$  се покрива от централната и крайната част на калориметъра, който е разположен в соленоида при магнитно поле от  $4\text{ T}$ . Регионът  $3 < |\eta| < 5$  се покрива от друга детекторна система, наречена преден калориметър. С цел да се подобри прецизността на измерванията, адронният калориметър е допълнен в областта около  $|\eta| = 0$ , с детектори разположени извън свръхпроводящия магнит.

Активните елементи на централната и крайната част на калориметъра се състоят от пластмасови сцинтилатори със световоди и преобразуватели на дължината на светлинната вълна. Последователни слоеве от сцинтилатори и медни абсорбери формират подобната на сандвич структура на калориметъра. Абсорберните плоскости са с дебелина  $5\text{ cm}$  в централната и  $8\text{ cm}$  в крайните части. Сцинтилаторите са разделени на сегменти с размери  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,087 \times 0,087$ , което осигурява добра разделителна способност за двуструйни събития. За по-ефективно измерване на адронни струи, слоевете от абсорбери и сцинтилатори формират продълговати структури в проективна геометрия, насочени към точката на взаимодействието. Световодите извеждат светлината от тези структури до най-външната страна на калориметъра, където тя се регистрира с хибридни фотодиоди.

## 2.7 Преден калориметър

Предният калориметър покрива областта  $3,0 \leq |\eta| \leq 5,0$ , подобрява точността при измерванията на  $E_T^{miss}$  и позволява идентифицирането на струи в направле-

ние близо до спона. Предният калориметър трябва да бъде гранулиран, за да се отхвърлят възможни “фалшиви” струи. Трябва да е бърз и радиационно устойчив и да има добра разделителна способност по енергии. Предният калориметър е изграден от кварцови нишки с железен абсорбер. Преминавайки през кварца частиците предизвикват черенковско светене, светлината от което се детектира в края на всяка нишка от fotoумножители.

## 2.8 Мюонна система

Мюоните са сигурен отличителен белег за повечето от важните физични процеси, които е предвидено да се изследват на новия ускорител LHC. Някои от тези процеси се очаква да бъдат доста редки и ще се проявят при високи светимости. За това ефективното детектиране на мюоните от разпада на Хигс бозона,  $W$ ,  $Z$ , и  $t\bar{t}$  е много съществено [38].

Мюонната система трябва да изпълнява три основни задачи - идентификация на мюоните, измерване на техните импулси и формиране на тригер. Соленоидалният магнит с неговото голямо магнитно поле и железен магнитопровод, който едновременно служи и за абсорбер, осигуряващ мюонната идентификация, спомага за изпълнението на тези задачи. Детектирането на мюони с висока ефективност изисква покриване на голям интервал по  $|\eta|$ . За това централната част покрива региона  $|\eta| < 1,3$ , а крайната  $0,9 < |\eta| < 2,4$ .

За изпълнението на гореспоменатите задачи мюонната система трябва да има следните параметри:

- геометрично покритие: псевдобързини до  $|\eta| < 2,4$  с възможно най-малки мъртви зони
- мюонна идентификация: достатъчно количество материал, служещ за абсорбер ще покрива всички ъгли и следите ще се идентифицират като мюонни кандидати, ако са задействали мюонния детектор
- разделителна способност на мюонната система за измерването на напречния импулс (при  $0 < |\eta| < 2$ ):  $\Delta P_T/P_T \approx 6 - 10\%$  за  $P_T = 10 \text{ GeV}$ ,  $7 - 20\%$  за  $P_T = 100 \text{ GeV}$  и  $15 - 35\%$  за  $P_T = 1 \text{ TeV}$
- съвпадение на мюонните следи със следи от централния треков детектор: пространственото разминаване на следите от мюонната система с тези от трековия детектор трябва да не е по-голямо от няколко милиметра
- разделителна способност на мюонната система за измерването на напречния импулс след използване на информацията от централния треков детектор (при  $0 < |\eta| < 2,4$ ):  $\Delta P_T/P_T \approx 0,5 - 1,0\%$  за  $P_T = 10 \text{ GeV}$ ,  $1,5 - 5\%$  за  $P_T = 100 \text{ GeV}$  и  $5 - 20\%$  за  $P_T = 1 \text{ TeV}$

- еднозначно асоцииране на събитието със сблъсъка на протонните спонове в ускорителя: ефективност по-голяма от 99%
- мюонен тригер: прецизни мюонни камери и бързи детектори осигуряват тригер с  $P_T$ -праг от няколко до 100 GeV

Мюонната система е изградена от три типа детектори - камери с дрейфови тръби<sup>7</sup>, в централната част, катодни стрипови камери в крайните части и камери със съпротивителна плоскост в централната и в крайните части. Камерите с дрейфови тръби са специален вид дрейфови камери, но за краткост ще ги наричаме просто дрейфови камери.

Задачата на дрейфовите и катодните стрипови камери е да се извърши прецизно измерване на съвкупността от пространствени координати на всяка следа, а оттам и на импулса на заредената частица, която я е оставила. Камерите със съпротивителна плоскост са много бързи и участват във формирането на тригера на детектора [39].

В централната част дрейфовите и камерите със съпротивителна плоскост са разположени в четири цилиндрични слоя между слоевете на магнитопровода, като четвъртият слой е извън магнитопровода. В четири слоя, под формата на дискове са разположени катодните стрипови камери и камерите със съпротивителна плоскост в крайните части, като четвъртият слой е извън магнитопровода.

### 2.8.1 Дрейфови камери

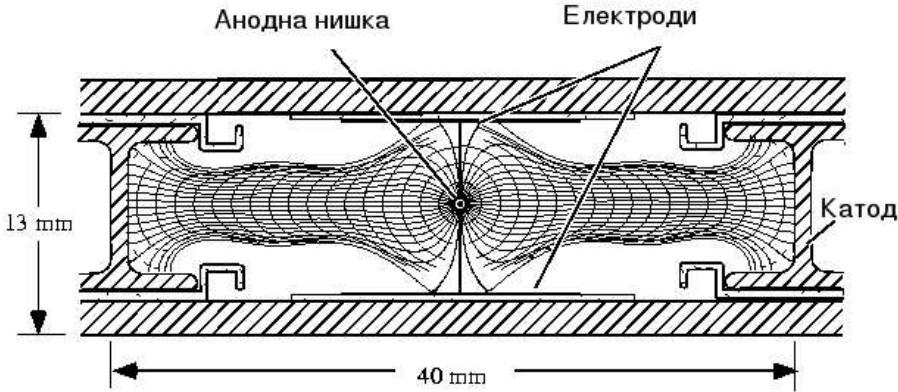
Дрейфовите камери в експеримента CMS осигуряват разделителна способност от 100  $\mu m$  в  $r\phi$  равнината и 150  $\mu m$  в направление по Z.

Всяка дрейфова камера се състои от 12 слоя, изградени от дрейфови тръби, разделени в три групи от по 4 слоя, наречени суперслоеве. Във всеки суперслой тръбите са отместени една от друга с половин тръба, за да се подобри ефективността и да се намали неопределеността ляво-дясно. Два суперслоя измерват  $r\phi$  координатите, т.е. сигналните им нишки са успоредни на линията на споната, а третият суперслой измерва Z координатата.

Основната съставна част на камерите - дрейфовата тръба, е представена схематично на фиг. 3. Тръбата е с правоъгълно сечени с размери 40  $mm$  на 13  $mm$ . През центъра преминава анодната нишка с диаметър 50  $\mu m$ . Катодите, затварящи обема на тръбата са алуминиеви I-образни профили с дебелина 1,2  $mm$  и височина 9,6  $mm$ . Пластмасов профил с дебелина 0,5  $mm$  е залепен на горната и долната страна на I-образните профили с цел електрически да изолира катодите от алуминиевите плоскости. Алуминиевите плоскости, формират останалите две страни от тръбата и се свързват към земя. При тази геометрия,

---

<sup>7</sup>англ. Drift Tubes (DT)



Фигура 3: Напречен разрез на дрейфова тръба - основна част на камерите с дрейфови тръби [38]

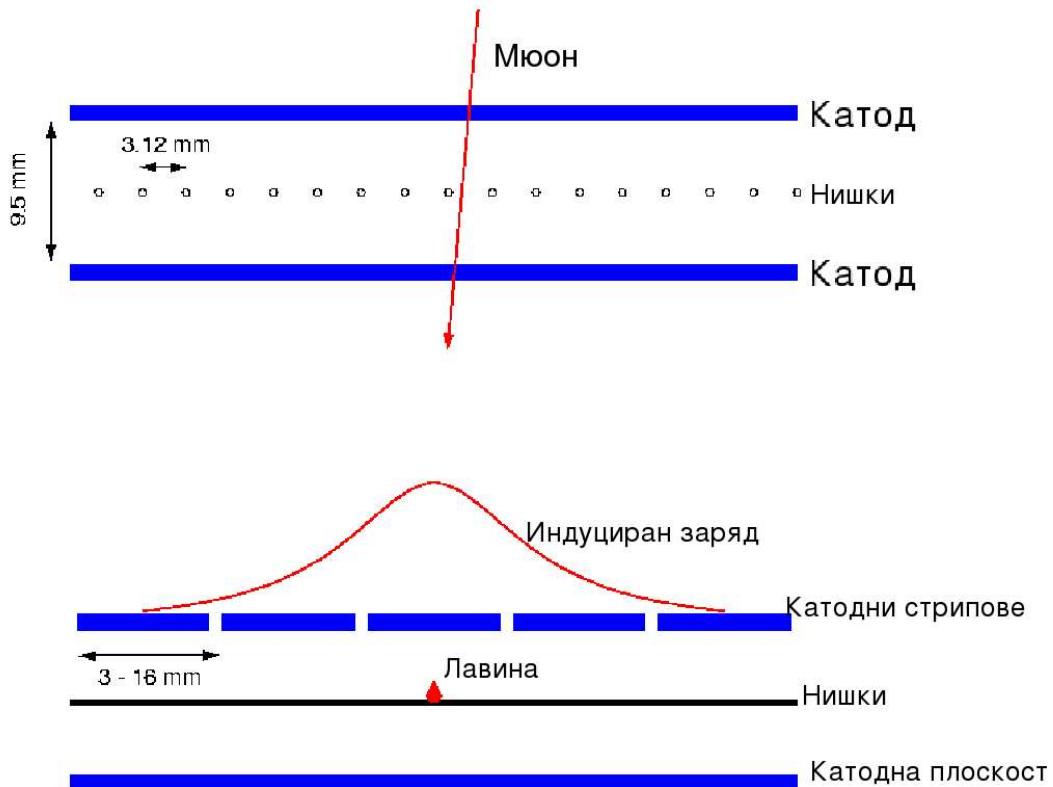
електрическо поле се формира, като на нишките се подава положително напрежение, а на катодите - отрицателно. Двойка електроди, свързани към положителен потенциал са разположени по средата на дългите стени на тръбата с цел промяна на силовите линии, подобрявайки линейността на време-пространствената връзка и пространствената разделителна способност. Тези електроди са изработени от фолио *Mylar*<sup>®</sup> с дебелина 0,1 mm и ширина 20 mm, върху който е залепено медно фолио с дебелина 70  $\mu m$  и ширина 14 mm. По този начин, от всяка страна 3 mm *Mylar*<sup>®</sup> предпазва от електрически пробиви между медния електрод и алуминиевите плоскости. Електричното поле, получено при тази геометрия и високо напрежение, +3600 V на нишката, -1800 V на катода и +1800 V на средните електроди е показано на фиг. 3.

### 2.8.2 Катодни стрипови камери

В крайната част на мюонната система на експеримента CMS, ще се използват катодни стрипови камери CSC (Cathode Strip Chamber). Катодните стрипови камери са многонишкови пропорционални камери, на които едната катодна равнина е сегментирана на сигнални електроди (стрипове), които са разположени перпендикулярно на нишките. Лавината, развиваща се около нишката, индуцира на катодната равнина разпределен заряд - фиг. 4. Позицията на следата се определя, чрез интерполяция на частта от заряда, индуцирана върху сигналните електроди. Пространствената разделителна способност по  $\phi$  е 75 $\mu m$  за камерите от тип ME1<sup>8</sup> и 150  $\mu m$  за останалите типове камери.

Лавината, развиваща се към нишката индуцира на катодната равнина разпределен заряд с добре известна форма [40]. Шарпак [41] показва, че чрез ин-

<sup>8</sup>камерите от крайната част на мюонната система, разположени най-близо до точката на взаимодействие



Фигура 4: Схема на катодна стрипова камера: сечение напречно на нишките (горе) и сечение напречно на катодните стрипове (долу) [38]

терполиране на частта от заряда регистриран от сигналните електроди, може да се реконструира позицията на следата по нишката с точност по-добра от  $50 \text{ mm}$ . Точността се определя главно от отношението между сигнала и шума.

Предимства на катодните стрипови камери са добрата им пространствена разделителна способност, бързодействието им, както и възможността за едновременно измерване на две пространствени координати на следата на частицата. Сignalните електроди могат да имат перкоподобна форма, което улеснява измерването на  $\phi$  координатата. Катодните стрипови камери, също така могат да работят в големи нехомогенни магнитни полета, без това значително да влоши характеристиките им.

Типичната катодна стрипова камера за крайната част на експеримента CMS е изградена от шест слоя с трапецовидна форма с максимална дължина  $3,4 \text{ m}$  и с максимална ширина  $1,5 \text{ m}$  и в зависимост от размера покрива сектори с големина  $10^\circ$  или  $20^\circ$ .

Катодните равнини се формират от плоскости тип “пчелна пита” покрити

с медно фолио. Газовите междини са с размер 6  $mm$  за камери тип ME1/1 и 9,5  $mm$  за всички останали камери. Сигналните електроди са перкоподобни, т.е. те са радиални и дават  $\phi$ -координатата на мюонната траектория. Ширината на сигналните електроди е между 3  $mm$  и 16  $mm$  в зависимост от типа камера. Нишките са опънати перпендикулярно на сигналните електроди, без допълнителни държатели и с цел снемане на данни са групирани в групи от 5 до 16 на брой. Те дават радиалната координата на мюонния трек с точност няколко сантиметра. За камерите от типа ME1/1, които са в 3  $T$  поле, нишките са окочени на ъгъл 25° спрямо перпендикуляра към централната линия на камерата, за да се компенсира изкривяването на дрейфа на електроните.

### 2.8.3 Камери със съпротивителна плоскост

Камерите със съпротивителна плоскост (RPC<sup>9</sup>) [42] са газови детектори с плоско-паралелна геометрия. Притежават времева разделителна способност сравнима с тази на сцинтилаторите ( $\sim 1 \text{ ns}$ ) и добра пространствена разделителна способност ( $\sim 1 \text{ cm}$ ) [38]. Сигналът се индуцира върху набор от лентоподобни сигнални електроди, разположени извън газовия обем. Основна част на камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS е така наречения “единичен газов процеп”. Той е формиран от две паралелни бакелитни плоскости с голямо специфично съпротивление ( $\sim 10^{10} \Omega\text{cm}$ ), разположени на 2  $mm$  една над друга. Вътрешната повърхност на бакелитните плоскости е покрита с ленено масло с цел да се намалят неравностите на повърхността и от там да се подобрят характеристиките на камерата [43]. В експеримента CMS се използват двупроцепни камери със съпротивителна плоскост [33], работещи в лавинен режим, т.е. намалено газово усиливане [38] с цел да се осигури работата при високо натоварване ( $\sim 1 \text{ kHz/cm}^2$ ) на камерите. Един двоен процеп е изграден от два единични процепа, разположени един върху друг с общи медни сигнални електроди по средата. Всяка камера със съпротивителна плоскост в централната част на експеримента CMS се състои от два или три двойни процепа. В крайната част на експеримента CMS камерите със съпротивителна плоскост имат трапецовидна форма.

## 2.9 Тригер на експеримента CMS

При проектната светимост на ускорителят LHC, се получават около 20 събития при пресичането на сноповете на всеки 25  $ns$ , което отговаря на  $10^9$  взаимодействия в секунда. Честотата за физически интересните събития, като например раждането на Хигс бозон е с повече от десет порядъка по-малка. Голяма част от подбора на събитията трябва да се извърши в реално време, понеже обемът на първичните данни за едно събитие е от порядъка на 1  $MB$  и съхраняването и обработката на такъв обем данни е практически невъзможно. Целта на тригърната система на CMS е да извърши в реално време този подбор, като намали честотата на събитията до 100  $Hz$ . Понеже пресичането на сноповете в ускорителя става с честота 40  $MHz$ , то решение трябва да се взима на всеки 25  $ns$ .

---

<sup>9</sup>RPC (англ. Resistive plate chamber) - камера със съпротивителна плоскост

Това време е недостатъчно дори само да се съберат всички първични данни от детектора. Поради тази причина решенията се вземат на няколко стъпки (нива), като на всяко ниво се взема решение, използвайки само част от данните.

Тригерът на CMS се състои само от две физически нива - първо ниво<sup>10</sup> [44] и тригера от високо ниво<sup>11</sup>. L1 тригерът използва само първични данни от калориметрите и мюонната система, при това не с пълната им гранулираност. Въз основа на тази ограничена информация, той трябва да намали броя на събитията до приемливо за системата за събиране на данни равнище. В началото на експлоатацията на LHC, системата за събиране на данни ще може да обработва събития с честота до  $50\text{ kHz}$ , която в последствие ще се увеличи до  $100\text{ kHz}$  при пълната светимост на LHC. Подбрани събития се предават на тригера от високо ниво, които представлява голяма компютърна ферма. Алгоритмите на HLT са реализирани в програмен пакет, което позволява гъвкавост и дава възможност за промени и подобрения.

Подборът на събития в реално време на LHC се базира на факта, че повечето  $p_T$  сблъсъци дават "меки" адрони с напречен импулс от няколко  $\text{GeV}$ , докато физически интересните събития, т.е. разпадите на тежки частици, като Хигс бозона, обикновено имат в крайно състояние лептони и/или струи с голям напречен импулс. Мюонният тригер трябва да се справи със значителния мюонен фон от разпади на  $b$  и  $c$  кварки, пиони и каони.

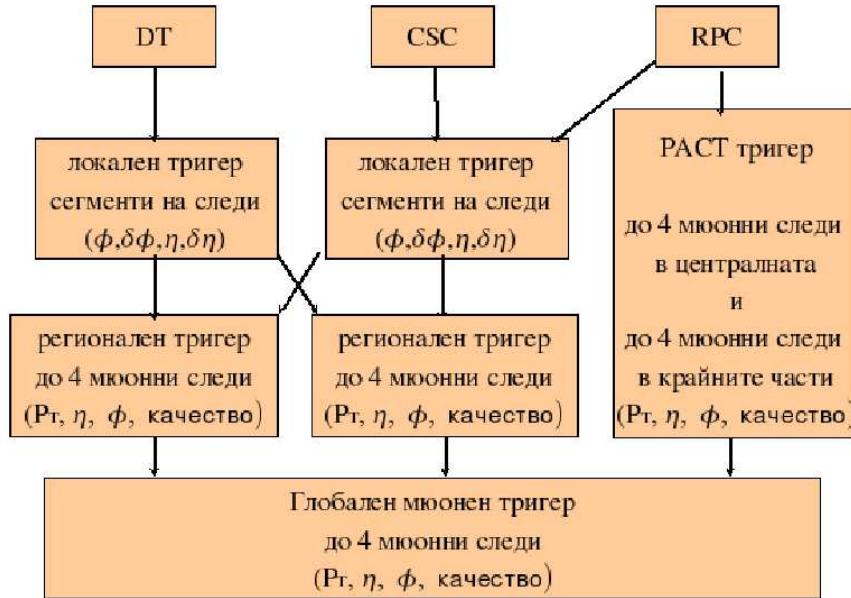
L1 тригерът е реализиран с помощта на специализирани процесори. Работи без да внася мъртво време и взема решения на всеки  $25\text{ ns}$ . Тригерът от първо ниво взема решение след фиксирано време от  $3,2\text{ }\mu\text{s}$ , отговарящо на 128 пресицания на спомовете. През това време данните се пазят в буфери.

L1 тригерът е разделен на три подсистеми: калориметричен тригер, мюонен тригер и глобален тригер. Мюонният тригер от своя страна е разделен на три отделни системи (фиг. 5), които обработват сигналите съответно от дрейфовите камери, катодните стрипови камери и камерите със съпротивителна плоскост, като резултата се комбинира в главен мюонен тригер. Калориметричният и мюонният тригер не извършват никаква селекция, а само идентифицират "тригерни обекти" от различен вид: изолирани или неизолирани електрони/фотони, струи и изолирани мюони. Четирите най-добри кандидата от всеки тип се подбират и изпращат на глобалния тригер, заедно с информация за положението, направлението и напречната им енергия или импулс, както и за "качеството" им. Глобалният тригер избира събитията според условия, които могат да му се задават програмно. Те могат да включват различни изисквания за броя на "тригерните обекти" с праг за тяхната енергия и импулс, както и различни топологични условия.

---

<sup>10</sup>англ. Level-1 (L1) - първо ниво

<sup>11</sup>англ. High Level Trigger (HLT) - тригер от високо ниво



Фигура 5: Схема на мюонният тригър [44]. Камерите с дрейфови тръби и катодните стрипови камери, благодарение на това, че са многослойни могат да формират локални сегменти от следи, които се предават на регионален тригър, който от своя страна, комбинира информацията от различните станции и излъчва до 4 кандидата за мюонни траектории. Възможен е обмен на информация между регионалните тригъри в централната и крайната част. Сигналите от камерите със съпротивителна плоскост, постъпват на входовете на РАСТ тригера. Той излъчва до 4 мюонни кандидата от централната част и до 4 мюонни кандидата от крайната част.

### 2.9.1 L1 мюонен тригър

Задачата на мюонният тригър [45] е да идентифицира мюони, да реконструира техните следи и напречни импулси, а също така да осигури привързване на събитието към съответното пресичане на споновете. Мюонният тригър от първо ниво на експеримента CMS използва информацията от трите вида детектори на мюонната система: дрейфовите камери, разположени в централната част, катодните стрипови камери, разположени в крайната част и камерите със съпротивителна плоскост, разположени в централната и в крайната част на CMS. Отличната пространствена разделителна способност на дрейфовите и катодните стрипови камери осигурява рязък prag по импулси. Многослойната им конструкция предоставя възможност за ефективно подтискане на фона. Камерите със съпротивителна плоскост са специализирани тригърни детектори. Тяхната по-добра времева разделителна способност осигурява единозначно асоцииране на събитие то със сблъсъка на споновете на ускорителя. Голямата им сегментираност дава възможност да работят при висок фон и голямо натоварване. В случай на камери със съпротивителна плоскост, информацията за времето на преминаване и

координатата на частицата се получават от един и същ сигнал, което елиминира неопределенностите, характерни за нишковите детектори.

Допълващите се възможности на дрейфовите и катодните стрипови камери от една страна и на камерите със съпротивителна плоскост, от друга страна, позволява изграждането на две тригерни подсистеми, които доставят независима информация относно регистрираните частици на глобалния мюонен тригер (GMT<sup>12</sup>).

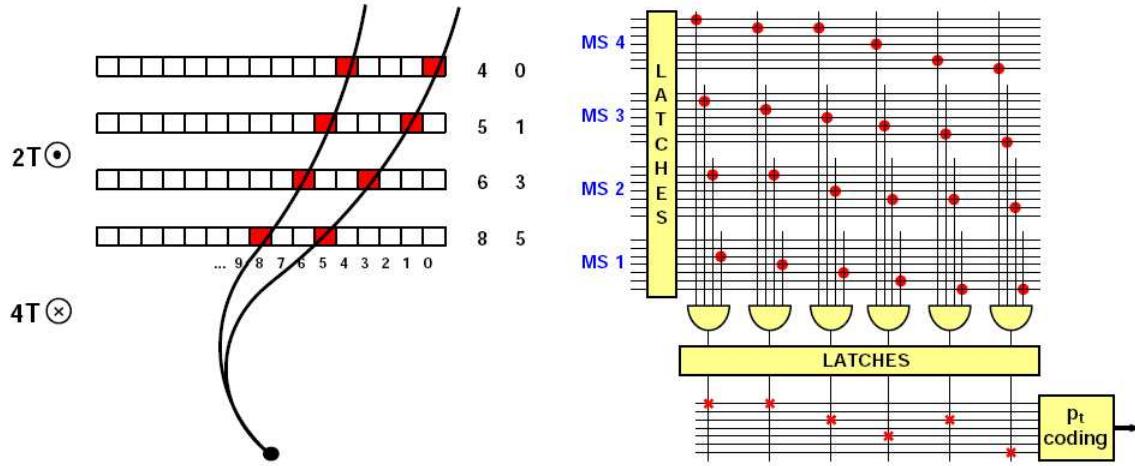
Предимствата от изграждането на две подобни подсистеми са много. Получава се различна информация за траекториите на частиците. Различните видове детектори се държат по различен начин и реагират по различен начин към различен фон. Например, в случай на камера с дрейфови тръби или катодна стрипова камера, където позицията на преминалата частица се определя, чрез интерполяция на частта от заряда, индуцирана върху сигналните електроди е възможно преминаването на фонова частица да попречи на регистрирането на мюон, с което да се увеличи неефективността. В случай на камери със съпротивителна плоскост е точно обратното - тригерът обработва всички сигнали от сигналните електроди едновременно. От друга страна, случайно съвпадение на сработвания на три или четири сигнални електроди в различни станции може да бъде погрешно идентифицирано от тригера, базиран на камери със съпротивителна плоскост, като реален мюон, но това е малко вероятно да се случи при камери с дрейфови тръби или катодни стрипови камери, защото те "гледат" за съвпадение в няколко плоскости във всяка станция.

### 2.9.2 L1 мюонен RPC тригер

Камерите със съпротивителна плоскост имат отлична времева разделителна способност. В централната част на CMS има шест, а в крайната четири слоя камери със съпротивителна плоскост. Информацията за сработилите сигнални електроди се събира от PACT<sup>13</sup> тригерът [46], които следи за корелация във времето и пространството на сигналите от четири мюонни станции - фиг. 6. Сработилите сигнални електроди се сравняват с предварително дефинирани шаблони. На всеки шаблон отговаря определен напречен импулс. В централната част на CMS, където има шест слоя, се извършва независимо търсене за мюони с малък  $P_T$  в първите четири слоя и за мюони с голям  $P_T$  в първи, трети, пети и шести слой. Прилага се също така и алгоритъм за подтискане на фалшивите съвпадения, дължащи се на фон. Четирите кандидата с най-висок  $P_T$  от централната част и от крайните части се изпращат поотделно на глобалния мюонен тригер.

<sup>12</sup>GMT (англ. Global Muon Trigger) - глобален мюонен тригер

<sup>13</sup>PACT (Pattern Comparator Trigger) - тригер със сравняване на шаблони



Фигура 6: Принципна схема на тригера с камери със съпротивителна плоскост [44]

## 2.10 Заключение

Експериментът CMS разполага със следните подситеми :

- соленоидален магнит
- централен треков детектор
- електромагнитетен калориметър
- адронен калориметър
- преден калориметър
- мюонна система
- тригерна система,

които дават възможност за идентификация и прецизно измерване на характеристиките на продуктите от протонни сблъсъци, като мюони, фотони, електрон, струи, недостигаща енергия и т.н.

Тригърът на експеримента CMS е реализиран на две нива и редуцира потокът от данни от  $10^9 \text{ Hz}$  до  $100 \text{ Hz}$ , като L1 тригърът редуцира потока от  $10^9 \text{ Hz}$  до  $75 \text{ kHz}$ . L1 тригърът използва само информация от калориметрите и мюонната система. Камерите със съпротивителна плоскост, благодарение на своето бързодействие, играят ключова роля при формирането на L1 тригера и най-вече при асоцииране на събитието към съответното пресичане на спноповете.

### 3 Камери със съпротивителна плоскост

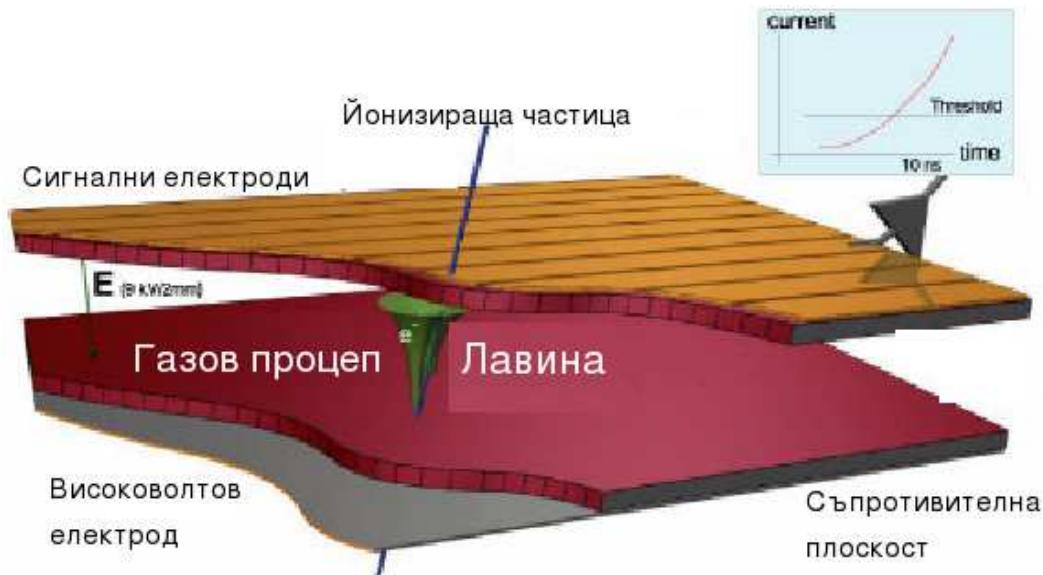
В настоящата глава е обяснен принципът на работа на камерите със съпротивителна плоскост. Представен е накратко механизъмът за развитие на лавини в газове и индуцирането на сигнал върху сигналните електроди.

В експеримента CMS камерите със съпротивителна плоскост ще се използват за детектиране на мюони. Камери със съпротивителна плоскост се използват също и за детектиране на фотони [47] и неутрони [48], но в тези случаи тяхната конструкция е по-специфична и няма да се спират подробно на тях.

В настоящата глава е представена също така условна класификация на камери със съпротивителна плоскост, според техния работен режим, конструкция, предназначение, брой и ширина на газовите процепи, материал на електродите и т.н.

#### 3.1 Принцип на действие на RPC

Камерите със съпротивителна плоскост са детектори на йонизиращи частици. По бързодействие са сравними със сцинтилаторите и притежават добра пространствена разделителна способност.



Фигура 7: Схема на единичен газов процеп на RPC камера [33]

Конструктивно са изградени от две паралелни плоскости със сравнително голямо специфично съпротивление ( $10^{10}$  -  $10^{11} \Omega\text{cm}$ ), отстоящи на разстояние от порядъка на няколко милиметра една от друга и образуващи газов процеп

(фиг. 7). От външната страна на плоскостите е нанесен проводящ слой, който формира захранващите високоволтови електроди. Върху високоволтовите електроди е нанесен изолационен слой и върху него са разположени сигналните електроди, изработени най-често от медно или алуминиево фолио. При някои конкретни реализации с цел намаляване на шума на камерата от вътрешната страна на съпротивителните електроди е нанесен слой от ленено масло [43].

При преминаване на йонизиращо лъжение през активния обем на детектора в работния газ се образуват електрон-йонни двойки. Под действието на приложено електрическо поле ( $\sim 45 - 50 \frac{kV}{cm}$ ) първичните електрони започват да дрейфат към анода, предизвиквайки вторична йонизация. Дрейфът на отрицателния заряд към анода индуцира токов импулс върху сигналните електроди.

### 3.1.1 Развитие на електронна лавина в газове

С цел въвеждане на някои основни понятия от физиката на газовите разряди, нека да разгледаме поведението на кълстер от  $n_0$  на брой свободни електрона, намиращи се между два безкрайни плоски електрода разположени на разстояние  $d$  един от друг. Нека за определеност координатната ос  $x$  е перпендикулярна на електродите и катода има координата  $x = 0$  в тази система, а кълстерът от електрони и йони има координата  $x_0$ .

Под действието на електрическото поле създадено от потенциалната разлика между двета електрода, електроните започват движение към анода, а положителните йони към катода. Ако външното електрическо поле е над определена гранична стойност, движещите се електрони започват при сблъсъците с молекулите на газа да избиват електрони, при което се получава лавинен процес. Едновременно с това част от електроните могат да се захватят от атоми.

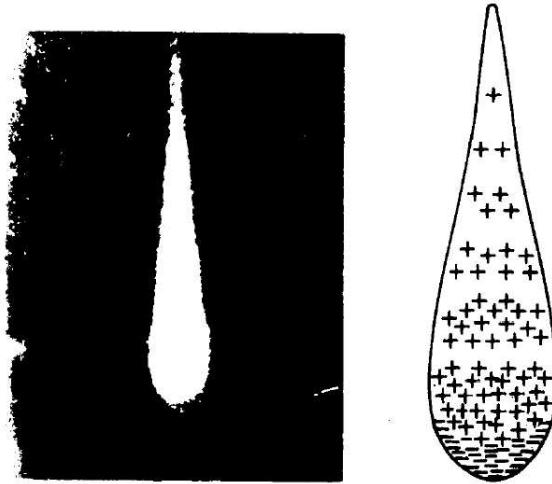
Поради голямата подвижност на електроните, формата на лавината в пространството наподобява капка течност, в долната част на която са електроните, а в горната - по-бавните положителни йони - фиг. 8.

Ако означим с  $n_e$  броя на електроните в лавината, а с  $dn$  промяната на броя на електроните след преминаване на разстояние  $dx$ , имаме в сила следната зависимост:

$$dn_e = n_e \eta dx \quad (4)$$

$$\eta = \alpha - \beta \quad (5)$$

където  $\eta$  е ефективният коефициент на Таунсенд (Townsend),  $\alpha$  е коефициента на йонизация (първи коефициент на Таунсенд),  $\beta$  е коефициента на електронно захващане. Първият коефициент на Таунсенд  $\alpha$  дава вероятността за йонизация



Фигура 8: Снимка на лавина в мъглинна камера (ляво). Вижда се характерната капкоподобна форма на лавината. Разпределение на заряда в лавината - положителните йони изостават от бързия електронен фронт (дясно) [50].

на единица изминато разстояние. Ако  $\Lambda$  е средният свободен пробег на електроните, то  $\alpha = 1/\Lambda$ .

На фиг. 9 и фиг. 10 са представени ефективния коефициент на Таунзенд, коефициент за йонизация (първи коефициент на Таунзенд) и коефициента на електронно захващане за газове и газови смеси, често използвани в камерите със съпротивителна плоскост.

Броят на електроните  $n_e(x)$  в точка с координати  $x$  (за определеност  $x > x_0$ ) се получава, при предположение, че  $\eta$  не зависи от  $x$ , като се интегрира (4):

$$G = \frac{n_e(x)}{n_0} = e^{\eta(x-x_0)} \quad (6)$$

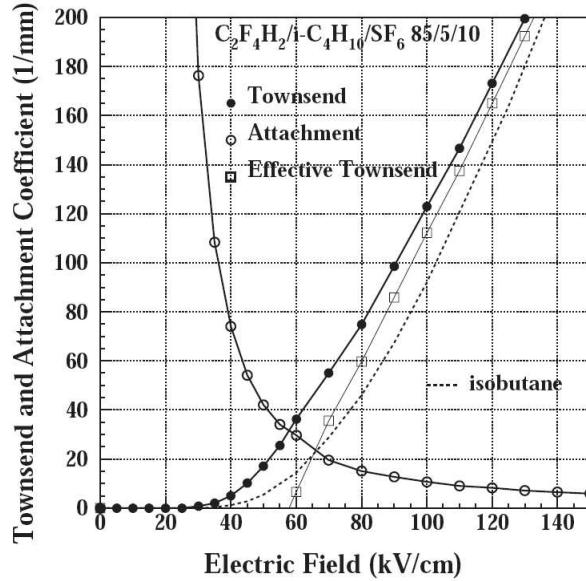
Величината  $G$  се нарича газово усилване.

По аналогичен начин за броя на положителните  $n_+$  и отрицателните йони  $n_-$  имаме:

$$n_+(x) \approx \frac{\alpha n_0}{\eta} e^{\eta(x-x_0)} \quad (7)$$

$$n_-(x) = n_+(x) - n_e(x) \approx \frac{\beta n_0}{\eta} e^{\eta(x-x_0)} \quad (8)$$

За пълнота трябва да отбележим, че поради стохастични причини броят на електроните в лавината флуктуира. Вероятността  $P(n)$  в лавината да има  $n$



Фигура 9: Ефективен коефициент на Таунзенд, коефициент за йонизация (първи коефициент на Таунзенд) и коефициент на електронно захващане, пресметнати с програмата IMONTE [51] за температура 296,15 K и налягане 1013 mbar [52].

електрона, при не големи стойности на редуцирания интензитет на електричното поле<sup>14</sup>  $E/p$  се задава от закона на Фъри (Furry) [54] [55], а именно:

$$P(n) = \frac{1}{N} e^{-\frac{n}{N}} \quad (9)$$

където  $N = n_0 e^{\eta(x-x_0)}$ . При големите стойности на  $E/p$ , при които оперират камерите със съпротивителна плоскост, вероятността в лавината да има  $n$  електрона се задава от разпределение на Поля (Polya):

$$P(n) = \left[ \frac{n}{N} (1 + \theta) \right]^\theta e^{-\frac{n}{N}(1+\theta)}, \quad (10)$$

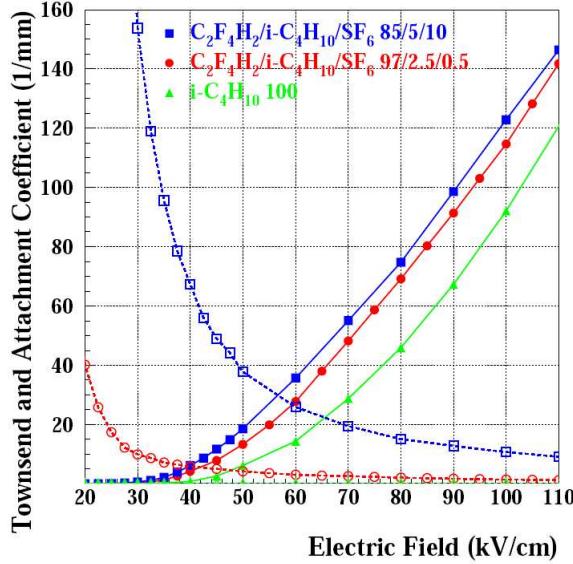
където  $\theta = 0,5$  [54]. Флуктуациите могат да се отчетат, като се добави допълнителен множител  $M$ , към (6):

$$n_e(x) = n_0 M e^{\eta(x-x_0)} \quad (11)$$

### 3.1.2 Развитие на лавина в RPC камера

При преминаване на йонизиращо лъчение през активния обем на детектора, в работния газ се образуват клъстери от електрон-йонни двойки. Под действието на приложеното електрично поле ( $\sim 50 \text{ kV/cm}$ ), първичните електрони започват

<sup>14</sup>редуцираният интензитет на електричното поле  $E/p$  по дефиниция е интензитетът на електричното поле разделен на атмосферното налягане



Фигура 10: Коефициента на Таунзенд и коефициента на електронно захващане пресметнати с програмата IMONTE за различни газови смеси [51] [53].

да дрейфат към анода, предизвиквайки лавинна вторична йонизация.

Да разгледдаме  $j$ -тия клъстер, образуван в обема на детектора от ионизиращата частица. Нека  $n_j$  и  $x_j$  са съответно броят на електроните в клъстера и началната позиция на клъстера. Нека, за определеност, клъстера с индекс  $j = 1$  се намира най-близо до катода.

Лесно може да се определи разпределението на зарядите в газа. Зарядът на свободните електрони е:

$$Q_e(x) = Q_j e^{\eta(x - x_j)}, \quad (12)$$

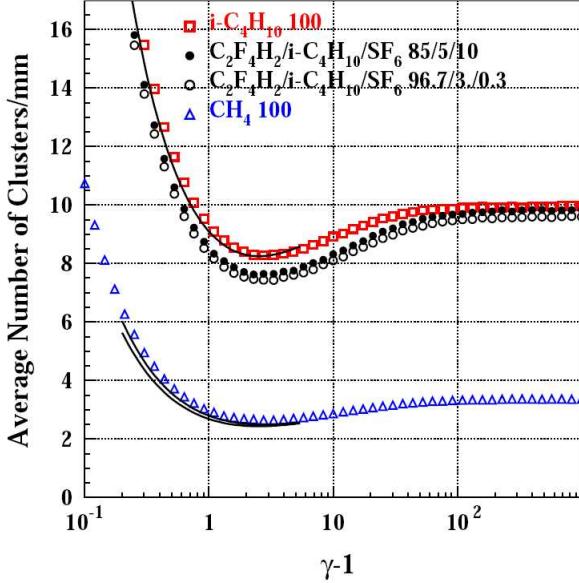
където  $Q_j = q_{el} n_j$ , а  $q_{el}$  е зарядът на електрона.

Можем също така лесно да оценим статистическите флуктуации на  $x_j$  и на  $n_j$ , тъй като се дължат на статистически независими процеси.

Броят на клъстерите се подчинява на Поасонова статистика. Следователно, вероятността да намерим първия клъстер между  $x$  и  $x + dx$  е разпределена експоненциално:

$$P(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (13)$$

където  $\lambda$  е средната линейна плътност на клъстерите. На фиг. 11 е представена средната линейна плътност на клъстерите за някои газове и газови смеси.



Фигура 11: Среден брой клъстери на  $mm$  за различни газове при температура 296,15 K и налягане 1013 mbar, получени с програмата Need. Плътните линии представляват измерванията за метан и изобутан [52] [56] [57].

Използвайки Поасонова статистика [50] [58], може да определим, че вероятността  $P_{cluster}(j, x)$ ,  $j$ —тия клъстер, независимо от останалите клъстери, да се намира между  $x$  и  $x + dx$  се задава от:

$$P_{cluster}(j, x) = \frac{x^{j-1} \lambda^j}{(j-1)!} e^{-\lambda x}, \quad (14)$$

където  $\lambda$  е линейната плътност на клъстерите в газовата смес.

Флуктуации на броя на електроните в даден клъстер<sup>15</sup> може да се оцени, използвайки различни модели [59]. В случая, тъй като вторичните електрони в даден клъстер се отделят след малък брой независими един от друг сблъсъка на първичния електрон с молекулите на газа, достатъчно адекватно описание може да се получи, като се използва Поасонова статистика, т.е. вероятността  $P(n)$  да намерим клъстер с брой електрони между  $n$  и  $n + dn$  е:

$$P(n)dn = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu} dn, \quad (15)$$

където  $\mu$  е средния брой на електроните в клъстер.

---

<sup>15</sup> средният брой електрони в клъстерите, образувани в газа се нарича размер на клъстера на газа

Средният заряд  $\langle Q_e(x) \rangle$  на всички електрони в  $j$ -тия клъстер може да се пресметне, използвайки (12), (13) и (14):

$$\langle Q_e(x) \rangle \approx q_{el}\mu e^{\eta x} \left( \frac{\lambda}{\lambda + \eta} \right)^j \quad (16)$$

### 3.1.3 Индуциране на сигнал върху електродите

Движението на електроните в електричното поле индуцира токов импулс (сигнал) върху сигналните електроди на камерата със съпротивителна плоскост. Положителните и отрицателните йони, поради по-малката си дрейфова скорост индуцират значително по-малък сигнал, който е пренебрежим в сравнение със сигнала, индуциран от електроните. Индуцирането на сигнал върху електрод в многоелектродна система може лесно да се изчисли с помощта на теоремата на Рамо [60] или обобщената теорема на Рамо [61], като се използват така наречени тегловни полета. За изчисляване на тегловните полета се използват различни приближени модели на камерите със съпротивителна плоскост [58] [62] [63].

Индуцираният токов сигнал според теоремата на Рамо е:

$$i(t) = \frac{E_w}{V_w} V_d q_{le} N(t), \quad (17)$$

където  $E_w$  е тегловното поле. Тегловното поле е електричното поле в газовия процеп, ако на сигналния електрод е подаден потенциал  $V_w$ , а всички останали електроди са свързани към земя.  $N(t)$  е броя на електроните в момент от време  $t$  в лавината.  $V_d$  е дрейфовата скорост на електроните. На фиг. 12 е представена зависимостта на дрейфовата скорост от електричното поле за често използвани в камерите със съпротивителна плоскост газови смеси.

За да се определи полезната сигнал, който се индуцира, трябва първо да се определи тегловното поле на сигналния електрод. За целта обикновенно се използва опростен модел на камерата със съпротивителна плоскост [58] [62] [63]:

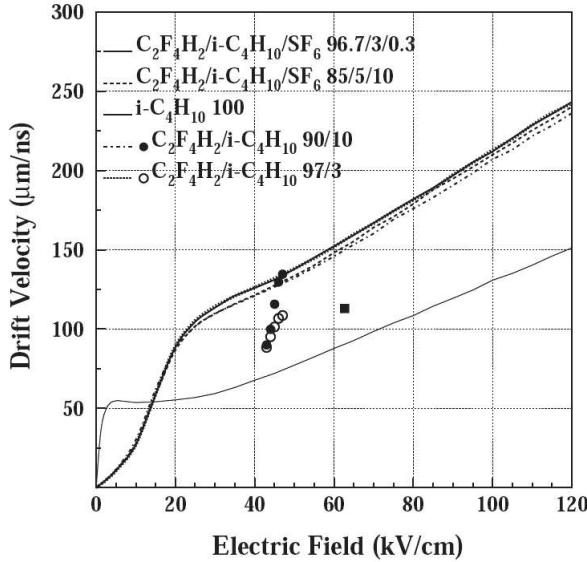
$$\frac{E_w}{V_w} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r d + 2s}, \quad (18)$$

където  $s$  е дебелината на бакелитния или стъкления електрод, а  $\epsilon_r$  е специфичната му диелектрична проницаемост.

Индуцираният заряд  $q_{ind}$  във външната верига може да се изчисли, като се интегрира (17) и се използва (16):

$$q_{ind} \simeq \frac{E_w}{V_w \eta} \langle Q_e(d) \rangle, \quad (19)$$

където  $\langle Q_e(d) \rangle$  е сумарният електричен заряд, събрал на анода.



Фигура 12: Линиите показват дрейфовата скорост в случай на различни газове при температура 296,15 K и налягане 1013 mbar, изчислени с програмата Magboltz [64] [52]. Кръгчетата показват експерименталните стойности [52] [65].

Камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS се състоят от два газови процепа, между които са разположени сигналните електроди. Поради тази причина зарядът индуциран върху сигналните електроди е сума от зарядите, които биха се индуцирали поотделно от всеки от газовите процепи [55] [58].

В случай на многопроцепна конфигурация, когато сигналните електроди са разположени върху пакет от  $n$  на брой газови процепи, за  $\frac{E_w}{V_w}$  имаме:

$$\frac{E_w}{V_w} = \frac{\epsilon_r}{n\epsilon_r d + (n+1)s} \quad (20)$$

От тук ясно се вижда едно от големите предимства на двупроцепната конфигурация. Ако параметрите на газовите процепи, като ширина, материал и дебелина на бакелитните електроди, газова смес, газово усилване и т.н. са едни и същи за една двупроцепна и една трипроцепна камера, то тогава за камера с три и повече процепа, съгласно формули (18) и (20)  $\frac{E_w}{V_w}$  има по-малка стойност. Т.е. даже и трите процепа да са дали принос, то индуцираният сигнал в случай на трипроцепна камера ще е по-малък от този на двупроцепна камера.

### 3.1.4 Зависимост на ефективността от прага на дискриминация на електрониката.

Да разгледаме въпроса с ефективността на камерите със съпротивителна плоскост [66].

Индукцираният заряд от един клъстер, прераснал в лавина се задава от:

$$q_{ind} = \frac{q_{el}}{\eta d} k n_0 M [e^{\eta(d-x_0)} - 1] \simeq \frac{q_{el}}{\eta d} k n_0 M e^{\eta(d-x_0)}, \quad (21)$$

където  $M$  е фактор (11), отчитащ флукутациите на лавината, със средна стойност 1 [55] и сме въвели означение  $k = \frac{E_w d}{V_w}$ . За да бъде регистрирано събитието трябва да е изпълнено условието

$$q_{ind} > q_{thr}, \quad (22)$$

където  $q_{thr}$  е прага на електрониката на камерата. Това условие може да се препише по следния начин:

$$x_0 < d - \frac{1}{\eta} \ln\left(\frac{q_{thr}}{B} + 1\right), \quad (23)$$

където  $B = \frac{q_{el} k M n_0}{\eta d}$ .

Разглеждаме най-близкия до катода клъстер, който дава най-голям принос към индуцирания заряд.  $x_0$  е разпределено експоненциално (13):

$$P(x_0) = \lambda e^{-\lambda x_0} \quad (24)$$

Ето защо вероятността  $x_0$  да удоволства (23) се получава, интегрирайки (24) в граници от 0 до  $d - \frac{1}{\eta} \ln\left(\frac{q_{thr}}{B} + 1\right)$

Това е точно ефективността  $\epsilon$  на камерата:

$$\epsilon = 1 - e^{-\lambda[d - \frac{1}{\eta} \ln(\frac{q_{thr}}{B} + 1)]}, \quad (25)$$

в зависимост от прага  $q_{thr}$ .

Също така лесно може да се изведе зависимост на ефективността от прага, за  $n$  на брой клъстери, като всеки клъстер съдържа само един електрон [53]. В този случай се отчита вероятността всеки от електроните да рекомбинира или да бъде захванат и за ефективността се получава [53]:

$$\epsilon = 1 - e^{-(1 - \frac{\beta}{\alpha}) \frac{d}{\lambda}} \left[1 + \frac{\eta d}{q_{el} k} q_{thr}\right]^{\frac{1}{\alpha \lambda}} \quad (26)$$

## 3.2 Видове камери със съпротивителна плоскост

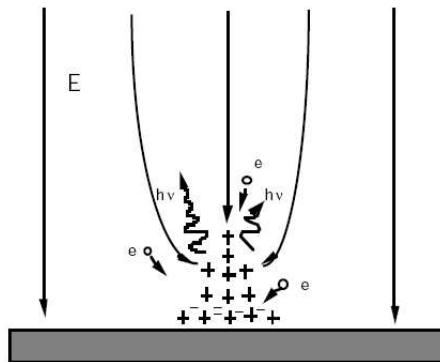
Камерите със съпротивителна плоскост могат да се разделят условно на няколко типа:

- според **физическите процеси**, които протичат в тях: камери, работещи в стримерен или лавинен режим
- според **предназначението си**: за измерване на време на прелитане (TOF<sup>16</sup>) или за формиране на тригер
- според **броя на газовите процепи**: еднопроцепни, двупроцепни и многопроцепни
- според **материала**: стъклени или бакелитни плоскости
- според **размера на газовия процеп**
- според **размера на сигналните електроди**

Всеки от тези типове има свое приложение, свои предимства и недостатъци.

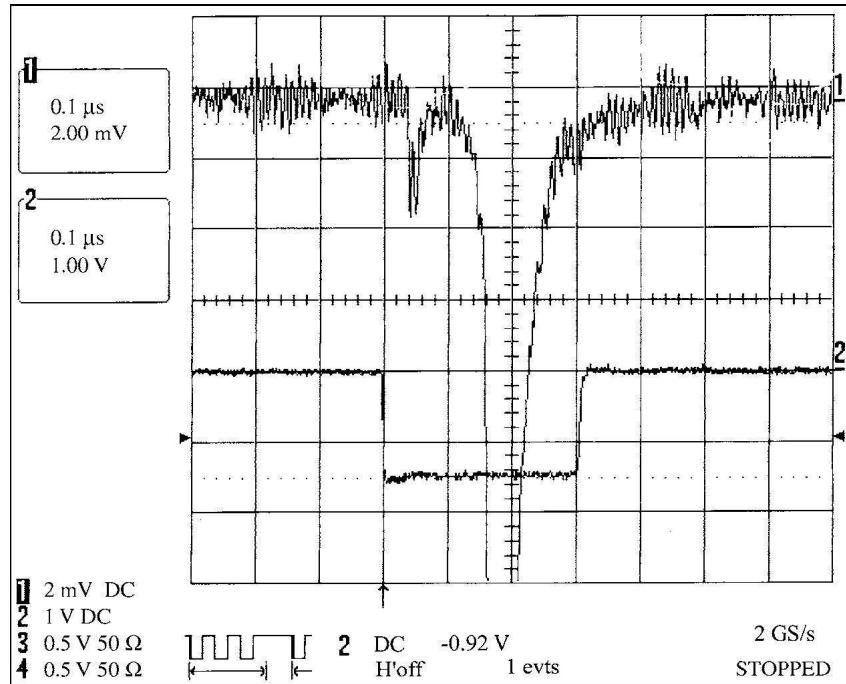
### 3.2.1 Стримерен и лавинен режим на работа

От историческа гледна точка, най-напред са разработени камерите със съпротивителна плоскост, работещи в стримерен режим [42]. В стримерен режим сигналът индуциран върху сигналните електроди е относително голям - между  $50 \text{ pC}$  [67] и няколко  $nC$  [68]. Поради тази причина не е необходим предусилвател и сигналът може да се подаде директно на дискриминатор, който да формира логически сигнал. Следователно електрониката, необходима за снемане на сигнал от камери, работещи в стримерен режим е сравнително проста и евтина [69]. Недостатъкът на този режим на работа е, че способността на камерите да работят при големи натоварвания, т.е. големи потоци ионизиращи частици, до около няколкостотин  $\text{Hz/cm}^2$  е ограничена.



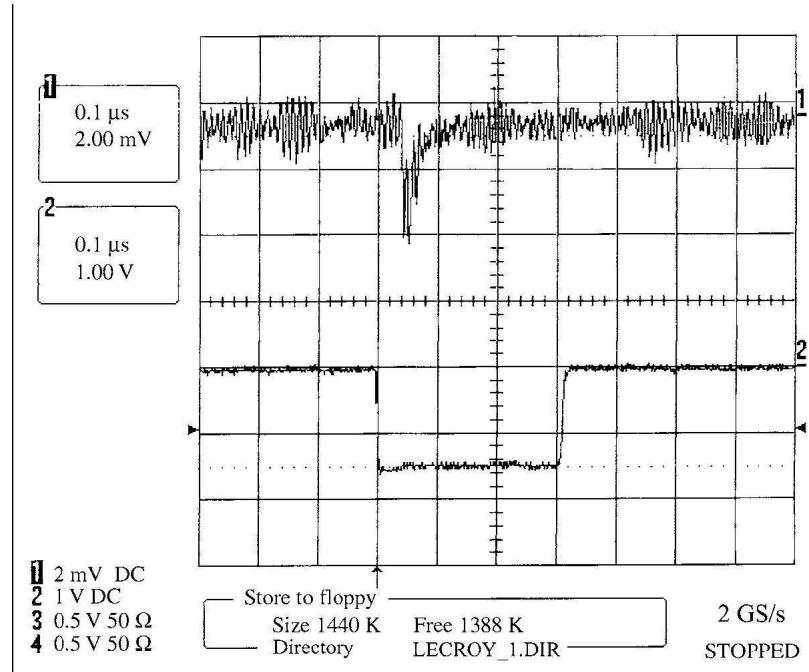
Фигура 13: Формиране на стример. Лавината при своето разпространение излъчва фотони, те избиват електрони, които дрейфат към лавината [86].

<sup>16</sup>TOF - време на прелитане от англ. Time of flight



Фигура 14: Лавинен и стримерен сигнал от сигнален електрод на камера със съпротивителна плоскост, наблюдаван с помошта на цифров осцилоскоп. Работната газова смес е  $C_2H_2F_4$  (95%),  $iso-C_4H_{10}$  (5%) и подаденото високо напрежение е  $10,5\text{ kV}$ . Лавинен сигнал с амплитуда около  $4\text{ mV}$ , заедно със стримерен сигнал с амплитуда повече от  $14\text{ mV}$  (горен лъч на осцилоскопа). Тригърн сигнал (долен лъч на осцилоскопа) [87].

Стримерът представлява образуването на тънка плазмена “нишка” в газа. Под действие, например, на ионизиращо лъчение в газовия обем се създава двойка електрон - положителен ион. Те започват да дрейфат под действието на приложеното външно поле, съответно към анода и катода. Електронът увеличава своята енергия, избива друг електрон и се получава лавина. Развитието на стримера започва като развитие на лавина, но ако електричното поле е достатъчно голямо, фотоните също дават принос при развитието на лавината и тя прераства в стример. При големи усилвания в газовия детектор възникват две промени: едната е, че фотоните започват да дават принос към развитието на лавината, а другата, че пространственият заряд в лавината става достатъчен, за да смути външното електрично поле [86]. В резултат на това, photoелектрони извън лавината започват да дрейфат към нея (фиг. 13). Това може да предизвика нарастване на лавината във всички посоки и формиране на стример. Този процес се проявява при някакъв заряд на лавината (обикновено  $10^8$  електрона), отговарящ приблизително на зарядовата плътност, при която полето на пространствените заряди става сравнимо с приложеното външно поле. Тази стойност на заряда е известна като условие на Ретър (Raether) и е характерна за плоско-паралелна геометрия на детекторите при налягане на газа  $\sim 1\text{ atm}$  [88], [89].



Фигура 15: Лавинен сигнал от сигнален електрод на камера със съпротивителна плоскост, наблюдаван с помошта на цифров осцилоскоп. Работната газова смес е  $C_2H_2F_4$  (95%),  $iso-C_4H_{10}$  (5%), а подаденото високо напрежение е  $10,5\text{ kV}$ . Лавинен сигнал (горен лъч на осцилоскопа) и тригераен сигнал (долен лъч на осцилоскопа) [87].

Ретър е предложил [88] два възможни механизма, които обясняват формирането на стример. Според единият механизъм, лавината при своето разпространение може да излъчи фотони, които да избият електрони от повърхността на катода, които от своя страна да се ускорят и да предизвикат лавини, които в последствие да се превърнат в стример. Експериментално на сигналните електроди се наблюдава лавинен сигнал, отговарящ на първоначалната лавина, който предшества сигнала, дължащ се на стримера (фиг. 14). Стримерният сигнал може да закъсне до  $100\text{ ns}$  спрямо предшестващия лавинен импулс (фиг. 14). Образуването на няколко лавини, които да преминат в стример е възможно, същото така и поради висок интензитет на ионизиращото лъчение. При втория механизъм самата лавина прераства в стример.

Развитие на електронна лавина под действието на електрично поле, може да се осъществи практически във всеки газ. Изборът на подходяща газова смес в действителност се ограничава значително от специфични експериментални ограничения [50].

Лавинното усиливане настъпва в благородните газове при доста по-малки

стойностти на приложеното електрично поле, отколкото при комплексните молекули. Това е следствие от възможността на комплексните молекули да отдават енергия без да се ионизират. Възбудените благородни газове могат да се върнат в основно състояние само, чрез излъчване на фотон [50].

Многоатомните молекули, особено, ако имат повече от четири атома имат голям брой “неизлъчващи” възбудени състояния (ротационни и вибрационни), което позволява поглъщането на фотони в широк енергетичен интервал. Това е общо свойство на повечето органични съединения във въглеводородните и алкохолните семейства, а също така и на някои неорганични съединения, като фреоните,  $CO_2$ ,  $BF_2$  и други. Молекулите губят излишната енергия, чрез еластични сблъсъци или чрез дисоциация до по-прости радикали. Вторична емисия е малко вероятна вслучай когато многоатомна ионизирана молекула се неутрализира на катода. При неутрализацията, радикалите рекомбинират или в по-прости молекули (дисоциация) или формират по-сложни комплекси (полимеризация). Добрата абсорбция на фотони и подтискането на вторични емисии позволява да се достигне голямо газово усилване преди да е настъпил разряд [50].

Гасящият ефект на многоатомните газове, по правило се увеличава с броя атоми в молекулата. Изобутанът  $C_4H_{10}$  често се използва за стабилизиране работата на детекторите при голямо газово усилване [50].

Електронегативните газове, като например фреоните, освен че могат да поглъщат фотони, могат и да захващат свободни електрони, формирайки негативни иони, които от своя страна не могат да инициират лавина [50].

В детектори с метални електроди значителна част от събрания в детектора заряд ще се разреди чрез искра. В случай на камера със съпротивителна плоскост, обаче, локалното зареждане със заряди на съпротивителния електрод значително ще попречи на преминаването на искра. В случай на фреон базирана газова смес, електричният заряд освободен от искра е много малък  $\sim 1 pC$  [86].

Камери със съпротивителна плоскост, работещи в стримерен режим са намерили приложение в експериментите L3 в ЦЕРН [70] [71], BABAR в SLAC (Стандфордски линеен ускорител) [72] и BELLE на ускорителят KEK (Япония) [73].

За съжаление работата на тези камери на експериментите L3, BABAR и BELLE не се е оказала безпроблемна [74] [75] [76]. Като особено драстичен е случаят с BABAR, където ефективността на камерите започва да намалява със застрашителни темпове, а токът на тъмно<sup>17</sup> през камерата започва да расте [77] [78] [79]. Причината се оказва различането на маслото с което е обработена външната

---

<sup>17</sup> ток на тъмно (англ. dark current) - представлява електрическият ток, преминаващ през камерата, даже през нея да не преминава ионизиращо лъчение. Понятието е взаимствано от фотодетекторните устройства.

страна на бакелитните електроди. Това масло се е разтекло и е образувало капчици, сталагмити и сталактити в активния обем на детектора. Една от основните причини за различането на маслото е работата на камерите със съпротивителна плоскост при сравнително високи температури - над  $30^{\circ}C$ .

Камерите на експеримента BELLE са със стъклени електроди. Тръбите на газовата система са пропускали влага от атмосферата. Под действието на плазмата, възникнала благодарение на разрядите в активния обем на детектора, фреонът ( $C_2H_2F_4$ ) и водните пари образуват флуороводородна киселина (HF). Киселината взаимодейства със стъклените електроди и ги уврежда, което от своя страна води до увеличаване на тока, консумиран от камерата и намаляване на ефективността.

Камерите със съпротивителна плоскост в мюонната система на експеримента ALICE [80] [81], който е един от експериментите, поставен на ускорителя LHC, по проект ще работят в стримерен режим. ALICE използва и камери със съпротивителна плоскост, работещи в лавинен режим, но те са част от системата на експеримента за измерване на време на прелитане.

В последно време, поради ограничените спомогности за работа при голямо натоварване, камери със съпротивителна плоскост, работещи в стримерен режим се прилагат най-вече в експерименти с космически лъчи, където потокът ионизиращи частици не е толкова голям. Например експериментите ARGO [68] в Тибет (Китай) [82], OPERA [83] и MONOLITH [84] в лабораторията Гран Сасо (Италия). Експериментът ARGO, също прави опити и за използване на камери, работещи в лавинен режим [85].

Камерите, работещи в лавинен режим, могат да работят при по-голям поток ионизиращи частици, но сигналът е с по-малка амплитуда (фиг. 15), което налага използването на по-сложна електроника, с много чувствителни предусилватели и усилватели. Тъй като в лавинен режим на работа има вероятност от възникване на стримери [90], то електрониката трябва да има много голям динамичен обхват и/или да е защитена от големия стримерен сигнал.

Тъй като възникването на стримери в камери, работещи в лавинен режим е нежелателно, то към газовата смес се добавят газове, подтиксащи развитието на стримери. Това са най-вече електроотрицателни газове [91] [92]. За тази цел експериментът CMS, ще ползва серен хексафлуорид ( $SF_6$ ).

Камери със съпротивителна плоскост, работещи в лавинен режим ще се ползват освен от експеримента CMS също и в мюонната система на ATLAS [93] и в системата за измерване време на прелитане (TOF) на експеримента ALICE [94]. RPC камери работещи в лавинен режим са ползвани успешно в TOF системата на HARP [95], [96].

### 3.2.2 Камерите със съпротивителна плоскост, като тригерни детектори и детектори за измерване на време на прелитане

Във физиката на елементарните части камерите със съпротивителни плоскости намират приложение най-вече като специализирани тригерни детектори или като детектори за измерване на време на прелитане.

Поради добрата си времева разделителна способност ( $\sim 1 \text{ ns}$ ) камерите със съпротивителна плоскост могат да се използват, като специализирани тригерни детектори на експерименти, провеждани на съвременните ускорители. Експериментите CMS и ATLAS ще използват камери със съпротивителна плоскост с газови процепи с размер  $2 \text{ mm}$  за тригерни детектори. Прилаганите високи напрежения достигат до  $10 \text{ kV}$  и следователно интензитета на електричното поле достига до  $50 \text{ kV/cm}$ . Камерите със съпротивителна плоскост, преданзанчени за тригерни детектори се изработват най-често с бакелитни електроди.

Камерите със съпротивителна плоскост използвани в TOF приложения [97] имат най-често газов процеп с размер от  $0,2$  до  $0,3 \text{ mm}$  в многопроцепна конфигурация [98]. TOF системите, използващи многопроцепните камерите със съпротивителна плоскост имат сходни характеристики с TOF системите, използващи сцинтилационни детектори, но са по-евтини от тях [99].

За TOF приложения обикновено се използват камери със съпротивителна плоскост със стъклени електроди. Приложеното електрично поле е по-голямо от случая на тригерни RPC и е около  $100 \text{ kV/cm}$ .

Експериментът ALICE ще използва за своята TOF система многопроцепни камери със съпротивителна плоскост с размер на процепите  $0,25 \text{ mm}$ , работещи в лавинен режим [94] [100] и електрично поле около  $100 \text{ kV/cm}$ , като използвана газова смес е следната:  $C_2F_4H_2(90\%), iso-C_4H_{10}(5\%), SF_6(5\%)$ . Експериментът HARP също разполага с TOF система, изградена от камери със съпротивителна плоскост [101].

В общия случай камерите със съпротивителна плоскост за TOF приложения са многопроцепни, ефективността им достига до  $99\%$ , а разделителната им способност по време до  $50 \text{ ps}$  [97][101][102][103].

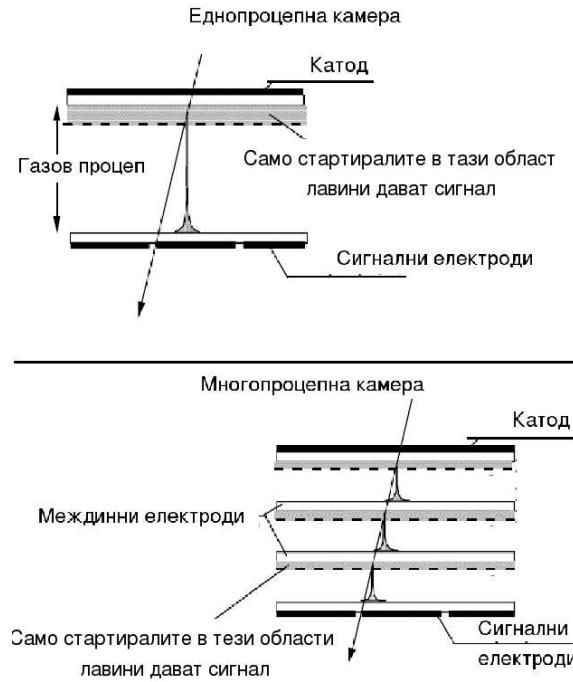
### 3.2.3 Еднопроцепни, двупроцепни и многопроцепни камери със съпротивителна плоскост

Камерите със съпротивителна плоскост са разработени оригинално, като детектори с една газова междина, т.е. еднопроцепна конструкция. На по-късен етап се разработват камери със съпротивителна плоскост с два и повече газови процепа.

При двупроцепната конструкция [104], сигналните електроди обикновено

са разположени между двета газови процепа. Предимството е по-големият сигнал, индуциран върху сигналните електроди и от там по-голямата ефективност. Трябва да отбележим, че в случай на двупроцепната конфигурация, ефективността не е просто логическо ИЛИ от сигналите на двета процепа, а е по-голяма. Това се дължи на факта, че може да се случи така, че при преминаване на йонизираща частица през двета процепа, лавините и в единия и в другия процеп по отделно да индуцират заряд върху сигналния електрод под прага на електрониката, но сумата от двета индуцирани заряда да е над този праг. В този случай, ако работим в еднопроцепна конфигурация, ние няма да успеем да регистрираме йонизиращата частица, но в случай на двупроцепна конфигурация, ще я регистрираме. Този ефект беше наблюдаван при изследването RPC камери-те за експеримента CMS [105]. Ефективността на различните RPC конфигурации е дискутирана подробно в [55].

Многопроцепни камери [98] със съпротивителна плоскост са предложена за първи път от членове на проекта LAA [106] през 1996 г. с цел да се подобри с близо един порядък времевата разделителна способност на камерите със съпротивителна плоскост, като едновременно с това се запази тяхната ефективност.



Фигура 16: Сравнение на RPC камера с широк процеп и многопроцепна RPC камера. Виждат се областите в които първичните кълстери дават принос към сигнала [98].

Газовият обем, в камерите със съпротивителна плоскост, служи едновре-

менно за активен обем, в които се формират, под действието на йонизиращото лъчение, първичните клъстери и за газово усилване. Както беше показано (6), броят на електроните в лавината, а от там и индуцираният върху сигналните електроди сигнал, зависи от положението на първичния клъстер. Следователно, електрониката на камерата детектира лавини, създадени от първични клъстери, намиращи се в някаква неголяма област около катода. За газов процеп с ширина  $8\text{ mm}$  тази област е ограничена на около  $1 - 1,5\text{ mm}$  от катода. Тази неопределеност в положението на първичния клъстер води до вариации в предния фронт на сигнала. Ако широкият процеп е разделен на няколко по-тесни (фиг. 16), то тогава областта около всеки катод, в която първичните клъстери ще дават принос при формиране на сигнала ще е много по-малка ( $\sim 0,5\text{ mm}$ ) и следователно сигналът ще варира по-малко във времето [98]. Благодарение на това времевата разделителна способност се подобрява значително.

### 3.2.4 Материал: стъклени или бакелитни плоскости

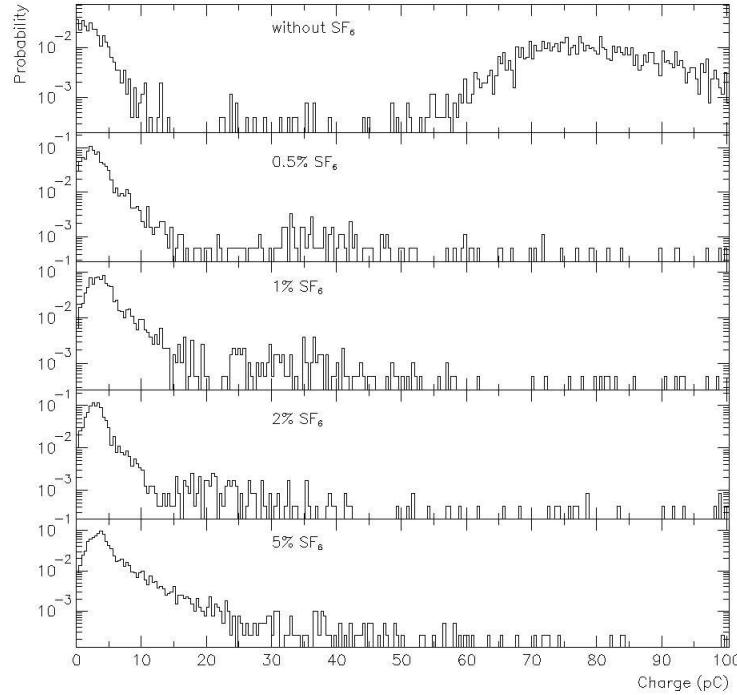
От една страна съпротивлението на електродите подтиска възникването на искри и стримери в обема на камерата, но от друга страна твърде голямото съпротивление на електродите влошава характеристиките на камерата при работа в условия на голям поток йонизиращи частици. Ако потокът йонизиращи частици върху камерата е много голям, т.е. камерата работи при голямо натоварване, то в този случай отделеният в камерата заряд е голям. Поради голямото съпротивление, натрупаният в активния обем заряд не може бързо да се снеме през веригата на високоволтовото захранване, което води до увеличаване на мъртвото време, а от там и до намаляване на ефективността при големи натоварвания на камерата. Поради тази причина се налага да се постигне компромис при подбора на материал за изработка на съпротивителните електроди. За тригерни приложения, особено за експериментите поставени на LHC, работоспособността при големи потоци от йонизиращи частици е много важна и поради тази причина електродите се изработват от бакелит, който има по-малко съпротивление от стъклото. За TOF приложения обикновено се използват стъклени електроди, тъй, като очакваният поток през детекторите не е много голям.

### 3.2.5 Размер на газовия процеп

Според размерът на процепа камерите със съпротивителна плоскост се делят основно на два типа - камери с тесен и камери с широк процеп [107].

При работа на камери със съпротивителна плоскост в лавинен режим е нежелателно наличието на стримери. Електрониката на камерите със съпротивителна плоскост, работещи в лавинен режим е снабдена с много чувствителни предусилвтели, така, че всеки стример, тъй като генерира голям сигнал, смушава голям участък от камерата. Стримерите могат да се подтиснат по два метода. Единият е като се използва газова смес с голямо процентно съдържание на газ, абсорбиращ ултравиолетовите лъчи, а също така и електронегативни газове. То-

ва най-често са различни видове фреон [91] [108] или серен хексафлуорид ( $SF_6$ ) [92] [109] - фиг. 17. Другият метод е да се увеличи ширината на газовия процеп [110], което намалява вероятността за възникване на стример.



Фигура 17: Разпределение на заряда, получен от сигнален електрод при едно и също високо напрежение, но различна газова смес. Газовата смес съдържа  $C_2H_2F_4$ , *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>* и  $SF_6$ . Процентното съдържание на *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>* е 3%, докато съдържанието на  $SF_6$  е различно за сметка на съдържанието на  $C_2H_2F_4$  [109]. Забелязва се, че при по-голямо съдържание на  $SF_6$  в газовата смес, зарядът е по-малък.

Камерите със съпротивителна плоскост с тесен газов процеп имат по-добра времева разделителна способност от тези с широк процеп. Камерите с широк процеп от своя страна имат по-добра способност за работа в случай на голям поток на йонизиращото лъчение. Това е така, поради по-малкия динамичен интервал от заряди на лавината и от там по-малък среден заряд произведен в газовия обем. Поради тази причина отделената мощност в газовия обем е доста по-малка от случая на камера с тесен процеп. Освен това камерите с широк процеп допускат по-голям механичен допуск при изработката.

### 3.2.6 Размер на сигналните електроди

Обикновено за тригерни или TOF цели необходимата пространствена разделителна способност е от порядъка на сантиметри. С цел разширяване кръга на

възможните приложения на камерите със съпротивителна плоскост са направени успешни опити за подобряване на пространствената им разделителна способност, като за сигнални електроди се използват така наречените микрострипове, които всъщност представляват много тесни сигнални електроди [111]. Достигната е пространствена разделителна способност от  $50 \mu m$  [112]. Възможно приложение на камерите със съпротивителна плоскост с подобни характеристики е конструирането на позитронно-емисионни томографи<sup>18</sup> апарати за медицински и фармакологични изследвания [113] [114].

### 3.3 Заключение

В главата е предложен принципът на работа на камерите със съпротивителна плоскост. Дадена е количествена оценка за индуцирания сигнал върху сигналните електроди, като са дискутиирани възможните статистически флуктуации в позицията на първичните клъстери и в броя на електроните в първичните клъстери. Разгледана е също така зависимостта от прага на електрониката на камерата. Показано е предимството на двупроцепната конструкция на камерата пред еднопроцепната и многопроцепната.

Представена е класификация на камерите със съпротивителна плоскост според техния режим на действие, приложение, брой и ширина на газовите процепи и материал на електродите, както и от кои експерименти се използват съответните камери.

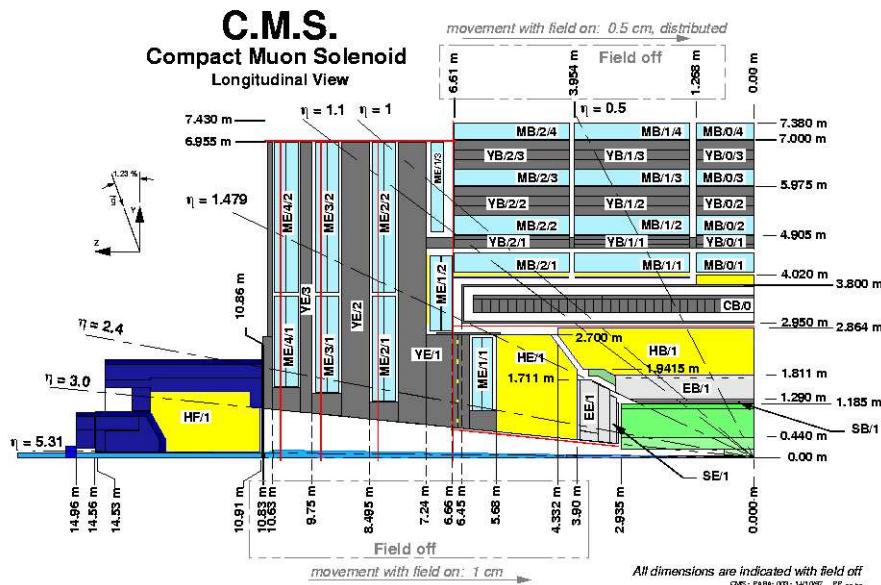
---

<sup>18</sup>англ. Positron Emission Tomography - Позитронно-емисионен томография

## 4 RPC камери на експеримента CMS

Представени са по-подробно камерите, използвани в централната част на експеримента CMS. Описана е накратко електрониката на камерите, а така също и технологията за конструиране на камерите.

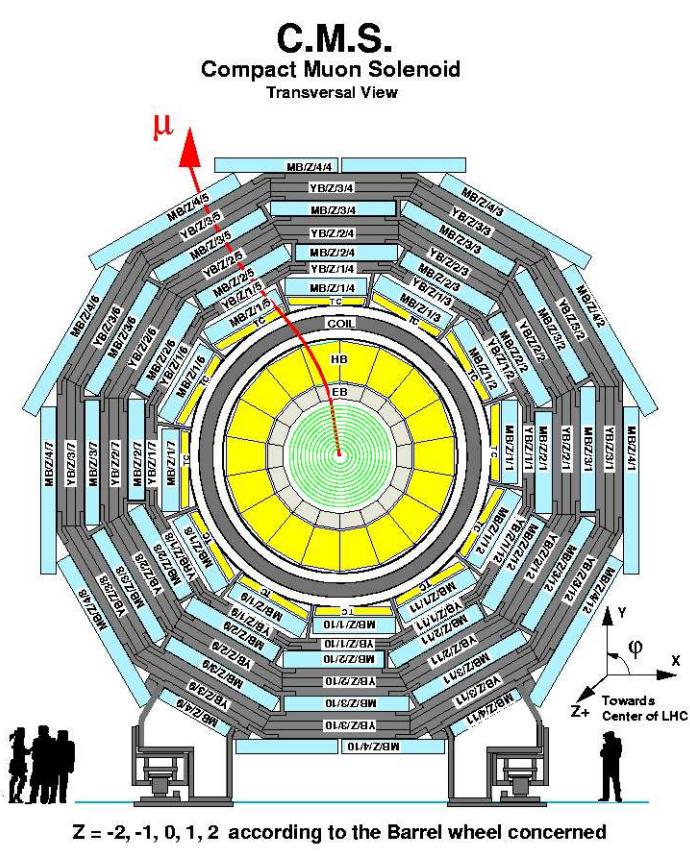
Камери със съпротивителна плоскост се използват, както в централната, така и в крайната част на експеримента CMS. Централната част на експеримента CMS се състои от пет пръстена (фиг. 18), всеки с по дванадесет сектора, т.е. всеки от пръстените има формата на дванадесет стенен цилиндър. В централната част на детектора, камерите с дрейфови тръби и камерите със съпротивителна плоскост, изграждащи мюонния спектрометър [38], са разположени в станции, наименувани MB1, MB2, MB3 и MB4 (фиг. 18, 19).



Фигура 18: Надлъжен разрез на детектора CMS. Вижда се 1/4 от детектора CMS [38].

Мюонните станции са разположени в четири концентрични окръжности, които в случая на камери със съпротивителна плоскост се наименуват RB1, RB2, RB3, RB4. Станцията RB1 е най-близо до спона, а RB4 е най-далече. Във всеки сектор, на всяка станция има по две камери със съпротивителна плоскост. Камерите със съпротивителна плоскост във всяка станция са сдвоени с камера с дрейфови тръби. В станциите RB3 и RB4 има един слой от камери със съпротивителна плоскост, докато в RB1 и RB2 има два слоя от камери със съпротивителна плоскост. Т.е. двете камери със съпротивителна плоскост от станции RB3 и RB4 са разположени от едната страна на съответната камерата с дрейфови тръби, а в RB1 и RB2 от двете страни на камерата с дрейфови тръби, така, че се образуват

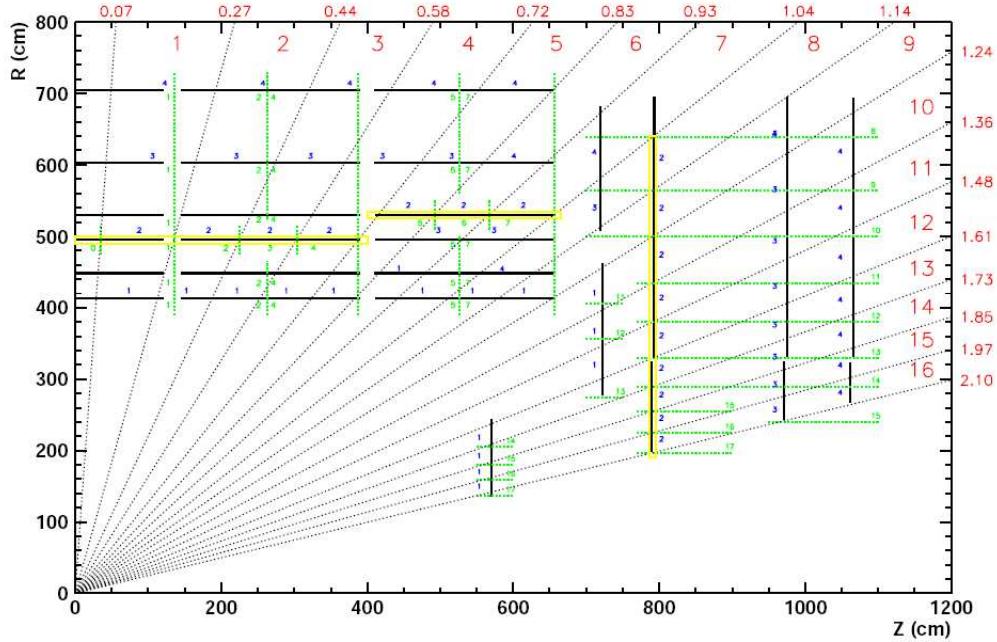
два слоя. Това се прави с цел увеличаване на ефективността на тригерния алгоритъм за мюони с малък  $P_T$ , тъй като тригерният алгоритъм изисква мюона да е оставил следа поне в 4 от 6 камери със съпротивителна плоскост, а мюоните с малък  $P_T$  не достигат до станциите RB3 и RB4.



Фигура 19: Напречен разрез на детектора CMS. [38].

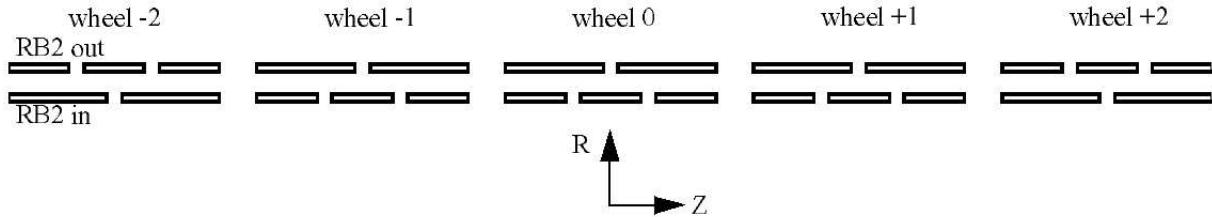
Мюонният тригер, ползващ камери със съпротивителна плоскост, се базира на сработванията на камерите, намиращи се поне в четири слоя. Тъй като мюоните с по-малък  $P_T$  не достигат до станции RB3 и RB4, се налага в централната част да се използват два различни набора от слоеве, съответно за мюони с голям и с малък  $P_T$ . Алгоритъмът за мюони с голям  $P_T$  използва един слой на всяка станция. Алгоритъмът за мюони с малък  $P_T$  се използват двата слоя в станция RB1 и двата слоя в RB2, т.е. отново се използват четири слоя. Тригерните алгоритми изискват да са сработили поне 3 от 4 детекторни слоя. Възможно е да се използват и алгоритми изискващи 4 от 6 или 5 от 6 слоя.

Всяка камера в станции RB1, RB3 и RB4 е разделена на две части - предна и задна, т.е. състоят се от два двойни процепа. RB2 камерите играят по-особена роля при формирането на тригера. Те служат за референтни камери и дефини-



Фигура 20: Мюонна система [115][116].

рат сегментацията на L1 тригера. Поради тази причина, част от RB2 камерите (фиг. 21) са разделени на три части - предна, централна и задна, т.е. състоят се от три двойни процепа. Един двоен газов процеп представлява на практика отделен детекторен модул, като два или три двойни газови процепи, поместени в обща механична конструкция и ползваващи общо захранване, охлаждане и газова система формират една камера.



Фигура 21: Камерите от тип RB2in са разположени по-близо до снопа, а камерите от тип RB2out са разположени по-далече. Референтните камери се състоят от три двойни процепа във всеки от петте пръстена [115] [117]. Пръстените са наречени wheel-2, wheel-1, wheel 0, wheel +1 и wheel +2.

В таблица (4) са дадени различни характеристики на отделните типове камери, като например тяхната ширина, броя на сигналните електроди за един

тип камера	ширина на камерата [mm]	брой електроди за двоен процеп	ширина на електродите [mm]	максимално отклонение от проективната геометрия	бр. платки × брой електроди на платка	брой двойни процепи от тип
RB1 in	2080	90	22.7	68 %	6 × 15	120
RB1 out	2080	84	24.3	102 %	6 × 14	120
RB2 in	2500	90	27.3	40 %	6 × 15	156
RB2 out	2500	84	29.3	20 %	6 × 14	144
RB3	1500	42	34.8	104 %	3 × 14	240
RB4/1-	2000	48	40.8	34 %	3 × 16	80
RB4/1+	2000	48	40.8	156 %	3 × 16	80
RB4/11	2000	48	40.8	161 %	3 × 16	20
RB4/4- -	1500	36	40.6	124 %	3 × 12	20
RB4/4-	1500	36	40.6	94 %	3 × 12	20
RB4/10	2500	60	41.0	94 %	5 × 12	20

Таблица 4: В таблицата са дадени вида на камерите, съответната им ширина, броя на електродите за един двоен процеп, ширината на електродите, максималното отклонение от проективната геометрия, броят платки на детекторната електроника и броят сигнални електроди, свързани към една платка, общият брой двойни процепи от съответният тип в експеримента CMS [115].

двоен процеп, ширината на сигналните електроди, броят платки на детекторната електроника и броят сигнални електроди свързани към една платка, общият брой двойни процепи от съответният тип в експеримента CMS [115]. Дадено е и относителното отклонението от проективната геометрия.

Най-добра геометрия, от гледна точка на тригера, е проективната геометрия, където сигналните електроди са с един и същ ъглов размер  $\delta = 5/16^\circ$ . Това означава, че всеки сигнален електрод трябва да има различен линеен размер. От геометрични съображения лесно може да се види, че размерът  $d_k$  на  $k$ -тия сигнален електрод се определя по следната формула:

$$d_k = R \cdot \operatorname{tg}(k\delta - \phi_{min}) - \operatorname{tg}[(k+1)\delta - \phi_{min}], \quad (27)$$

където  $R$  е разстоянието, на което се намира камерата от оста на снопа, а  $\phi_{min}$  е полярната координата на единия край на камерата. Реализирането на камера на която, всеки сигнален електрод е с различен размер води до редица технически трудности по време на производството и експлоатацията ѝ. За това е избрана по-проста реализация, при която всички сигнални електроди в една камера са с еднаква ширина, която приблизително е равна на  $\delta = 5/16^\circ$ . Това внася отклонение от проективната геометрия. Отклонението може да се дефинира, като разликата между левия край на  $k$ -тия сигнален електрод и фиксирана мрежа  $l \times \delta$ , където  $\delta = 5/16^\circ$ . Ъгловото отклонение  $dev_k$  на  $k$ -тия сигнален електрод се

пресмята по следната формула:

$$dev_k = \arctg \frac{kd - Y_{min}}{R} - l\delta, \quad (28)$$

където  $d$  е ширината на сигналият електрод, а  $Y_{min}$  е позицията на най-левият сигнален електрод в камерата. Може да се дефинира относително максимално отклонение  $dev_{max}$  като съотношението между максималното отклонение за камерата към  $\delta = 5/16^\circ$ , което също е представено в таблица (4) [115].

В мюонните станции, където и двете камери със съпротивителна плоскост са разположени от едната страна на дрейфовата камера, само една от камерите е свързана директно към газовата и охладителната система на експеримента CMS. Тази камера има допълнителни изходи на газовата и охладителната система, през които се подава газ и охлаждаща течност към другата камера в станцията. Захранването на платките на детекторната електроника, четенето и настройването на праговете на дискриминаторите и контрола на температурата на платките се извършва от разпределителна платка. Не всяка камера разполага с разпределителна платка. В някои станции една разпределителна платка захранва електрониката на две камери, както е например в станциите MB3 и MB4, с изключение секторите 9, 10 и 11 за MB4.

## 4.1 Електроника

Сигналите от камерите със съпротивителна плоскост се снемат посредством зарядочувствителни предусилватели, свързани към сигналните електроди. Следва кратко описание на детекторната електроника, разработена специално за камерите със съпротивителна плоскост на експеримента CMS.

## 4.2 Детекторна електроника

Формата на сигнала, индуциран от един клъстер, с дрейфова скорост на електроните от порядъка на  $130 \mu m/ns$  и газова времеконстанта<sup>19</sup>  $\tau \sim 1 ns$ , за фреон базирани газови смеси, може да се опише със следната функция:  $I(t) = I_0 e^{\frac{t}{\tau}}$ , където  $0 \leq t \leq 15 ns$ , а  $\tau$  е времеконстантата на газа. Очакваният динамичен обхват е между  $20 fC$  и  $20 pC$ .

Сигналните електроди на камерите със съпротивителна плоскост в централната част на детектора CMS имат дължина<sup>20</sup> между  $762 mm$  и  $1253 mm$  и

---

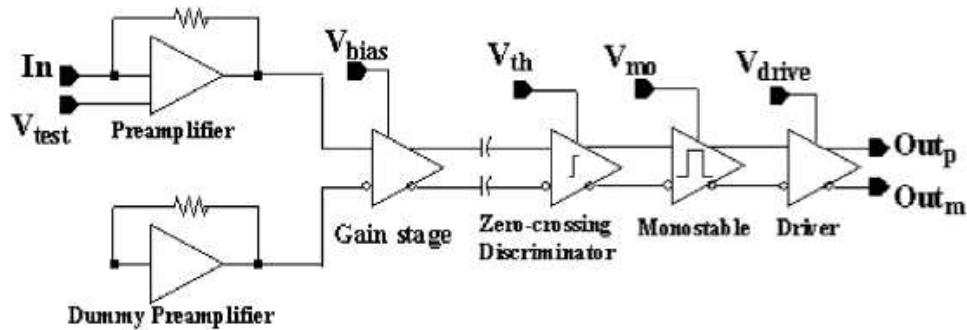
<sup>19</sup>Под времеконстанта на газа се разбира реципрочната стойност на произведението на коефициента на Таунсенд и дрейфовата скорост [118]

<sup>20</sup>Дължините на сигналните електроди за газовите процепи на камерите от тип RB3/2 са съответно  $853 mm$  за предния,  $790 mm$  за централния и  $762 mm$  за задния газов процеп. Дължините на сигналните електроди за всички останали типове камери са съответно  $1253 mm$  за предните и  $1162 mm$  за задните газови процепи.

ширина между 2 и 4 см, в зависимост от типа на камерата, т.е. позицията в детектора - виж табл. (4). Характеристичното съпротивление на сигналните електроди е съответно между 15 и 40  $\Omega$ , а капацитетът им е между  $\sim 160$  и  $\sim 420 \text{ pF}$ . Времето на нарастване на индуцираният сигнал е от порядъка на 1 ns и е по-късо от времето, за което сигналът преминава по сигналните електроди. Поради тази причина сигналните електроди се държат, като линия с разпределени параметри, което налага необходимостта те да се терминират по подходящ начин, за да се избегнат отраженията на сигнала. Единият край на сигналния електрод е натоварен с входното съпротивление на предусилвателя, а другият с подходящо съпротивление (резистор).

#### 4.2.1 Описание на електрическата верига

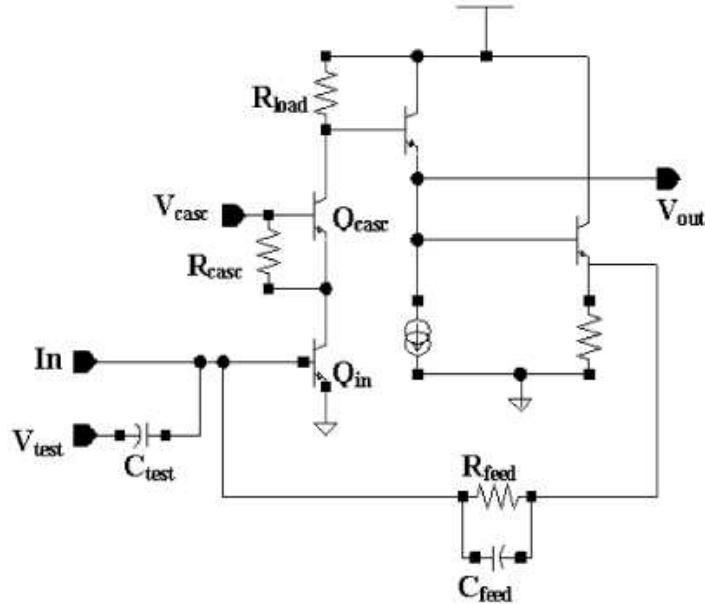
Веригата се състои от осем идентични канала, всеки от които има предусилвател, [119] дискриминатор на нулево равнище, моновибратор и изходно стъпало формиращо диференциален сигнал. Принципната схема на един канал е показана на фиг. 23. Връзката между сигналните електроди и предусилвателя е променливотокова, понеже терминираното съпротивление е малко и има различна стойност за различните типове камери. Необходимото захранващо напрежение е +5 V и земя. Консумираната мощност е около 45 mW на канал.



Фигура 22: Принципна схема на един канал от платката на детекторната електроника [119]

Предусилвателното стъпало е реализирано с помощта на два транзистора (фиг. 23). Входният импеданс е 15  $\Omega$  при честотата на очаквания сигнал, т.е. между 100 и 200 MHz и е разчетен да отговаря на характеристичното съпротивление в най-критичния случай - при ширина на сигналните електроди  $\sim 4 \text{ cm}$ . В останалите случаи се свързват допълнителни съпротивления, за да се натовари предусилвателят със съответното характеристично съпротивление. Зарядовата чувствителност е  $0,5 \text{ mV/fC}$ . С цел да се компенсират постояннотоковите вариации на предусилвателя е добавен допълнителен предусилвател. Както се

вижда на фиг. 23, двата предусилвателя се свързват с входовете на усилвателното стъпало.



Фигура 23: Принципна схема на един предусилвател [119]

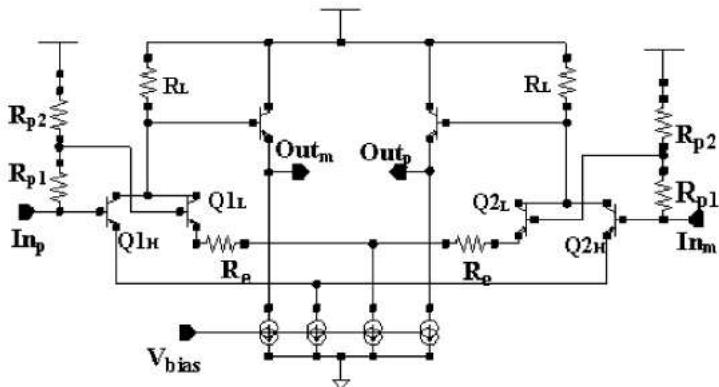
Принципната схема на усилвателното стъпало е представена на фиг. 24. Усилвателното стъпало е предвидено да работи в целия динамичен обхват без насищане, за да може да се използва дискриминация при пресичане на нулевото равнище<sup>21</sup> за привързване по време на сигнала от камерата.

Получаването на прецизна времева информация от камерите със съпротивителна плоскост е от критично значение при привързването по време на събитието към съответният сблъсък на частиците в ускорителя. Най-лесният метод за генериране на тригера импулс е, чрез формиране по преден фронт на сигнала. На практика се реализира, като сигналът се дискримирира с фиксиран праг. Този метод е прост за реализация, но при него няма много добра точност по време, защото имаме зависимост между времето на сработване и амплитудата на сигнала. В случая на камери със съпротивителна плоскост, където динамичният обхват варира на три порядъка ( $20 \text{ pC} - 20 \text{ fC}$ ) вариациите във времето са от порядъка на  $10 \text{ ns}$ .

По-добри резултати се получават, ако се използва дискриминатор на пресичане на нулевото равнище<sup>22</sup>, реализиран по следния начин: CR верига диференцира входния сигнал, в резултат на което се получава биполярен импулс, който

<sup>21</sup>англ. zero-crossing discrimination

<sup>22</sup>англ. zero-crossing discriminator



Фигура 24: Усилвателно стъпало [119]

пресича нулата в синхрон с максимума на амплитудата на входният сигнал [121]. В този случай изходният сигнал е привързан към максимума на амплитудата на входният сигнал и не зависи от амплитудата. Именно това техническо решение е приложено в платките на детекторната електроника за камерите със съ противителна плоскост за експеримента CMS.

Изходният сигнал на платките на детекторната електроника е LVDS<sup>23</sup>.

#### 4.2.2 Цифрова електроника на платките

Всяка от платките на детекторната електроника се свързва към разпределителната платка посредством  $I^2C$  шина. Захранването на детекторната електроника също се извършва от разпределителната платка. Разпределителната платка комуникира с детекторната електроника и може да получава информация за температурата и прага на електрониката, а така също може да настройва прага на електрониката.

### 4.3 Процедура за конструиране и контрол на качеството на камерите със съ противителна плоскост за централната част на експеримента CMS

Общият брой камери със съ противителна плоскост за централната част на експеримента CMS е 480 [33]. За тяхното изграждане са необходими 1020 двойни газови процепа.

Произвеждането на камера следва няколко стъпки:

---

<sup>23</sup>LVDS (Low Voltage Differential Signal) - нисковолтов диференциален сигнал [167]

- изработка на бакелитните електроди
- изработка на единични газови процепи за камерите със съпротивителна плоскост
- изработка на двойни газови процепи. Изработват се от два единични газови процепа, разположени един върху друг с една равнина сигнални електроди между тях
- монтаж на камера с два или три двойни газови процепа в зависимост от типа на камерата
- изследване на камерата с космически лъчи

#### 4.3.1 Производство на бакелита

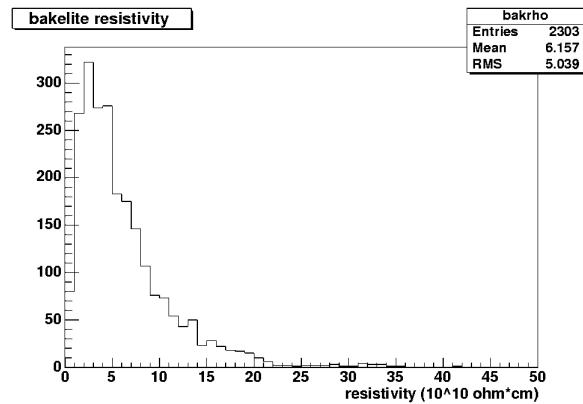
Бакелитните електроди за камерите със съпротивителна плоскост се произвеждат в предприятието PanPla (гр. Павия, Италия) [122]. Основният параметър, който трябва да се контролира по време на производството е обемното съпротивление на бакелитните електроди, защото то влияе върху работните характеристики на камерите. Про по-голямо съпротивление се увеличава времето за възстановяване на детектора и се намалява ефективността му при голям поток на йонизиращите частици. По-малкото съпротивление на бакелита, от своя страна, прави детектора по-нестабилен, тъй като се увеличава тока на тъмно и шума.

Съпротивлението на всяка бакелитна плоскост се измерва в девет различни точки. Използвани са различни експериментални методи за измерване на съпротивлението с цел да се намери най-добрия начин за измерване. При възприетата процедура се използват кръгли електроди с диаметър 5 cm, притискани към плоскостта на бакелита с бутало, върху което е поставена тежест с маса 70 kg. Подава се напрежение от 500 V и се измерва тока.

На фиг. 25 е показано разпределението на средното специфично обемно съпротивление на произведените плоскости. За конструирането на камерите са избрани плоскостите със специфично съпротивление в интервала  $1 \times 10^{10} \div 6 \times 10^{10} \Omega \text{cm}$ . Изчислено е и стандартното отклонение на деветте измервания за всяка плоскост. Разпределението на стандартното отклонение показва разлики от около 20 % на обемното съпротивление за една и съща бакелитна плоскост. Температурната зависимост на специфичното съпротивлението на бакелита е корегирана съгласно следната формула:

$$\rho / \rho_{20} = e^{(20-T^\circ)/7.8}, \quad (29)$$

където  $T^\circ$  е температурата измерена в градуси Целзий, а 7,8 е константа определена от данните получени при специализирани измервания.



Фигура 25: Разпределение на средното специфично обемно съпротивление на произведените бакелитни плоскости. Бакелитните плоскости се използват за конструиране на камери само, ако специфичното им съпротивление е между 1 и  $6 \times 10^{10} \Omega \text{cm}$  [122].

#### 4.3.2 Производство на единични и двойни газови процепи

Единичният газов процеп е газов обем, затворен между успоредни бакелитни електроди, поддържани на  $2 \text{ mm}$  разстояние един от друг, посредством решетка от цилиндрични ограничители, изработени от поликарбонат [122]. Цилиндричните ограждатели са разположени през  $10 \text{ cm}$ , във върховете на квадратна мрежа. Отстрани, газовият порцеп е затворен херметично с лайси, като само в ъглите има тръбички за подаване на газова смес. Върху външната повърхност на бакелитните електроди има нанесени графитни високоволтови електроди, покрити с изолационно фолио.

Основните стъпки при изработването на единичен газов процеп са следните [38]:

- бакелитните плоскости се изрязват до необходимите размери
- върху едната страна на плоскостите се нанася графитен слой с повърхностно съпротивление  $\sim 300 \frac{k\Omega}{\square}$ . За измерване на повърхностно съпротивление често се използва величината съпротивление върху квадрат -  $\frac{\Omega}{\square}$ . Тя представлява съпротивлението между срещуположните страни на който и да е квадрат върху повърхността.
- върху графитното покритие се залепва полиетиленово фолио *Mylar*<sup>®</sup> с дебелина  $0,3 \text{ mm}$  за високоволтова изолация
- две такива плоскости, заедно с ограничителите се слепват заедно, като графитния слой остава от външната страна. Отстрани се залепват широки около  $7 \text{ cm}$  лайси, за да затворят обема на газовия процеп

- след като изсъхне лепилото, в четирите тъгъла се монтират тръбичките на газовата система. Свързват се и проводниците за високо напрежение
- единчните газови процепи се продухват с аргон. Това спомага за отстраняване на евентуално запрашаване на вътрешната страна на сигналните електроди. Снема се волт-амперната характеристика на газовите процепи, като високото напрежение са подава бавно, на стъпки - тази процедура се нарича кондициониране. Газовите процепи се държат под напрежение в границите на  $2,1 - 2,2 \text{ kV}$  в продължение на 2-3 дни. През първият ден се наблюдава значително намаляване на тока, пропитащ през газовите процепи, след което стойността на тока се стабилизира и започва да следва промените на околната температура и атмосферното налягане. Целта на тази процедура е да се подобри вътрешната повърхност на бакелитните електроди. След тази процедура отново се снема волтамперна характеристика на газовия процеп.
- върху вътрешната страна на бакелитните електроди се нанася покритие от ленено масло. За тази цел газовите процепи се поставят в помещение с температура около  $40^\circ\text{C}$  и през тръбичките на газовата им система се пуска да тече ленено масло.

Единичните и двойните процепи се произвеждат от предприятието General Tecnica<sup>24</sup> в Коли, област Фросиноне, Италия. Плоскостите се разделят на две групи в зависимост от съпротивлението: група А - специфично съпротивление между  $1$  и  $3 \times 10^{10} \Omega\text{cm}$  и група Б - между  $3$  и  $6 \times 10^{10} \Omega\text{cm}$ .

Преди да се използва за изработване на двоен газов процеп, всеки единичен процеп се проверява за херметичност и за здравина на слепването на цилиндричните ограничители. Подава се също така и високо напрежение и се снема волт-амперна характеристика.

Херметичността се проверява, като изходите на газовия процеп се затварят. На входа на газовия процеп се подава газ със свръхналягане от  $5 \text{ mBar}$  ( $1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ) . Затваря се крана на входа на газовия процеп и се следи за стабилността на налягането за определено време. Газови процепи, от които има изтичане на газ, се бракуват.

Здравината на слепване на цилиндричните ограничители се проверява визуално, като в газовия процеп се подава свръхналягане от  $20 \text{ mBar}$ . На мястото на добре залепен цилиндричен ограничител се наблюдава вдълбнатина, а на мястото на отлепен ограничител се наблюдава издатина, която на натиск поддава. Газови процепи с отлепен дори само един цилиндричен ограничител се бракуват.

Най-накрая газовите процепи се продухват с газова смес ( $96\% \text{ } C_2H_2F_4$  и  $4\% \text{ iso-}C_4H_{10}$ ) и се изследват при високо напрежение до  $9,5 \text{ kV}$ . Газовите процепи се

---

<sup>24</sup><http://www.generaltecnica.it/>

използват, ако тока на тъмно е под  $5 \mu A$ . Броят на бракуваните газови процепи не е пренебрежим. Например от 1655 произведени газови процепа, 283 са бракувани, като 66% от бракуваните процепи са били с нарушена херметичност или с отлепени цилиндрични ограничители, а 34% са имали недопустимо голям ток.

И трите описани теста се повтарят с двойните газови процепи, като в частност високоволтовият тест се оказва критичен.

Двойният газов процеп е съставен от два единични газови процепа, разположени един върху друг, като положението на цилиндричните ограничителите от единия газов процеп съвпадат с положението на ограничителите от другия газов процеп. Между единичните газови процепи са поставят медни сигнални електроди. Газовите процепи и сигналните електроди се залепват, за да формират двоен газов процеп. Към високоволтовите електроди се свързват високоволтовите проводници. Цялата конструкция се екранира с медно фолио и се обвива в изолационно PET<sup>25</sup> фолио [122]. Към екранировката има свързан проводник, който служи за заземяване.



Фигура 26: Последствията предизвикани от разрядите между високоволтовите електроди, термиращите съпротивления и екранировката.

По време на производството на двойните процепи се запояват термиращите съпротивления на сигналните електроди, между сигналните електроди и земя. Тази процедура се оказа критична. В някои случаи при запояването се поврежда изолиращото фолио от *Mylar*<sup>®</sup>, което впоследствие довежда до разряди

<sup>25</sup>полиетиленов терефталат

между високоволтовите графитни електроди и екранировката, която е заземена - фиг. 26. Освен това, при съединяване на два процепа в един двоен процеп, ако фолиото *Mylar*<sup>®</sup> не е добре залепено, протича ток по ръбовете на процепите. За да се предотвратят подобни проблеми се използва се П-образно PET фолио, за да се подсили допълнително изолацията по ръба. В резултат на тази модификация средният ток на единичните процепи намалява от  $2,32 \mu A$  до  $0,83 \mu A$  при напрежение  $8 kV$ . Средно около 3% от двойните процепи са бракувани поради проблеми при теста с високо напрежение.

#### 4.3.3 Производство на камерите

Камерите със съпротивителна плоскост за централната част на експеримента CMS се изграждат от два или три двойни процепа, затворени в механична рамка. По време на монтажа камерите се оборудват с платки на детекторната електроника [119], кабели, тръби за газовата и охладителната системи. Камерите се слюбяват на няколко места: камери тип RB1 в предприятието HiTec, Неапол (Италия), RB2 и RB4 в General Technical и от тип RB3 в София и Бари [120].

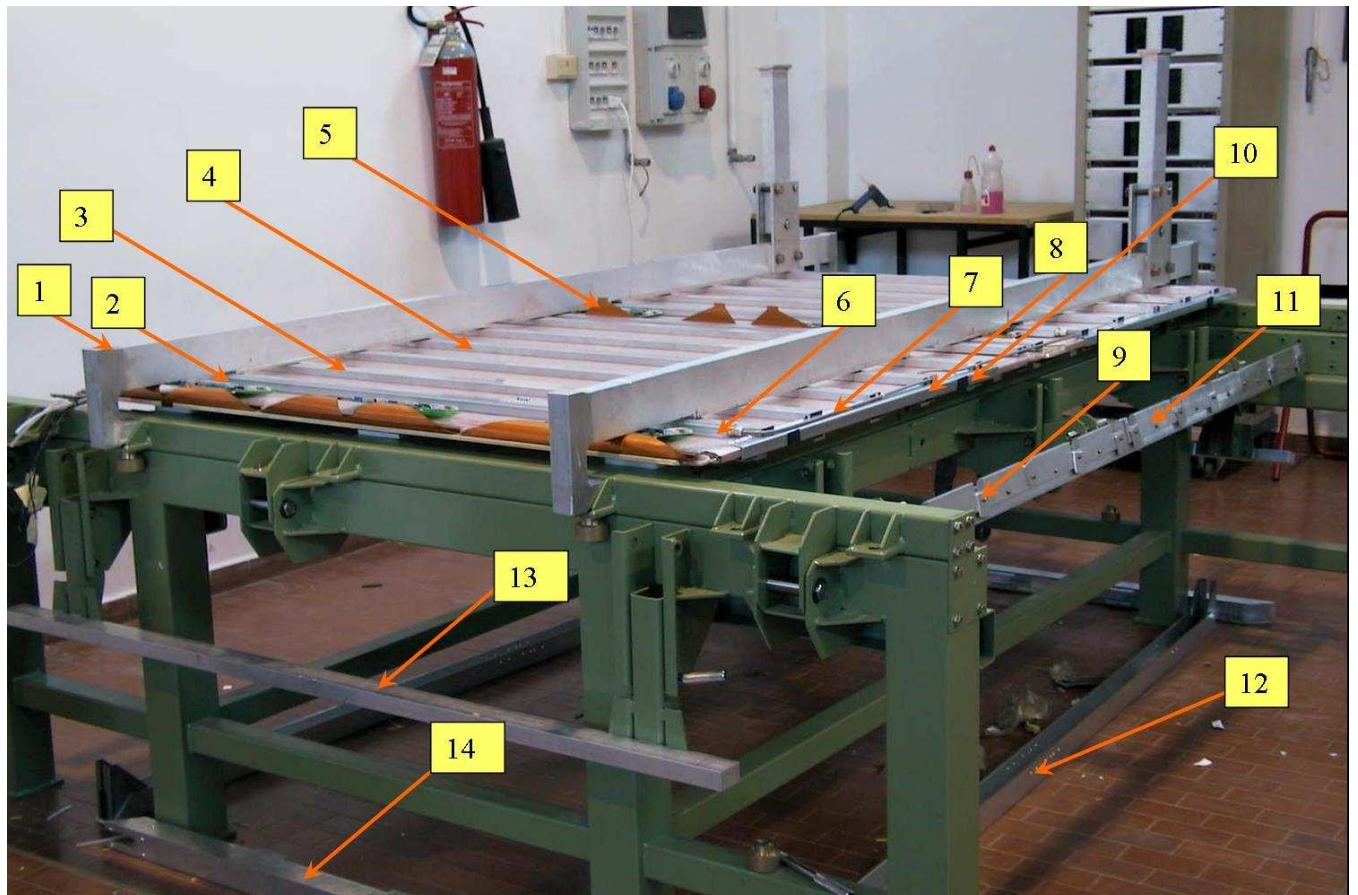
На всяко от гореизброените места се правят детайлни проверки на качеството на камерите. Херметичността на газовите процепи се проверява отново при свръхналягане  $5 mBar$  с газова смес или с аргон. Охладителната система се тества със сгътен въздух или азот, като свръхналягането е  $20 Bar$ . Камерата трябва да се продуха с подходяща газова смес<sup>26</sup>, докато през нея не преминат поне 10 нейни обема. След това се подва високо напрежение и се снема зависимостта на тока на тъмно като функция на приложеното напрежение. Измерва се също така и шума на всеки сигнален електрод, за да се провери за възможни проблеми. В HiTec токът на тъмно се измерва по 30 пъти при всяка промяна на високото напрежение. Високото напрежение се променя през 5 минути. Камерата е преминала успешно теста, ако средната стойност на тока от тридесетте измервания, при напрежение  $9,5 kV$  е по-малка от  $5 \mu A$  и ако стандартното отклонение е под  $1 \mu A$ . Много големи флуктуации на тока на тъмно ( $> 1 \mu A$ ) са измерени за камери с проблеми, като например разряди между високоволтовите електроди и земята.

Процедурата за слюбяване на камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS е разработена въз основа на опита, придобит по време на монтажа на първите 24 камери от тип RB3 в секцията на INFN<sup>27</sup> в гр. Бари [123] [124]. По време на монтажа се използва специална монтажна маса - фиг. 27. Процедурата за монтажа на останалите типове камери не се различава съществено, защото механичната конструкция и обслужващите системи на камерите в централната част на детектора CMS са сходни. Основната разлика е най-вече в

<sup>26</sup>  $C_2H_2F_4$  (96%) + *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>*(4%) или  $C_2H_2F_4$ (95%) + *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>*(4,5%) +  $SF_6$ (0,5%) в зависимост от възможностите на газовата система

<sup>27</sup> INFN (ИНФН) - Национален институт за ядрени изследвания на Р. Италия

размера на камерите. Подробни чертежи за сглобяване на камерите със съ противителна плоскост могат да се намерят в [125]. Има пет различни вида чертежи: за охладителната система (чертеж тип А), за газовата система (В), за носещите профили (С), за нисковолтовата система (Д) и за сигналите кабели (F).



Фигура 27: Монтажна маса за сглобяване на камери: 1) притискаща греда на масата; 2) платка на детекторната електроника; 3) огънат профил; 4) преден двоен процеп; 5) каптон; 6) охладителна система; 7) тръба от охладителната система; 8) алуминиева П-образна щипка; 9) плоскост на страничния държател на монтажната маса; 10) гумен ограничител; 11) и 13) странични ограничители на монтажната маса; 12) и 14) странични П-профили;

Информацията относно конструкцията, компонентите и тестовете на камерите трябва да се съхрани с цел улесняване на бъдещата поддръжка и експлоатация на камерите. Поради мащаба на проекта, информацията се съхранява в специализирана база данни, разработена на основата на MySQL [126]. Базата данни е достъпна чрез Интернет на следните адреси: <http://www.ba.infn.it/rpc> и <http://webcms.ba.infn.it/rpc>

По време на монтажа на камерите се попълва специален “Протокол за контрол на качеството”, информацията от който впоследствие се записва в базата данни. Задължителната информация в протокола включва: идентификационния номер на камерата, типа на камерата, името на камерата, наличие на допълнителен изход на газовата и охладителната система за захранване на съседна камера, идентификационните номера на двойните газови процепи, идентификационните номера на платките на детекторната електроника, времевия код на платките на детекторната електроника, място и дата на монтаж, местоположение на камерата, входен импеданс, резултати от тестовете, ток през аналоговата и цифровата детекторна електроника. Могат да се добавят също така и коментари и бележки.

По време на сглобяването се извършват и тестове за херметичността на газовата и охладителната система, изправността на електрониката и т.н. Описанието на тестовете следва описание на процедурата по монтаж на камерите. При сглобяването на камерите със съпротивителна плоскост се спазва следната порцедура:

1. Информацията относно идентификационния номер на камерата, типа на камерата, името на камерата, наличие на допълнителен изход на газовата и охладителната система се записват в “Протокол за контрол на качеството”. Качеството на камерата и нейните компоненти трябва да се тестват на всяка стъпка от процедурата.
2. Всички механични компоненти от алуминий и неръждаема стомана, необходими за сглобяване на камерата, се почистват със спирт.
3. Долните огънати профили се поставят в гнездата на монтажната маса съгласно съответния конструктивен чертеж “C”.
4. Двойните процепи се преместват от транспортния контейнер на спомагателна маса, чрез приплъзване.
  - (a) подготвят се тръбичките на газовата система
    - i. отстраняват се предпазните тали на входовете и изходите на двойните газови процепи;
    - ii. поставят се пластмасови пружинки в късите, огъващи се тръбички на газовата система;
    - iii. поставят се късите тръбичките на газовата система, свързвани горния и долния газов процеп съгласно чертеж “B”;
  - (b) поставят се платките на детекторната електроника съгласно чертеж “D”, като специално се внимава за номерацията на платките на детекторната електроника;
  - (в) тестват се електрическите връзки *Kapton*<sup>®</sup>, съгласно тестова процедура “T.1” <sup>28</sup>;

---

<sup>28</sup>тестовите процедури са описани по-нататък в текста

- (г) идентификационните номера на двойните газови процепи се отбелоязват в "Протокола за контрол на качеството";
  - (д) горните и долните високоволтови кабели на двойните газови процепи се маркират;
  - (е) заземяващия кабел, свързан с екранировката на задния двоен процеп, се маркира с етикет "GND В COPPER". Ако камерата е от тип RB3 или RB4 този кабел трябва да се свърже със земя посредством съпротивление  $10 k\Omega$ .
5. Двойните процепи се преместват много внимателно чрез приплъзване от спомагателната маса върху долните огънати профили, които предварително са разположени в гнездата на монтажната маса. Важно е двойните процепи да не се огъват. Всяко огъване може да доведе до отлепянето на цилиндричните ограничители в газовите процепи и по този начин да повреди газовия процеп;
  6. Проверява се разстоянието между сигналните електроди на предния и задния двоен газов процеп. Разстоянието трябва да е около  $10 mm$ , но не по-малко от  $5 mm$ , за да се избегне паразитно предаване на сигнал между двойните газови процепи;
  7. Страницните ограничители на монтажната маса се вдигат в горна позиция;
  8. Горните огънати профили се поставят върху двойните процепи съгласно чертеж "С" и се задържат на място с плоскостите на страницните ограничители на монтажната маса.
  9. Поставят се притискащите греди на монтажната маса, с които горните огънати профили се задържат в правилно положение.
  10. Страницните ограничители на монтажната маса се завъртат надолу.
  11. Поставят се четирите алуминиеви задържащи П-образни щипки на камерата, за да задържат долните и горните огънати профили.
  12. Газовата система се свързва и монтира съгласно чертеж "В";
    - (а) подготвят се детайлите за газовата система: режат се тръбичките, поставят се съединителните втулки и т.н.
    - (б) поставят се ограничителите на газовия поток в съединителните втулки на входящите тръби; Тези ограничители са предварително калибрирани, така, че свръхналягането в камерата да не надвишава  $2 mBar$ .
    - (в) тества се херметичността на двойните процепи и на газовата система съгласно тестова процедура T.2;

13. Монтира се охладителната система - охладителните тръби се монтират на охладителните профили, съгласно чертеж “A”. Тества се херметичността на охладителната система съгласно тест Т.3.
14. Свързват се платките на детекторната електроника съгласно чертеж “D”. Следи се внимателно номерацията на платките, за да бъдат разположени на правилните места.
15. Ако в камерата е предвидено да има разпределителна платка, то тя се поставя и се фиксира със съответни държатели.
16. Поставят се и се свързват кабелите на нисковолтовата система, съгласно чертеж “D”.
17. Идентификационните номера и времевите кодове на платките на детекторната електроника, се записват в “Протокола за контрол на качеството”.
18. Тества се нисковолтовата система (Т.4).
19. Притискащите греди на монтажната маса се отстраняват.
20. Проводящото фолио *Kapton*<sup>®</sup>, запоено фабрично към сигналните електроди, се свързва към платките на детекторната електроника. Връзката се тества, т.е. извършва се тестова процедура Т.1.
21. Охладителните тръби и тръбите на газовата система, както и нисковолтовите и високоволтовите кабели се фиксират към огънатите профили посредством връзки тип “свинска опашка”.
22. Подготвят се алуминиевите П-образни профили:
  - (а) в ъглите се монтират триъгълни стоманени плоскости;
  - (б) поставя се изолатор, където е необходимо, между алуминиевите държатели на капаците и платките на детекторната електроника;
  - (в) алуминиевите държатели на капаците се монтират към П-профилите,
  - (г) залепват се пластични ограничители между двойните процепи и П-профилите;
  - (д) поставят се П-профилите, съгласно чертеж “C”, като с тях се притискат огънатите профили, между които се намират двойните газови процепи, за да се формира механичната структура на камерата;
  - (е) поставят се всички винтове, които са достъпни при хоризонтално положение на камерата
23. Поставят се и се залепват със силикон два пластмасови ограничителя между предния и заден двойни процепа

24. Монтира се челният жлеб на предния П-профил и се свързват сигналните кабели.
25. Разпределителят на газта и охладителната течност се монтира на левия или десния П-профил само на камерите, които е предвидено да се свързват директно с газовата и охладителната система на експеримента CMS. Към разпределителя се свързват газовите и охладителните тръби на камерата.
26. Поставят се горните капаци и се прикрепват с винтове.
27. Поставят се етикети с номера и името на камерата на три различни страни на камерата.
28. Камерата се повдига с помощта на кран и се поставят останалите винтове - тези от долната страна на камерата.
29. Камерата се завърта перпендикулярно на пода и се поставят долните капаци. Долните капаци също се прикрепват с винтове.
30. Камерата се поставя в кулата на мюонния телескоп или в зоната за съхранение и се преминава към стъпка 1 за сглобяване на следващата камера.

#### **4.3.4 Тестове провеждани по време на сглобяването на камерата**

С цел осигуряване на надеждната и безотказна работа, както и високо качество на монтирани камери, всяка компонента на камерата се тества от производителя, от специалисти или от техническия персонал в лабораторията на всяка стъпка от процедурата.

Тестове, които се провеждат по време на сглобяването на камерите със съпротивителна плоскост са следните:

##### **T. 1: Тест на фолиото Kapton<sup>®</sup>**

Цел на теста: да се провери качеството и целостта на проводящото фолио *Kapton<sup>®</sup>*, качеството и целостта на сигналните електроди на камерата, връзката между проводящото фолио *Kapton<sup>®</sup>* и платките на детекторната електроника.

Тестова процедура: Измерва се съпротивлението между куплунга на платките на детекторната електроника със свързано към тях проводящо фолио *Kapton<sup>®</sup>* и земя. Съпротивлението трябва да е близко до номиналната стойност. Тази стойност се различава за различните типове камери.

Проблеми, които могат да се открият с теста:

- прекъснат електрод на проводящото фолио *Kapton<sup>®</sup>* - в този случай измерената стойност на съпротивлението е много голяма;

- прекъснат сигнален електрод - в този случай измерената стойност на съпротивлението е много голяма;
- повредено или зле запоено терминиращо съпротивление - в този случай измерената стойност на съпротивлението е много голяма;
- късо съединение между сигналните електроди и земя - в този случай измерената стойност на съпротивлението е  $\sim 0 \Omega$ ;
- късо съединение между два съседни сигнални електрода - в този случай измерената стойност на съпротивлението е половината от номиналната стойност;
- лош контакт между сигналните електроди и платките на детекторната електроника - в този случай измерената стойност на съпротивлението е различна от номиналната стойност;
- контакт между сигналните електроди от двата газови процепа - в този случай измерената стойност на съпротивлението е по-малка от номиналната стойност.

## T.2: Тест на газовата система

Цел на теста: да се провери качеството, целостта и херметичността на двойните газови процепи и на газовата система.

Тестова процедура:

- Един от двойните газови процепи се свързва към газовата система. Ако газовият процеп е изправен, след кратък период от време се наблюдават мехурчета в индикатора за поток на газовата система;
- Същата процедура се повтаря за другия двоен газов процеп.
- Цялата газова система се свързва и тества отново. Измерва се времето до появата на първото мехурче в индикатора за поток на газ в системата и се измерва броя на мехурчета за една минута. Трябва да се има пред вид, че времето до появата на първото мехурче и броя на мехурчетата за една минута зависят от вида и натовареността на системата за подаване на газ.
- Проверява се херметичността на камерата. Към изхода на газовата система на камерата се свързва манометър. Камерата се пълни с газ докато налягането достигне  $5 \text{ mBar}$ . Входа на газовата система на камерата се затваря. След 15 -20 мин. отново се проверява налягането в камерата. То трябва да има същата стойност, т.е.  $5 \text{ mBar}$ .

Проблеми, които могат да се открият с теста:

- лоша херметичност на газовата система, запущен ограничител на поток, запушена или прерязана (повредена) тръба от газовата система и т.н. В тези случаи не се наблюдават мехурчета в индикатора за поток на газ в системата.
- липса на един или няколко ограничители на потока. Наблюдава се необичайно голям газов поток през камерата, т.е. за една минута имаме значително повече мехурчета в индикатора за поток на газ в системата.

### T.3: Охладителна система

Цел на теста: да се провери качеството, целостта и херметичността на охладителната система.

Тестова процедура:

- Ако камерата има допълнителен изход за подаване на охладителна течност към друга камера, то той се затваря с къса трабичка. Поставят се манометър и кранче, с което се свързва охладителната система към компресор или газова бутилка. Подава се въздух или азот под налягане 20 Bar и се затваря кранчето между компресора или бутилката и охладителната система.
- След 20 минути налягането в охладителната система се измерва отново. Налягането трябва да има същата стойност, т.е. 20 Bar.

Проблеми, които могат да се открият с теста:

- лоша херметичност на охладителната система - наблюдава се намаляване на налягането. Обикновено този проблем се дължи на недобра механична връзка между компонентите на газовата система.

### T.4: Тест на нисковолтовата система

Цел на теста: да се провери качеството и изправността на нисковолтовата система и функционалността на  $I^2C$  шината.

Тестова процедура:

- Измерва се тока през нисковолтовата система. Токът, консумиран от аналоговите компоненти на платките на детекторната електроника трябва да е около 0,07 A за всяка платка. Тока захранващ цифровите компоненти на платките трябва да е около 0,14 A за всяка от платките.
- Електрониката на камерата се свързва към системата за контрол. Проверява се функционалността на  $I^2C$  шината на камерата, като се снемат данни за температурата на платките и стойностите на праговете на дискриминаторите. Стойностите на праговете на дискриминаторите се променят и отново се прочитат, за да се провери дали системата функционира коректно.

Проблеми, които могат да се открият с теста:

- несвързани платки на детекторната електроника. В този случай токът има по-малка стойност.
- дефекти на платки на детекторната електроника. В този случай токът има по-голяма стойност.
- грешно адресиране на платки, неправилно свързана дистрибуторна платка, повреди на платките или  $I^2C$  шината на камерата. В този случай прочетените стойностите на праговте на дискриминаторите се отличават от номиналните, отчетената температурата се отличават значително от температурата в помещението.

#### 4.3.5 Изменения в конструкцията

Процедурата по слобождане на камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS беше разработена по време на монтажа на първите 24 камери, извънен най-вече от български специалисти в лабораторията на INFN в гр. Бари (Италия).

Открити бяха проблеми във високоволтовата система на камерите и бяха предложени варианти за тяхното решение:

- До този момент високоволтовите кабели бяха без екаранировка и индуцираха шум в камерите. След екранирането на кабелите от високоволтовата система, шумът в камерите бе редуциран съществено.
- При производството на двойните процепи се оказа, че е нарушена изолацията на високоволтовите електроди вследствие на високата температура при запояването на терминиращите съпротивления. Оказа се също така, че изолацията по ръбовете на единичните газови процепи не е достатъчно надеждна. Бяха изprobvani различни материали за допълнителна изпълнение, като накрая беше избран най-евтиният и най-надежден вариант. Направи се допълнителна изолация П-образно PET фолио. В резултат на тази модификация средният ток на единичните процепи намалява от  $2,32 \mu A$  до  $0,83 \mu A$  при напрежение  $8 kV$ .

Открити бяха потенциални проблеми в механичната конструкция на камерата. Част от огънатите профили оказваха напрежение на срез върху цилиндричните ограничители в газовите процепи. Това наложи промяна в положението на някои от огънатите профили и незначителна модификация на газовата система.

Променена беше, също така конструкцията на газовата система. Материалът от който бяха изработени част от компонентите на газовата система се оказа неустойчив на влиянието на флуороводорода ( $HF$ ) образуващ се при работа на

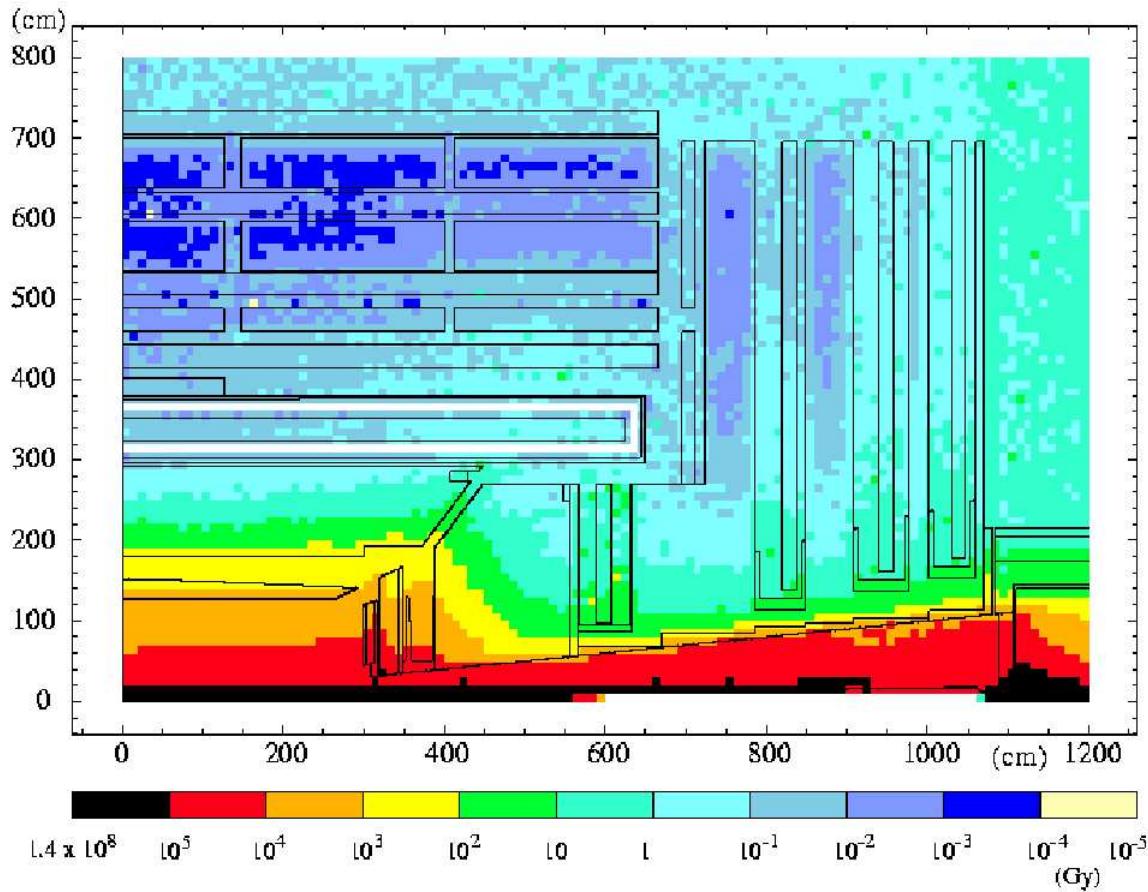
камерата. Това наложи тези детайли да се изработят от по-устойчив на флуороводород материал. Подменени бяха също така и ограничителите на газовия поток на входовете на камерите, защото стария модел ограничители се оказаха трудни за калибриране.

#### 4.3.6 Заключение

- Разработена е технология за асемблиране на камери със съпротивителна плоскост и тестови процедури за контрол на качеството.
- Изследвано е поведението на камерите при продължителна работа и е разработен метод за екраниране влиянието на високоволтовото захранване върху характеристиките им. В резултат значително е намалял шумът и токът на камерите. В резултат на приложения метод средният ток на единичните процепи намаля от  $2,32 \mu A$  до  $0,83 \mu A$  при напрежение  $8 kV$ .
- Отстранени са проблеми в механичната конструкция на камерата, водещи до недопустимо механично напрежение върху газовите процепи.
- Променена е конструкцията на газовата система. Извършен е подбор на подходящи материали за газовата система на камерите.

## 5 Изследване на стареенето на RPC камери на комплекса GIF

С помощна на компютърни симулации е пресметнато, че общата акумулирана доза в централната част и в по-голямата част на крайните части на детектора CMS ще бъде от порядъка на  $1\text{ Gy}$  фиг. 28 [38].



Фигура 28: Абсорбирана доза, в единици  $\text{Gy}$  в системите на детектора CMS. Стойността отговаря на интегрална светимост  $5 \times 10^5 \text{ pb}^{-1}$ , която се очаква да се акумулира за първите 10 години работа на ускорителя LHC [38]

Ето защо, могат да възникнат проблеми свързани със стареене на камерите със съпротивителна плоскост под действие на радиацията. Под стареене ще разбираме промени на параметрите на детекторите с течение на времето. Тези промени може да са в следствие на облъчването на бакелитните електроди, което евентуално може да промени съпротивлението на електродите, а така също и на преминаването на електрически заряд през бакелитните електроди. Стареенето би могло да доведе до значително влошаване на характеристиките на детекторите. Възможно е също така, част от ионите, които се създават в газовия обем при рекомбинация върху електродите да полимеризират и се натрупат върху повър-

хността им [50].

Възможни индикации за стареене са вариации на омичната компонента на тока<sup>29</sup>, “свиване” на платото на ефективността<sup>30</sup> на камерата, голями стойности на тока на тъмно, възникване на искрови разряди в активния обем.

По тази причина е много важно да се провери експериментално стабилността на камерите със съпротивителна плоскост, при работа в условията на очаквания на експеримента CMS фон.

## 5.1 Източници на фоново лъчение в мюонните станции

С много голяма вероятност, сигнал в мюонната система остават мюоони и заредени адрони, напуснали калориметрите. В мюонните станции в страничните затварящи части на експериента CMS попадат и частици преминали покрай калориметрите при  $\eta = 3,0$ , а също така и частици от взаимодействия в тръбата на снопа [38] [127].

Друг източник на фон, е така наречения “неутронен фон”. Този термин в известна степен е заблуждаващ, защото повечето от действителните фонови взаимодействия се причиняват от електрони или позитрони, които са резултат от реакцията на захват на топлинен неутрон от ядро с последващо излъчване на гама квант, който от своя страна ражда електрон-позитронна двойка.

Ако газът на камерата съдържа водород, фонов сигнал може да се получи и при откат на протона при ( $p, p$ ) разсейване, но е оценено, че този процес е незначителен в сравнение с фотонните реакции [128]. Следователно въпреки, че неутроните са източник на фон, то частиците предизвикващи сработване на детекторите са меки електрони и позитрони.

Очаква се камерите със съпротивителна плоскост да работят при много голямо фоново лъчение. Според Монте Карло симулациите в централната част на експеримента CMS, фотонният поток с енергии на гама квантите до около  $100 \text{ MeV}$ , ще бъде от порядъка на  $10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , а в крайните части ще бъде от порядъка на  $10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  [38]. Симулациите показват, че дозата погълната в камерите със съпротивителна плоскост в региона  $0 \leq \eta \leq 1,6$  след десет годишна работа на ускорителя ще бъде около  $1 \text{ Gy}$ .

Интегрирания (акумулирания) заряд от камерата е зарядът преминал през камерата в следствие на подаденото високо напрежение. Обикновенно интегри-

---

<sup>29</sup>при напрежение до около  $8 \text{ kV}$ , токът в камерата със съпротивителна плоскост е пропорционален на напрежението - това наричаме омична компонента на тока - фиг. 46

<sup>30</sup>с увеличаване на високото напрежение, ефективността на камерите със съпротивителна плоскост се увеличава, докато достигне насищане, т.е. плато - фиг. 46

раният заряд се нормира на площта на всеки от единичните газови процепи. Величината с която ще измерваме интегрирания (акумулирания) заряд е  $\frac{C}{cm^2 gap}$ , т.e. кулони за квадратен сантиметър за единичен газов процеп. Оценка за акумулирания заряд от камера в централната част на детектора CMS за десет годишна работа на ускорителя LHC ( $5 \times 10^7 s$ ), може да се получи, като се отчете, че очаквания поток на заредени частици е около  $40 Hz/cm^2$ , а средната стойност на заряда в камерата при сработване е около  $20 pC$ . Тогава за акумулирания заряд от камера заряд се получава  $0,04 \frac{C}{cm^2 gap}$ .

## 5.2 Възможни механизми на стареене

Възможни механизми на стареене са наслояването на вещество върху електродите и промяна на физическите характеристики на бакелитните електроди. Отлагането на вещество върху електродите в последствие води до промяна на електрическото поле в активния обем на детектора. Промяната на физическите характеристики на бакелитните електроди, като например увеличаване на електрическото им съпротивление влияе отрицателно на способността на камерите да работят при големи натоварвания.

Опитът на експерименти, като BaBar и Belle показва, че камерите със съпротивителна плоскост всъщност са доста "капризни" детектори и се налага обстойно изучаване на възможните ефектите на стареене. Изследването и познаването на възможните механизми на стареене и евентуално влошаване на параметрите на камерите със съпротивителна плоскост е от важно значение за нормалното функциониране на детекторите.

Електродите на камерите със съпротивителна плоскост на експеримента Belle са стъклени. В началото камерите имат добра ефективност, която обаче започва бързо да намалява. Оказва се, че фреонът  $C_2H_2F_4$ , заедно с влагата в камерата в присъствието на плазма, образува флороводородна киселина  $HF$ , която еква стъклена повърхност. Това от своя страна води до увеличаване на тока на камерата и намаляване на ефективността. Оказва се, че тръбите на газовата система пропускат влага от атмосферата и биват подменени с медни тръби [129]. Наблюдава се и друг ефект - наслояване на тънък филм върху катода, водещ до електронна емисия.

Електродите на камерите със съпротивителна плоскост за експеримента BaBar са направени от бакелит, покрит с ленено масло. Отново след първоначална успешна експлоатация се наблюдава влошаване на характеристиките на детекторите. Те продължават експлоатацията на детекторите въпреки високите стойности на тока. В последствие се оказва, че работата при сравнително високи температури, от порядъка на  $35^\circ C$ , в продължение на няколко месеца води до влошаване характеристиките на камерите - тока през камерите се покачва, а ефективността намалява значително. Характеристиките на камерите не

се подобряват и след нормализиране на температурата. Специфичната форма на ограничителите в газовите процепи на камерите в експеримента BaBar спомага за задържане на ленено масло около ограничителите [130] [131].

По време на покачване на температурата в помещението на експеримента, лененото масло променя вискозитета си и се разтича в активния обем на камерата. Това води до неравности в газовия процеп и дори до формирането на структури от ленено масло, допиращи се едновременно до двата електрода на камерата. Тъй като съпротивлението на лененото масло е по-малко от това на бакелита, тези структури водят до намаляване на ефективността в цели области от камерата. Шумът също се увеличава.

Експериментът L3 също е забелязал намаляване на ефективността на своите камери [132] от  $\sim 99\%$  до  $\sim 94\%$  за 6 годишен период от 1994 до 2000 г.

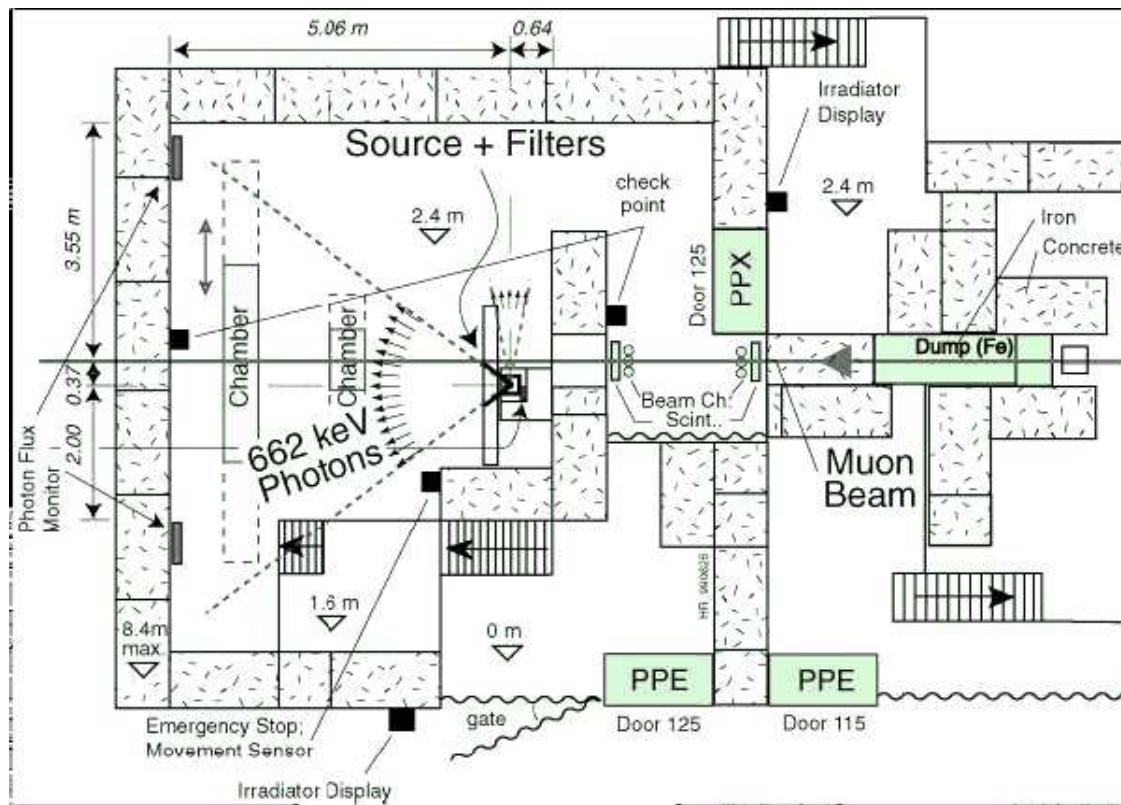
Електрическото съпротивление, т.е. физическите параметри на бакелита не се променят при облъчване с големи дози до  $20 \text{ kGy}$  [133]. Поради тази причина сме изследвали другия основен механизъм за стареене на камерите със съпротивителна плоскост - преминаването на електричен заряд през обема на камерата и бакелитните електроди.

Няколко прототипа на камери със съпротивителна плоскост, както и две камери за експеримента CMS от тип RB1 са подложени на облъчване с големи дози на комплекса GIF (Gamma Irradiation Facility) в CERN с цел изследване промяната в техните характеристики и евентуалното им стареене в следствие на радиацията. До момента акумулирания заряд за прототипите е около  $0,05 \frac{\text{C}}{\text{cm}^2 \text{gap}}$ , а за финалните камери е  $0,025 \frac{\text{C}}{\text{cm}^2 \text{gap}}$  [134]. Тока, шума, ефективността и индуцирания заряд се измерват непрекъснато при облъчване с мюонен сноп или само с космични лъчи [134].

Възможни признаки на стареене са вариации на омичната компонента на тока и намаляване на ефективността. Поради тази причина е важно експериментално да се изследва поведението на камерите със съпротивителна плоскост в условията на голямо облъчване.

### 5.3 Експериментален комплекс GIF

GIF [135] е експериментален комплекс, който позволява изследване на големи по площ детектори с помощта на сноп, при голям гама фон, симулирайки фоновите условия, при които ще работят детекторите на експериментите поставени на ускорителя LHC. GIF е разположен в западната експериментална зона на ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРН, в края на така наречения X5 сноп. X5 е мюонен сноп с импулс на мюоните  $100 \text{ GeV}$ , поток  $10^4$  частици/ $s$  и

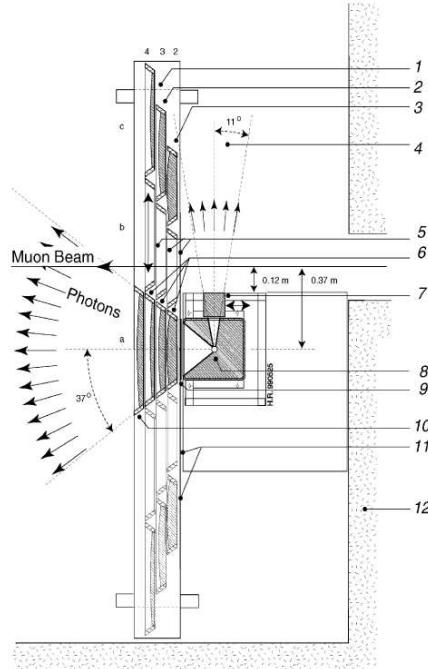


Фигура 29: Схема на експерименталната зона X5 на комплекса GIF в ЦЕРН [135].

площ  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

Експерименталната зона е оградена от бетонна стена с височина 8 m и дебелина 80 см. Зоната има три входа - два от които са за научния и обслужващия персонал, а третият вход е по-голям и позволява внасянето на обемно оборудване. Установката също така разполага с кран за преместване на тежка апаратура и оборудване в зоната. Схема на GIF е представена на фиг. 29. Силен цезиев ( $^{137}\text{Cs}$ ) радиоактивен източник, създаващ голям фотонен поток (фиг. 30 и фиг. 31) е разположен близо до отвора за снопа, на 5 m от края на зоната. Активността на източникът е 700  $\text{GBq}$ , а енергията на фотоните е 662 keV. Източникът е поместен в оловен контейнер, който включва прецизен колиматор, проектиран да облъчва площ от  $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  на разстояние 5 m от източника. Тънък лещоподобен оловен филтър, монтиран на изхода на контейнера, превръща изходния поток в равномерен поток във вертикална равнина, перпендикулярна на снопа. На разстояние 4 m от източника, потокът от фотони с енергия 662 keV по оста на снопа е  $0,86 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Типичната вероятност за конверсия в единична клетка от газонапълнен мюонен детектор е между 0,3 и 2 %.

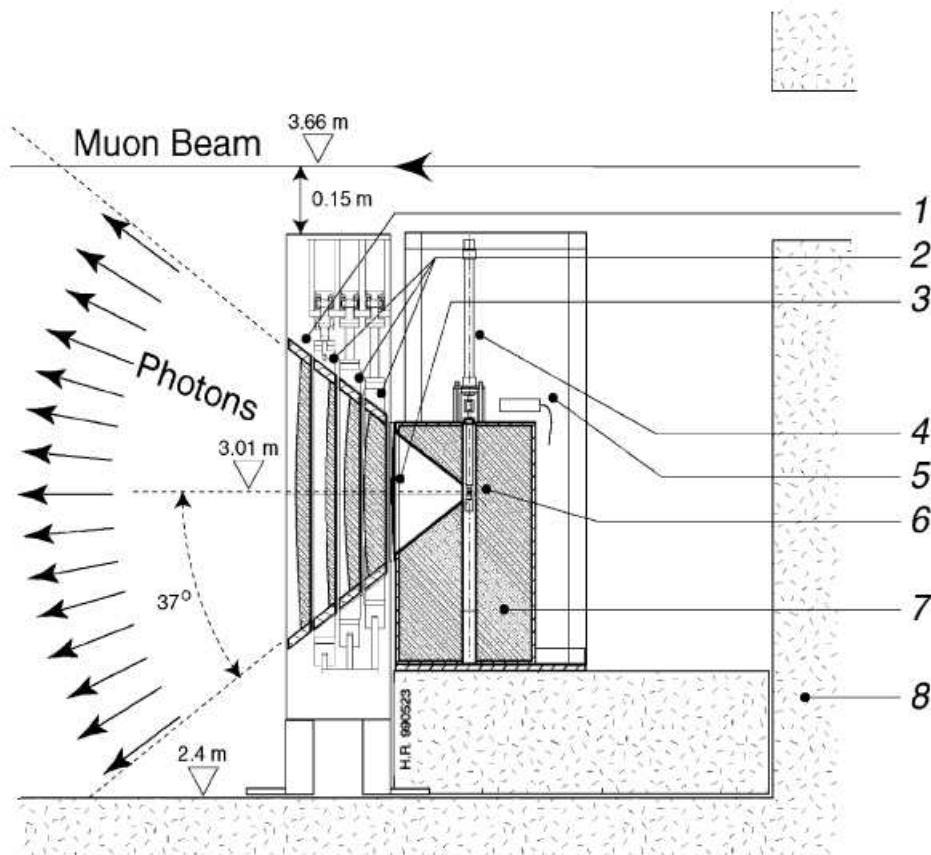
С помощта на оловни филтри е възможна промяната на потока фотони. Система от филтри, разположени пред източника, дава възможност да се про-



Фигура 30: Комплексът GIF в ЦЕРН [135]. Хоризонтален разрез на източника и лещоподобните оловни филтри, променящи фотонния поток. (1-3) три равнини от подвижни филтри; (4) странична област за облъчване; (5) централните три филтъра се състоят само от колиматорна рамка; (6) три филтъра в "работна" позиция; (7) страничен изход с капак; (8) оловен контейнер, в който се помещава източника; (9) тънък неподвижен филтър за ъглова корекция; (10) неподвижен филтър за ограничаване на максималния фотонен поток; (11) ляво положение на филтрите и (12) бетонни стени и под.

меня потока на гама квантите с фактор до 10000. При представяне на резултатите, ще бележим с "ABS 1" потока, ако пред източника стои само формиращият лещоподобен филтър и с "ABS n", ако имаме филтри с фактор n.

На ъгъл  $90^\circ$  от снопа има втора зона за облъчване. Потокът във втората област се формира от отделен колиматор и позволява облъчването на детектори с голям фотонен поток на малка площ и е подходящ за изследване на сцинтилационни кристали за електромагнитни калориметри. Този поток се контролира с отделен щит. При отворен щит каналът осигурява поток от  $4,4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  фотона на разстояние 1 m от източника. Двата канала могат да работят отделно или едновременно. Колиматорите и страничния щит са показани схематично на фиг. 30.



Фигура 31: Комплексът GIF в ЦЕРН. Вертикален разрез, показващ спона, източника и филтрите: (1-3) филтри; (4) държателя с източника вния край е повдигнат, за да се разположи източника в позиция за облъчване; (5) система за радиационен контрол; (6) източник; (7) словения контейнер на източника и (8) бетон [135].

#### 5.4 Радиоактивен източник

Източникът е поместен в оловен контейнер, широк 400 mm и висок 900 mm, показан на фиг. 31. Активното вещество<sup>31</sup> е  $^{137}Cs$ , под формата на сулфат, с период на полуразпад около 30,2 години [31].

Активното вещество е поместено в цилиндричен обем с диаметър 8,3 mm и височина 8 mm. Активността измерена на 5 март 1997 г. е 740 GBq. При 85% от разпадите се излъчват фотони с енергия 662 keV.  $^{137}Cs$  е предпочтен пред  $^{60}Co$  поради по-голямото време на живот и оттам по-малката промяна на фотонния поток през планираното време за използване на установката. Също така

<sup>31</sup>Радиоактивният материал е производство на Amersham-Buchler GmbH & Co KG, Gieselweg 1, D-38110 Braunschweig, Германия.

по-ниската енергия на фотоните, излъчени от цезия в сравнение с кобалта, води до близо два пъти по-голяма вероятност за конверсия в изследвания детектор. За радиobiологична защита се използва 140  $mm$  оловен щит<sup>32</sup>. Оловната защита е поместена в стоманена обшивка с дебелина 5  $mm$ . Основният колиматор има формата на пирамида с апертура  $74^\circ \times 74^\circ$  и обезпечава фотонен поток в пирамидален обем с 5  $m$  максимална дължина по оста. Повдигането на източника в позиция за облъчване и спускането му в защитния контейнер се извършва посредством пневматична система (фиг. 31). В случай на загуба на налягане източникът пада под действие на гравитацията в защитния контейнер. Компонентите на защитната система добавят допълнително 2,3  $mm$  неръждаема стомана около източника, с което “отслабват” активността му до 88,5% от номиналната стойност.

## 5.5 Система за промяна на потока

Точкоподобните източници създават поток от фотони, който е равномерен върху сферична повърхност, но за систематични изследвания на големи детектори с плоска геометрия е добре потокът да е равномерен върху равнинна повърхност. Също така трябва да има възможност да се променя потокът. Някои детектори с ограничена способност за работа при облъчване с големи потоци йонизиращи частици, могат да се нуждаят и от допълнителна защита от големите потоци. Тези три задачи са решени на GIF с помощта на оловни филтри със специално подбрана форма. Всеки от филтрите е монтиран върху алуминиева плоскост с дебелина 2  $mm$ . Дебелината във всяка точка на филтъра е изчислена, като са използвани следните коефициенти на отслабване на фотоните с енергия 662  $keV$ : за олово  $0,116 \text{ mm}^{-1}$  и за алуминия  $0,02 \text{ mm}^{-1}$ . Всеки от подвижните филтри се държи от 20  $mm$  стоманена рамка и размера му е такъв, че да покрива тъгъла на колиматора ( $74^\circ \times 74^\circ$ ). Първият филтър е проектиран така, че да превръща равномерния поток върху сферична повърхност в равномерен поток върху плоска повърхност. Най-големият му коефициент на абсорбция е 2 - в центъра на филтъра. Този филтър, наречен филтър за ъглова корекция е неподвижен. Останалите филтри трябва да осигуряват коефициент на абсорбция, който е независим от посоката на падащите фотони. Наборът от подвижни филтри е разположен пред източника. Състои се от три отделни набора с по три филтъра във всеки набор (фиг. 30). Чрез дистанционно контролирана система филтрите могат да се поставят пред източника. Коефициентът на абсорбция на филтрите е 100, 50, 1 за набора най-близък до източника, 20, 10, 1 за втория набор и 5, 2, 1 съответно за третия набор. Това дава възможност за 17 различни фактора на отслабване: 1 (без филтър), 2, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 2000, 2500, 4000, 5000 и 10 000. Възможно е също така да се добавят допълнителни филтри пред цялата система, за да се намали допълнително потока, като се запазва

<sup>32</sup>Системата за радиационна защита е доставена от STS GmbH, Harxbütteler Str. 2, D-38110 Braunschweig, Германия.

възможността и в този случай да се ползват всички фактори на отслабване. Във фактора на отслабване на се отчита отслабването в следствие на коригирана филтър. Факторът на отслабване показва каква част от монохроматичните фотони от източника, ще преминат през филтъра. Допълнително, известен брой разсейни фотони с непрекъснат спектър, също ще премине през филтрите. До камерите ще достигнат и обратно разсейни от стените фотони. Това означава, че факторът на отслабване е точен само за фотоните с енергия  $662 \text{ keV}$ , достигащи камерите. Действителният брой на фотоните взаимодействали в камерите зависи и от геометрията на зоната и от вероятността за конверсия, която от своя страна зависи от енергията на фотоните. Отношението на броя взаимодействия в камерите ще е близко до отношението на факторите на отслабване. В [135] са приведени данни от симулация и калибровка.

## 5.6 Сноп

Детекторите на комплекса GIF са подложени едновременно на облъчване с фотони от цезиевия източник и на високоенергетични частици от X5 снопа фиг. 32, който е част от западната зона (WA) на ускорителя SPS в ЦЕРН.

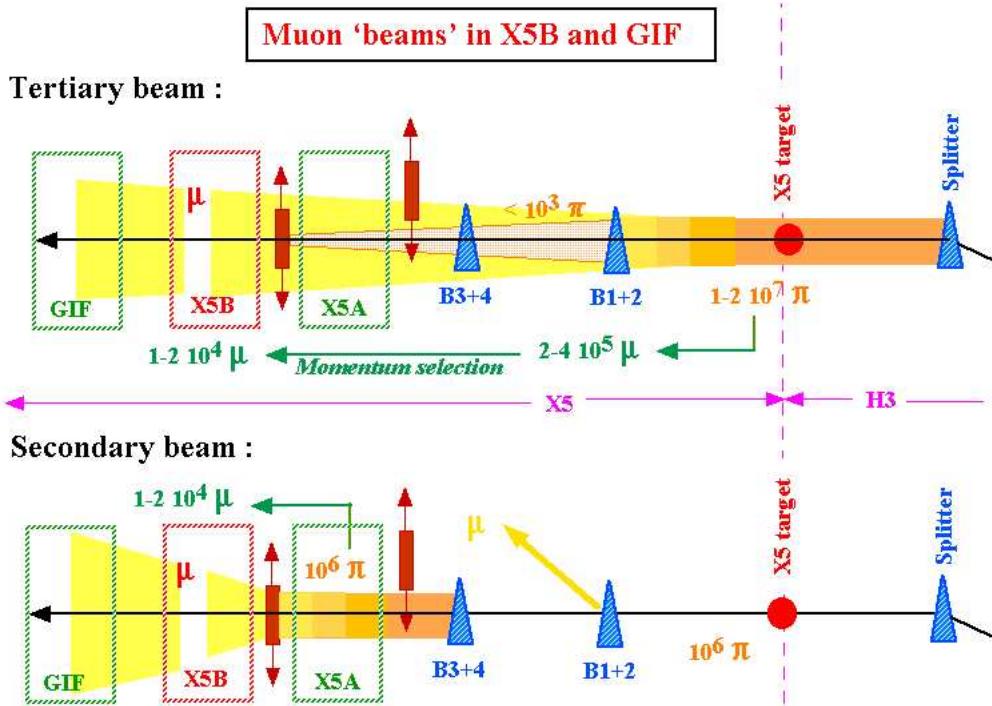
Сноп от протони с енергия  $450 \text{ GeV}$  се извежда на първична берилиева мишена, дълга  $400 \text{ mm}$ . Характерната продължителност на всеки цикъл на извеждане е  $2,38 \text{ s}$  с период на повторение  $14,4 \text{ s}$ . Адрони и електрони, излизящи от мишлената се подбират по импулс и се отвеждат до вторичната мишена на X5 по така наречения H3 сноп. Вторичната мишена на X5 е разположена приблизително на  $650 \text{ m}$  след първичната мишена. Обикновено родените на мишлената на X5 пиони и/или електрони се насочват към изследователската зона, която се намира на разстояние  $200 \text{ m}$ . Ако X5 снопа се настрои за импулси над 57% от импулса на H3 снопа, тогава в X5 снопа ще преминат мюони от пионни и каонни разпади в крайната част на H3 снопа. Комплексът GIF е разположен след крайната точка на X5 снопа. Крайната точка на X5 снопа представлява железен поглътител с дебелина  $2,4 \text{ m}$  и бетонен поглътител - стена с дебелина  $1,6 \text{ m}$ . През тези поглътители преминават само мюони.

При нормална работа на западната експериментална зона, импулсът на мюоните е около  $100 \text{ GeV}$  и потока е около  $10^4$  мюона ( $\mu^-$ ), преминаващи през площ  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , за всеки цикъл на ускорителя SPS. След като преминат през абсорбера мюоните се детектират от сцинтилационни детектори и тяхната позиция и ъгъл на движение се определят с помощта на две закъснителни нишкови камери<sup>33</sup>, разположени на  $2,4 \text{ m}$  една от друга, всяка от тях с пространствена разделителна способност  $200 \mu\text{m}$ . Закъснителна нишкова камера представлява дрейфова камера, информацията от която се снема по закъснителна линия [136]. Добавени са допълнителни камери по снопа с цел да се подобри точността на из-

---

<sup>33</sup>закъснителна нишкова камера - англ. Delay Wire Chamber (DWC)

мерването. Две двойки сцинтилационни детектори разположени на 3 m една от друга формират тригераен сигнал с разделителна способност по време по-малко от 0,5 ns.



Фигура 32: Схема на вторичния и третичния X5 спопове [137] [138]. Снопът достига до трите експериментални зони X5A, X5B и GIF.

В случай, че е необходимо, крайният поглътител на X5 спопа може да се отстрани и третичен електронен или пионен споп с импулс между 5 и 200 GeV може да се доведе до GIF. Електронният споп обикновено е ограничен до импулс 100 GeV. Възможно е да се подаде и 200 GeV вторичен електронен споп. Относителната неопределеност на импулса на спопа е около 0,8%. Характерните стойности на потока на GIF са между  $10^2$  и  $10^4$  частици на цикъл със средно-квадратичен размер на спопа до около  $1 \text{ cm}^2$ . Режимът на работа с вторичен електронен споп позволява изследването и калибрирането на калориметри в условията на голям радиационен фон, създаден от радиоактивният източник. На установката има специализирани броячи, които формират тригер при преминаване на космически лъчи през изследваните детектори. Тези броячи се използват в периодите, когато ускорителят не работи, за да се извършват изследвания с космически лъчи.

Тригераият сигнал се формира от съвпадението на три сцинтилатора, разположени по протежение на спопа. По време на изследванията, седем прототипа

на камери със съпротивителна плоскост с единични газови процепи и размери  $50 \times 50 \text{ cm}^2$  и две камери от тип RB1, предназначени за централната част на експеримента CMS, бяха разположени на около 3  $m$  от източника [134]. Специфичното съпротивление на бакелитните плоскости е  $4 \times 10^{11} \Omega \text{cm}$ . Използвана е следната газова смес:  $C_2H_2F_4$  (95,0%), *iso*- $C_4H_{10}$  (4,5%) и  $SF_6$  (0,5%). Сигналните електроди на прототипите представляват медно квадратно фолио с размер  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , а на RB1 камерите - правоъгълни електроди от медно фолио с размер приблизително  $2,5 \times 124 \text{ cm}^2$ . И в двата случая сигналните електроди се свързват към стандартната платка на детекторната електроника, разработена за камерите със съпротивителна плоскост на експеримента CMS [119]. Усиливането на електрониката е  $2 \text{ mV/fC}$ , а прага на дискриминация е настроен на  $200 \text{ mV}$ .

## 5.7 Резултати от изследванията на GIF

Прототипите бяха подложени на облъчване от май 2005 г. до септември 2003 г., а RB1 камерите от ноември 2002 г. до декември 2003 г. По време на изследването, от прототипите е акумулиран заряд  $0,05 \frac{\text{C}}{\text{cm}^2 \text{gap}}$ , който както вече видяхме, е еквивалентен приблизително на десет години работа на ускорителя LHC. За RB1 камерите акумулираният заряд е  $0,025 \frac{\text{C}}{\text{cm}^2 \text{gap}}$ , което е еквивалентно на пет години работа на ускорителя LHC. За изследване на ефективността на прототипите, се извърши подбор на събития, като се изисква поне 4 прототипа да са сработили едновременно по време на тригер. Този подбор се налага с цел да се отстранят събитията, в които мюоните са преминали през тригерните сцинтилатори, но не са преминали през сигналните електроди на прототипите. С цел да се отчетат промените на атмосферното налягане и температурата по време на различните периоди на събиране на данни, приложеното високоволтово напрежение  $V_a$  се нормира към напрежение при "стандартни условия", т.е. при температура  $T_0 = 293 \text{ K}$  и налягане  $P_0 = 1020 \text{ hPa}$ , по следната формула [105] [134] [139]:

$$V = V_a \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0} \quad (30)$$

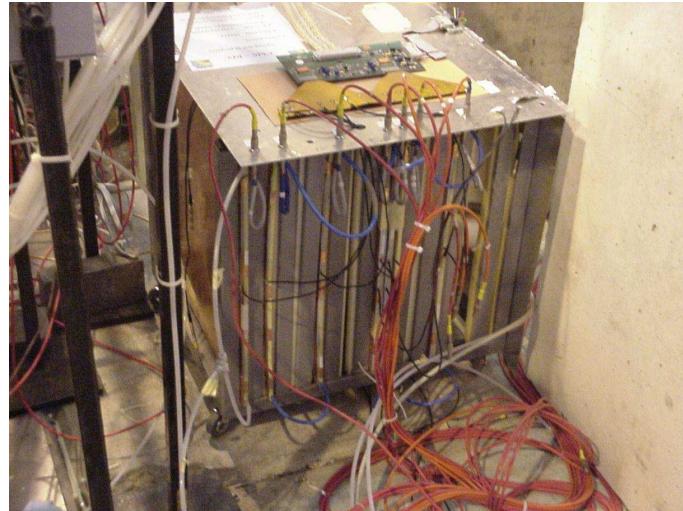
където  $T$  и  $P$  са съответно температурата и налягането при измерването.

### 5.7.1 Прототипи на камери със съпротивителна плоскост

На фиг. 33 са представени прототипите на камери със съпротивителна плоскост, които са изследвани на GIF.

Скоростта на броене  $R$  на прототипните камерите със съпротивителна плоскост се определя, от броя сработвания на камерата извън тригерния прозорец  $N_{hit}$  използвайки [134]:

$$R = \frac{N_{hit}}{N_{trig} A \Delta t} \quad (31)$$



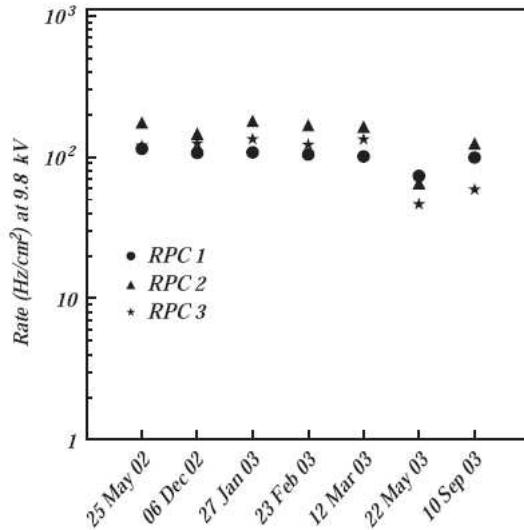
Фигура 33: Снимка на прототипите на камери със съпротивителна плоскост използвани при изследванията на GIF.

където  $N_{trig}$  е броя тригери,  $A$  е чувствителната площ ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) на детектора, а  $\Delta t = 2000 \text{ ns}$  е обхвата на време-цифровия преобразовател<sup>34</sup>. На фиг. 34 е представена скоростта на броене при захранващо напрежение  $9,8 \text{ kV}$  и липса на абсорбиращ филтър, т.е. пълен поток на източника “ABS 1”, като функция на времето за три прототипа, означени съответно като RPC 1, RPC 2 и RPC 3. Съответните скорости на броене при липса на облъчване са извадени предварително за всяка точка от графиката, т.е. направена е корекция за фона. Забелязва се, че скоростта на броене остава постоянна през целия период на изследване. Флуктуациите на последните две точки могат частично да се обяснят с различните условия на комплекса GIF, причинени от различното разположение на обекти, намиращи се между източника и изследваните детектори в този период.

Измерена е ефективността по време на изследванията в случай без източник (OFF) и в случай на пълен интензитет на източника (ABS 1). Извършена е апроксимация на зависимостта на ефективността от захранващото напрежение. При високи напрежения тази зависимост стига до плато, т.е. има максимална стойност на ефективността. От тази зависимост може да се определи напрежението необходимо за постигане на 90% от ефективността в платото, т.е. 90% от максималната ефективност. Резултатите за зависимостта от времето на напрежението, необходимо за постигане на ефективност равна на 90% от максималната ефективност за три прототипа са представени на фиг. 35 за два случая: a) без източник (OFF) и b) в случай на пълен поток на източника (ABS 1). По време на едногодишния период на изследване не се забеляза увеличаване на стойността на този параметър.

---

<sup>34</sup>време-цифров преобразовател - англ. Time to Digital Converter (TDC)



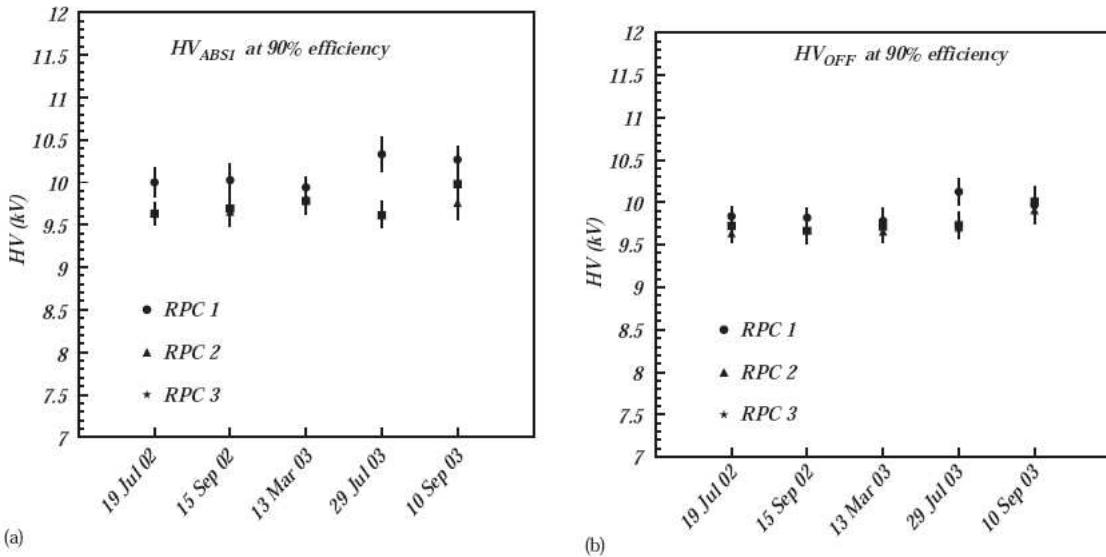
Фигура 34: Скорост на броене при захранващо напрежение  $9,8 \text{ kV}$  и липса на абсорбиращ филтър, т.е. пълен поток на източника “ABS 1” [134]

### 5.7.2 Газова смес с добавени водни пари

По време на изследването, една камера със съпротивителна плоскост бе разположена извън зоната на облъчване на източника с цел да служи, като еталон или референтна камера за сравнение. Тази камера е свързана към отделен изход на газовата система и потока на газовата смес през нея е значително по-голям – шест обема на камерата за час. Скоро след това бе забелязано значително намаление на ефективността на камерата при облъчване с големи потоци ионизиращо лъчение, т.е. високи интензивности. Този ефект, свързан със забележимо увеличение на съпротивлението на бакелита, е преписан на възможно изсушаване на бакелитните електроди в следствие на големия газов поток през камерата. Поради тази причина от септември 2002 г. се въведе в употреба газова смес с водни пари, чиято цел е да се възстанови съпротивлението на бакелитните електроди. Газовата смес с водни пари се оказа много ефективна и много скоро ефективността при работа при високи интензивности се покачи. Максималната ефективност в случай на пълен интензитет на източника (ABS 1) и без източник (OFF) са представени на фиг. 36, като през камерата вече преминава газова смес с водни пари. След няколко месеца ефективността при работа при високи интензивности достигна началните си стойности.

### 5.7.3 Камери от тип RB1 за централната част на CMS

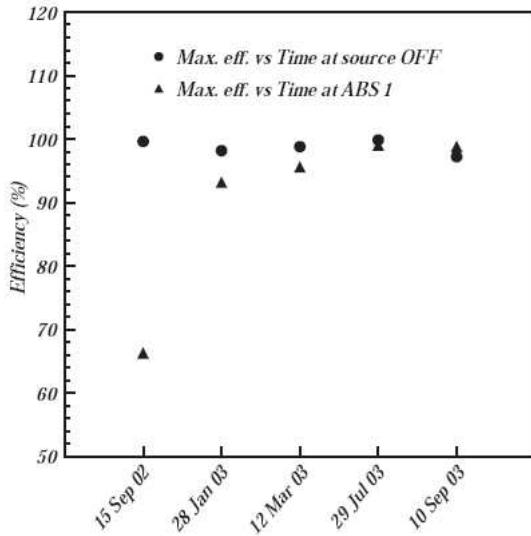
На фиг. 37 се виждат камерите от тип RB1 за централната част на CMS, както и прототипите на камери със съпротивителна плоскост, разположени на установката GIF.



Фигура 35: Напрежението за постигане на ефективност равна на 90% от максималната ефективност в зависимост от времето в случай на пълен поток на източника ABS 1 a), и при липса на източник “OFF”, т.е. източника е прибран в защитния контейнер b) [134]

Двете камери от тип RB1 бяха облъчени до стойности на натрупания заряд  $0,026 \frac{C}{cm^2 gap}$ . На фиг. 38 са представени скоростта на броене за една от камерите при напрежение  $9,8 kV$  и пълен интензитет на източника (ABS 1). По различни причини, камерите в периода от ноември 2002 г. до януари 2003 г. и през месец декември 2003 г. бяха разположени на разстояние около  $3,3 m$  от източника, а в периода от януари 2003 г. до декември 2003 г. бяха разположени на разстояние от около  $2,7 m$  от източника. На фиг. 38, освен данните, за удобство са начертани две хоризонтални пунктирани линии, които свързват експерименталните точки при двете различни позиции на камерите спрямо източника. Те не са апроксимация на данните.

През септември 2003 г., камерите от тип RB1 бяха разположени за няколко дни съвсем близо до източника - на около  $2 m$  с цел измерване на ефективността и способността за работа при голям поток на йонизиращото лъчение. На фиг. 39 е представена максималната ефективност, достигната от една камера при различни интензивности на облъчване с източника. На позицията, в която е била камерата по време на измерванията, пълната интензивност на източника (ABS 1), води до поток от  $800 \frac{Hz}{cm^2}$ , докато “ABS 10”, т.е. фактор на отслабване 10, отговаря на  $200 \frac{Hz}{cm^2}$ , което е доста над очаквания максимум при работа на камерите в експеримента CMS. Полученият резултат - повече от 98% ефективност при ABS 10, показва, че камерите могат да работят с пълната си ефективност, след като са



Фигура 36: Максималната ефективност на камерата, през която се подава газова смес с водни пари, в зависимост от времето в случай на: пълен поток на източника ABS 1 - означено с  $\blacktriangle$  и липса на източник "OFF", т.е. източникът е прибран в защитния контейнер - означено с  $\bullet$  [134].

били подложени на облъчване еквивалентно на пет години работа на ускорителя LHC.

## 5.8 Изводи

Еднопроцепни камери - прототипи, както и две камери със съпротивителна плоскост от тип RB1 за централната част на експеримента CMS, са изследвани за признания на стареене в следствие на йонизиращото лъчение на установката GIF. През малките камери е преминал заряд, еквивалентен на десет години работа на ускорителя LHC, а през камерите от тип RB1 за CMS е преминал заряд, еквивалентен на пет години работа на ускорителя LHC.

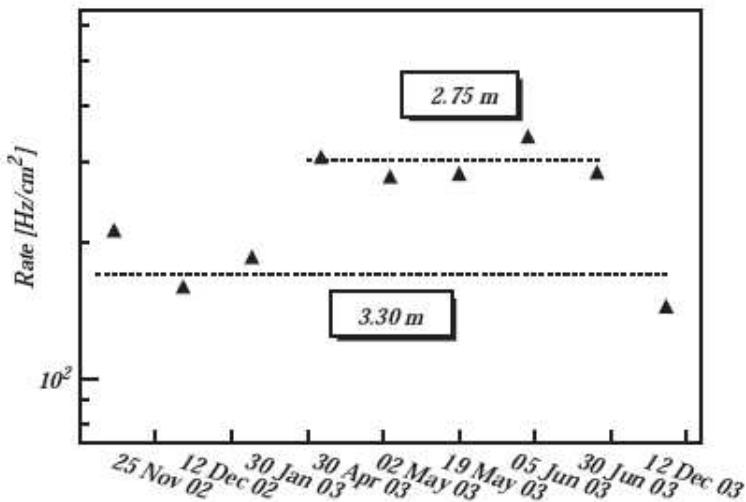
И в двата случая не са забелязани съществени отклонения в параметрите на изследваните камери. За еднопроцепните камери-прототипи е наблюдавано леко покачване на напрежението, необходимо за достигане на 90% от максималната ефективност и намаляване на скоростта на броене. Тези малки ефекти, обаче, може да се дължат на разлика в експерименталните условия на GIF по време на това продължително изследване, а не на стареене. Камерите със съпротивителна плоскост на експеримента CMS са двупроцепни, което увеличава тяхната устойчивост и такива малки ефекти, като тези представени на фиг. 34 и фиг. 35 не биха могли да влошат техните характеристики.



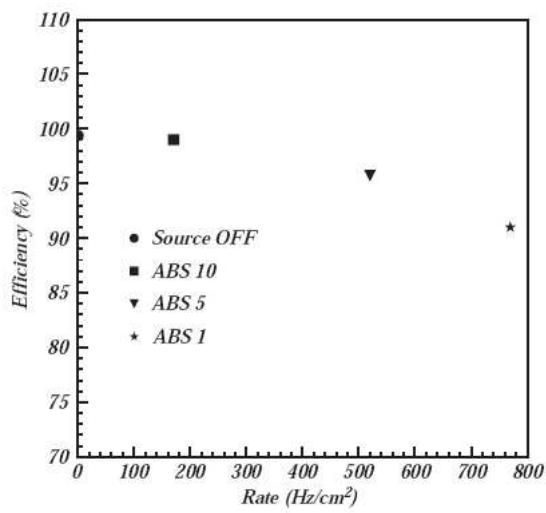
Фигура 37: Снимка на камерите със съпротивителна плоскост разположени на установката GIF. На преден план, долу в дясното се виждат прототипите на камерите със съпротивителна плоскост. На заден план, по средата се виждат камерите със съпротивителна плоскост от тип RB1 за централната част на експеримента CMS.

Експерименталните резултати, също така показват, че използването на газова смес с водни пари е много ефективен метод за предотвратяване на изменението на съпротивлението на бакелитните плоскости, от които са изградени камерите и от там спомага за запазване на параметрите на камерата при работа в условията на облъчване с големи потоци йонизиращи частици.

Измерванията на ефективността и скоростта на броене на камерите от тип RB1 за CMS, потвърждават тяхната способност за работа при облъчване с големи потоци йонизиращи частици и ни позволяват да заключим, че двупроцепните камери напълно покриват изискванията на експеримента CMS.



Фигура 38: Скорост на броене за камера от тип RB1 за централната част на експеримента CMS, при напрежение  $9,2 \text{ kV}$  в зависимост от времето в случая на пълен поток на източника ABS 1. Двете хоризонтални пунктирани линии свързват експерименталните точки, отговарящи на двете различни позиции на камерите спрямо източника ( $\sim 3,3 \text{ m}$  и  $\sim 2,7 \text{ m}$ ) и не са апроксимация на данните [134].



Фигура 39: Максимална ефективност на една от камерите, тип RB1, при различни условия на облъчване [134].

## 5.9 Заключение

Резултатите могат да се обобщат накратко:

- Разработени са камери - прототипи и е проведено изследване на характеристиките им на спонове в ускорителя SPS.
- С помощта на прототипите е изследвано поведението на камерите при продължителна работа.
- Показано е, че камерите могат да работят при интегриран заряд, еквивалентен на десет години работа на ускорителя LHC без съществено изменение на характеристиките им.
- Изследвани са ефектите върху пълномащабни камери-прототипи от тип RB1 в следствие на облъчване с радиация на установката GIF, при интегриран заряд в прототипите, еквивалентен на пет години работа на ускорителя LHC. Показано е, че камерите запазват работните си характеристики при интегриран заряд, еквивалентен на пет години работа на ускорителя LHC.
- Показано е, че при продължително пропускане на камерите със "суха" газова смес работните им характеристики значително се влошават и падат под минималните изисквания. Разработен е метод за възстановяване на работните характеристики на камерите, както и за предотвратяване на влошаването им, чрез използването на газова смес с водни пари.

## 6 Мюонни телескопи за изследване на RPC камери

Камерите със съпротивителна плоскост се монтират в магнитопровода на експеримента CMS. Поради тази причина достъпът до тях с цел подмяна или поддръжка ще бъде затруднен, а в някои случаи и невъзможен. Всички камери, инсталирани в детектора CMS, трябва да отговарят на изискванията поставени от колаборацията. Затова се налага прецизно изследване на най-важните характеристики на всички камери преди инсталацията им. За целта са разработени и изградени мюонни телескопи в София [140] [141], Бари [105] [142] [143] и Павия, с които да се изследват камерите със съпротивителна плоскост.

Експерименталните установки за изследване на камерите със съпротивителна плоскост за централната част на детектора CMS, представляват по същество мюонни телескопи и се намират в София, Бари и Павия. Специализирани помещения са оборудвани с кранове, нисковолтово и високоволтово захранване, газови инсталации, станции за измерване на метеорологичните условия и системи за събиране на данни. На телескопа в Бари могат да се тестват едновременно до 10 камери, а в София и Павия до 5. Температурата в помещенията се поддържа сравнително постоянна с помощта на климатични инсталации.

След обработката на данните крайните резултати се съхраняват в специализирана база данни<sup>35</sup>, базирана на MySQL [126] с PHP [144] интерфейс. Данните за всяка камера са лесно достъпни със стандартен интернет браузър.

Мюонните телескопи имат сходно принципно устройство и най-общо се състоят от следните системи:

- **тригерна система** - детектира преминаването на мюони (космически лъчи) през активния обем на камерите
- **система за събиране на данни** - обработва сигналите от детекторите; съхранява, обработва и анализира получените данни
- **високоволтова система** - захранва тригерните детектори и изследваните камери с високоволтово напрежение. За тригерните детектори напрежението е около  $2\text{ kV}$ , а за камерите със съпротивителна плоскост достига до  $10\text{ kV}$
- **нисковолтова система** - захранва платките на детекторната електроника и разпределителните платки на камерите
- **газова система** - подава газова смес на камерите със съпротивителна плоскост

---

<sup>35</sup><http://webcms.ba.infn.it/rpc>

- **система за контрол и наблюдение** - управлява праговете на платките на детекторната електроника на камерите, записва атмосферните условия по време на събирането на данни. Записва влажността и температурата на газовата смес.
- **климатична инсталация** - поддържа, доколкото е възможно, постоянна температура ( $\sim 20^{\circ}C$ ) в помещението, където се намира телескопа
- **метална кула** - в нея се поставят камерите по време на изследването

## 6.1 Космични лъчи на земната повърхност

Много подробно изследване на интензитета на космичните лъчи в различни точки на земната повърхност може да се намери в [145].

### 6.1.1 Мюони

От космическите лъчи, мюоните са най-многобройните заредени частици на морското равнище. Повечето от мюоните се раждат високо в атмосферата - типично на  $15 \text{ km}$  и губят около  $2 \text{ GeV}$  чрез йонизация преди да достигнат до земната повърхност [31]. Тяхното разпределение по енергии и ъгловото им разпределение представляват конволюция от спектъра им на раждане, енергетичните загуби в атмосферата и разпад. Например, мюон с енергия  $2,4 \text{ GeV}$  имат среден пробег преди да се разпаднат около  $15 \text{ km}$ , който намалява до  $8,7 \text{ km}$  поради енергетични загуби в атмосферата. Средната енергия на мюоните на земната повърхност е  $\approx 4 \text{ GeV}$ . Интегралната интензивност на вертикални мюони с импулс над  $1 \text{ GeV}$  на морското равнище е приблизително  $70 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$  [31] [146] [147] или около  $1 \text{ cm}^{-2} \text{min}^{-1}$  за хоризонтален детектор.

За мюони с енергия  $\sim 3 \text{ GeV}$  ъгловото разпределение на земната повърхност е пропорционално на  $\cos^2\theta$ , където  $\theta$  е ъгълът на мюоните спрямо направлението на вертикално падащите мюони [31].

### 6.1.2 Електромагнитна компонента

На земната повърхност тази компонента съдържа електрони, позитрони, фотони преди всичко от електромагнитни каскади, инициирани от разпад на неутрални или заредени мезони. Разпадът на мюони е доминиращият източник на нискоенергетични електрони на морското равнище. Разпадът на неутрални пиони е по-важен на голяма височина или за по-високoenергетичните електрони. Избити електрони дават също малък принос при ниски енергии. Интегралната вертикална интензивност на електрони и позитрони е приблизително  $30 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ,  $6 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$  и  $0,2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$  съответно за енергии над  $10 \text{ MeV}$ ,  $100 \text{ MeV}$  и  $1000 \text{ MeV}$  [31][147][148]. Точният брой зависи значително от надморската височина. Ъгловата зависимост също е сложна. Отношението фотони към електрони

и позитрони е приблизително 1,3 за енергии над 1  $GeV$  и 1,7 под критичната енергия [31][149]. Под критична енергия за електрона се разбира енергията при която енергетичните загуби на електрона от спирачно лъчение станат равни на енергетичните загуби от йонизация [150].

### 6.1.3 Протони

Нуклеони с импулс над 1  $GeV$  на земното равнище са остатък от първичното космично лъчение. На морското равнище около една трета от нуклеоните във вертикално направление са неutronи. Интегралната интензивност на вертикални протони с импулс над 1  $GeV$  на морското равнище е  $0,9 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$  [31][147] [151].

## 6.2 Мюонен телескоп в София

### 6.2.1 Тригерна система

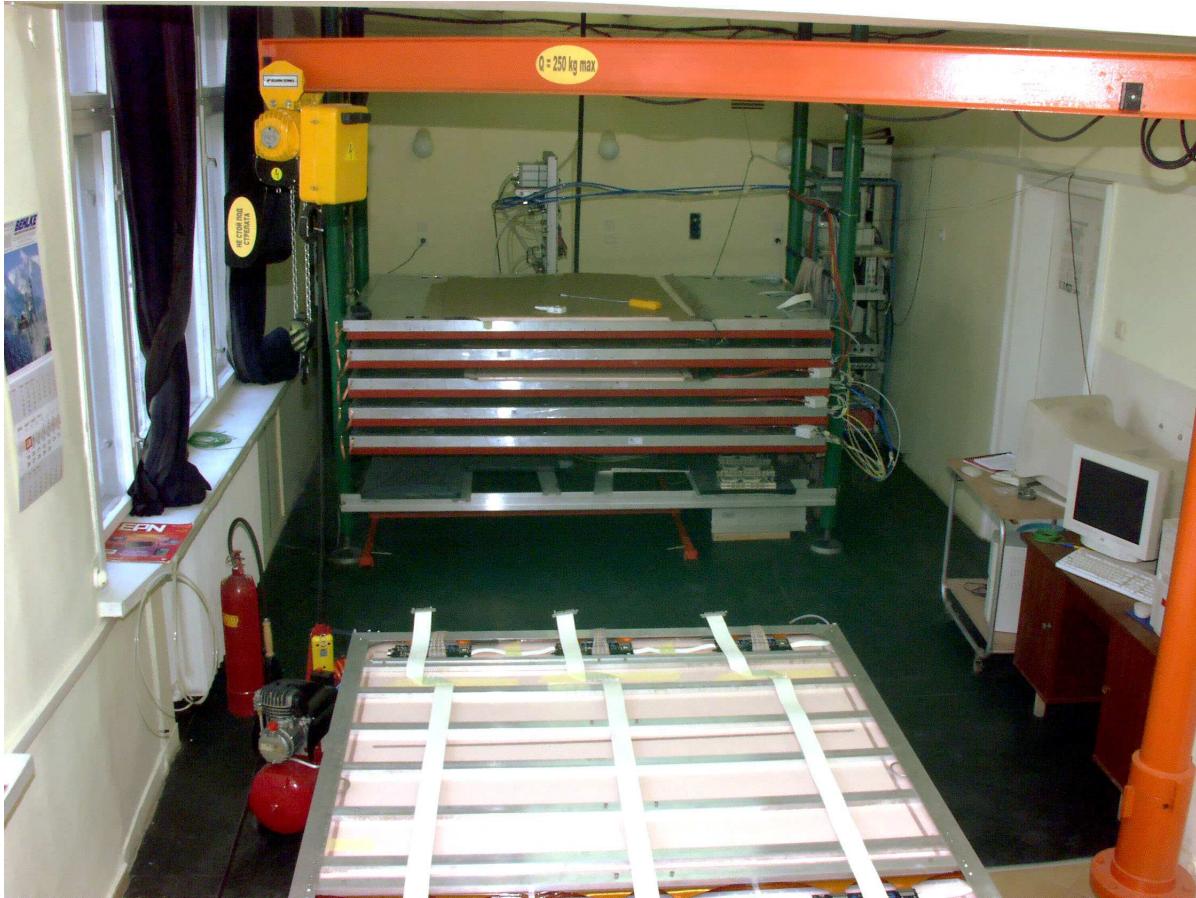
Подробно описание на мюонния телескоп в София може да се намери в [140] [141]. Тригерната система е изградена от пластмасови сцинтилационни детектора, сигналите от които се дискримирират и подават към формировател, т.е. сцинтилаторите работят в броячен режим. Използват се три сцинтилационни детектора - два разположени един върху друг над камерите и един разположен под камерите. Тригераен сигнал се формира, ако сработят едновременно и трите сцинтилационни детектора. Тригерната логика се формира от модули в стандарт CAMAC<sup>36</sup>.

### 6.2.2 Система за събиране на данни

Разработена е система за събиране на данни, която може да обслужва 480 цифрови канала, при честота на тригера до 240  $Hz$ . Системата се състои от пет модула, разположени в крейт стандарт CAMAC. Във всеки от модулите има две програмируеми логически устройства FPGA<sup>37</sup> от серията Virtex-E на корпорацията Xilinx [153], които обработват сигналите от платките на детекторната електроника на камерите със съпротивителна плоскост. Модулите се управляват от PIC16F877 микроконтролер на фирмата Microchip [154], посредством  $I^2C$  (Inter-Integrated Circuit) шина. В по-старата версия на системата за събиране на данни се използваше SPA (Serial Peripheral Interface) шина. Комуникацията между персоналния компютър на системата за събиране на данни и PIC микроконтролера се извършва посредством серийна RS-232 връзка, със скорост на

<sup>36</sup>CAMAC (Computer Automated Measurement And Control) е международен стандарт, използван често в ядрената физика, позволяващ приемането и предаването на информация от електронни модули [152]

<sup>37</sup>англ. Field-Programmable Gate Array



Фигура 40: Мюонния телескоп, изграден в гр. София. На преден план се вижда монтажната масата за слобождане на камери със съпротивителни плоскости. Вдясно е компютърът за събиране на данни. Системата за събиране на данни е разположена в крейта под камерите. В дъното се вижда част от газовата система и системите за високо и ниско напрежение.

обмен на информация 115200 бода в секунда.

Системата работи в два режима - режим на събиране на данни и режим на измерване на шум. В режим на събиране на данни, системата се нуждае от сигнал от тригерната система. Тригърният сигнал се обработва от PIC микроконтролера като външно прекъсване. В режим на събиране на данни е разрешено външното прекъсване и когато PIC микроконтролерът получи сигнал за прекъсване, той прочита данните от Virtex програмируемите логически устройства. В режим на измерване на шум, обработването на тригърен сигнал е забранено и шума се измерва по време на зададен времеви интервал.

Платките на детекторната електроника на камерите със съпротивителна плоскост са свързани към модулите на системата за събиране на данни. Модулите

на системата за събиране на данни регистрират състоянието на всички сигнални електроди през фиксиран период от време. Модулите работят с тактова честота  $40\text{ MHz}$ , т.е. регистрират състоянието на сигналните електроди през  $25\text{ ns}$ . Тригерната система регистрира преминалата през телескопа космическа частица и формира сигнал, който се обработва от микроконтролерът на системата за събиране на данни, като външно за процесора прекъсване. Трябва да отбележим, че тригерният сигнал закъснява по отношение на сигнала от камерите със съпротивителна плоскост. При получаване на тригераен сигнал микроконтролерът прочита вече събрани данни от модулите и ги изпраща към персоналния компютър за съхранение и обработка. Ако вместо сигналът от тригерната система на входа на микроконтролера подадем сигнал от случаен генератор, то можем да оценим вероятността камерата да сработи случайно.

Шумът на камерата се определя, като броят на сигналите получени от камерите за единица време. Обикновено шума се нормира на активната площ на камерата. За измерване на шума не е необходим тригераен сигнал или "вето" сигнал, тъй, като броят сработвания на камерата, в следствие на преминаване на мюон през нея, е пренебрежим спрямо броя на сработванията на камерата в следствие на шум.

В модулите на системата за събиране на данни има реализирани броячи, които се използват за измерване на шума. Използваните програмирами логически устройства Virtex, обаче, нямат достатъчен капацитет, за да позволяят реализирането на индивидуален брояч за всеки сигнален електрод. Поради тази причина се налага сигналите от осем съседни изхода на платките на детекторната електроника да се отчитат от един брояч. Т.е. на практика броячът регистрира сигнал, отговарящ на логическото "ИЛИ" от сигналите на осем електрода. Съдържанието на брояча се увеличава с единица след всеки сигнален импулс, дошъл от камерата и измерването продължава за отнапред зададено време.

Системата за събиране на данни все пак позволява да се измерва шума на всеки сигнален електрод по отделно. За да се изследва шума на всеки сигнален електрод, входовете на системата за събиране на данни, които са свързани към останалите сигнални електроди се "забраняват" програмно, т.е. не се отчитат от брояча. Сигналите от които точно електроди да не се отчитат от модулите на системата за събиране на данни се определя със специална "маска", която се задава от компютърът на системата за събиране на данни. По този начин могат да се отчитат сигналите само от един сигнален електрод.

**Команди към микроконтролера на системата за събиране на данни**  
Компютърът на системата за събиране на данни комуникира с микроконтролера със следното множество от команди (инструкции): рестартирай, прочети шума, зареди маска, изпрати маска, зареди тестови данни, изпрати тестови дан-

ни, разреши броячите на шум, забрани броячите на шум, прочети броячите на шума, прочети данните, прочети АЦП<sup>38</sup>, Зареди ЦАП<sup>39</sup>, изчисти. Част от командите, след като бъдат приети от микроконтролера се препращат директно към програмируемите логически устройства Virtex, а други се “превеждат” от микроконтролера до серия от по-прости команди.

Инструкциите извършват следните действия:

- *Рестартрирай* - включва режим на събиране на данни и разрешава външен тригър. В този режим програмируемите логически устройства Virtex, събират данни от платките на детекторната електроника през зададен времеви интервал ( $25\text{ ns}$ ) и събират данните в регистър. След пристигане на тригърен сигнал, микроконтролерът “прочита”, чрез командата “вземи данни”, регистрите на програмируемите логически устройства Virtex и изпраща данните на компютъра
- *Изчисти* - отменя всички предишни команди, ако има такива; нулира всички регистри и забранява всички прекъсвания в това число и външния тригър
- *Прочети шума* - нулира броячите и започва да брои сигналите за зададен период от време (до  $256\text{ ms}$ ), след което данните се изпращат от микроконтролера към персоналния компютър. Сигналите от осем сигнални електроди се “натрупват” в един брояч. Измерването на шума на отделен сигнален електрод се реализира, като сигналите от останалите седем електрода в групата се “маскират” с помощта на командите “зареди маска” и “изпрати маска”
- *Разреши броячите на шум* - нулира броячите, забранява външния тригър, поставя програмируемите логически устройства Virtex в режим на мерене на шум и започва броенето на сигналите от камерите
- *Забрани броячите на шум* - спира броячите, но не ги нулира
- *Прочети броячите на шум* - микроконтролерът прочита броячите за шум на всяко от програмируемите логически устройства Virtex и изпраща данните на компютъра
- *Зареди маска* - забранява зададени входове на системата за събиране на данни. Използва се за мерене на шум от единични сигнални електроди.
- *Изпрати маска* - изпраща маската до програмируемите логически устройства Virtex
- *Зареди тестови данни и изпрати тестови данни* се използват за проверка на изправността на платките на детекторната електроника на камерите

<sup>38</sup> Аналого-цифров преобразувател - англ. ADC (Analog to Digital Converter)

<sup>39</sup> Цифрово-аналоговия преобразувател - англ. DAC (Digital to Analog Conventor)

- *Прочети данните* - прочита състоянието на платките на детекторната електроника на камерите по заявка от микроконтролера, без необходимост от тригър. Използва се от командата “рестартирай” и за тестови цели
- *Прочети АЦП* - прочита стойностите на праговете, напрежението и температурата на платките на детекторната електроника
- *Зареди ЦАП* - установява зададени стойности на праговете на платките на детекторната електроника

Софтуерът на микроконтролера е разработен на програмния език Си [155].

На компютъра, работещ под операционна система Linux, се изпълняват едновременно няколко програми за събиране на данни, разработени на езици за програмиране С и С++ [156]. Една програма работи като сървър, т.е. обслужваща програма, а друга програма е клиент за графичен потребителски интерфейс<sup>40</sup>. Сървърната програма отговаря за комуникацията между компютъра и микроконтролера на системата за събиране на данни, чрез серийния порт от една страна и графичните интерфейси на потребителите от друга, чрез гнезда<sup>41</sup>. Потребителските програми могат да се изпълняват на същия компютър или на друг, защото връзката минава и в двата случая през мрежовия интерфейс. Сървърната програма е написана на С, като е използвано програмиране на серийния порт, използвайки стандарта POSIX [157] и гнезда [158]. Програмата на графичния потребителски интерфейс позволява лесно стартиране и спиране на събирането на данни и най-важното предоставя възможност за наблюдение в реално време на състоянието на камерите. В реално време могат да се следят ефективността на камерите и средният размер на кълстерите за всяка камера. Потребителският интерфейс също така предоставя в реално време хистограма на сработилите сигнални електроди и хистограма на броят едновременно сработили сигнални електроди. Данните са достъпни в реално време. Програмата е написана на С++, като са използвани класове от пакета ROOT [159] за графичен потребителски интерфейс, изчертаване на хистограми и визуализация.

### 6.2.3 Система за наблюдение и контрол

Системата за наблюдение и контрол е отговорна за наблюдение и управление в реално време на високоволтовото захранване на камерите със съпротивителна плоскост, а така също и за управлението на праговете на детекторната електроника.

---

<sup>40</sup>англ. Graphical User Interface (GUI)

<sup>41</sup>англ. BSD sockets

#### 6.2.4 Високоволтова система

Първоначално високоволтовата система бе базирана на преработени модули в стандарт CAMAC и бе управлявана от отделен компютър, получаващ команди от компютъра за събиране на данни през мрежовия интерфейс. Компютърът, отговорен за високоволтовата система, контролира модулите посредством крейт-контролер KK009 [160].

Тази система бе заменена от модулна високоволтова система на компанията CAEN [161], която се управлява от компютъра за събиране на данни посредством сериен интерфейс през RS-232 порт. Системата е изградена от специален крейт, контролен модул и високоволтови модули.

#### 6.2.5 Газова система

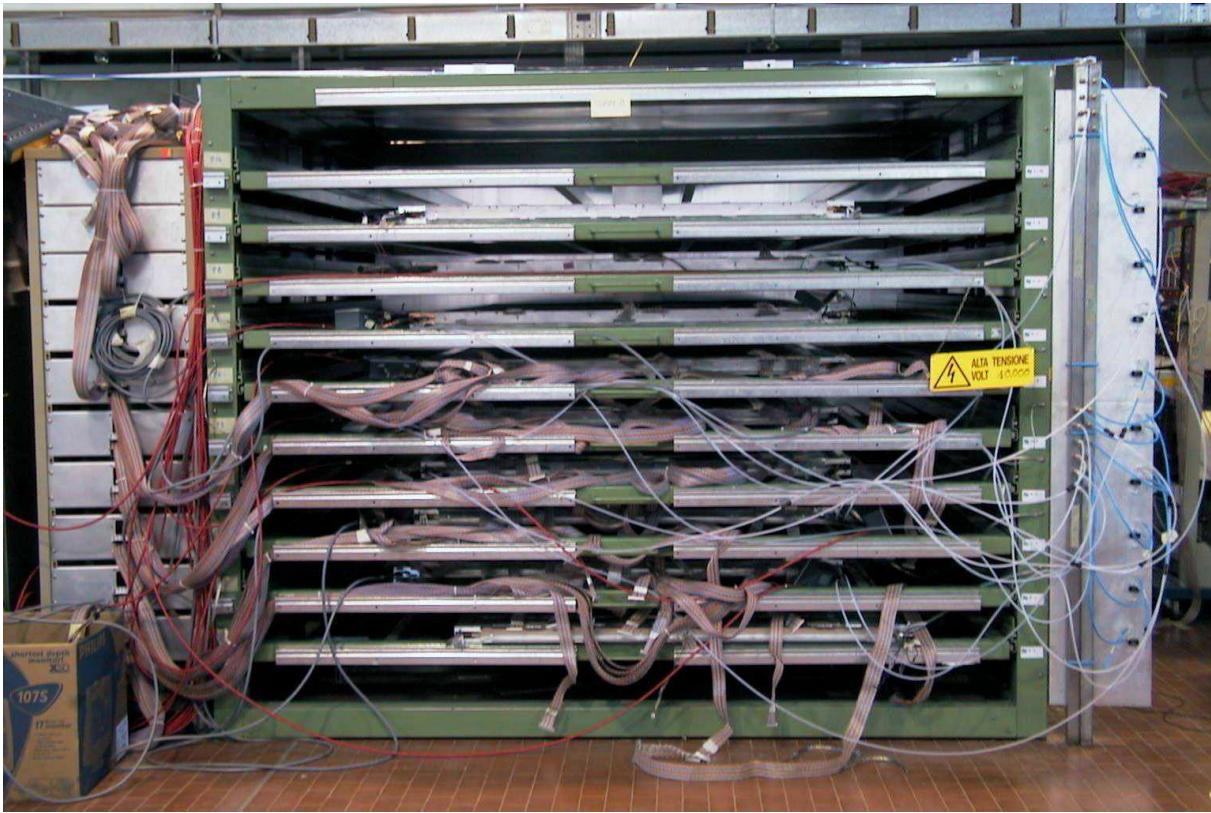
Газовата система захранва камерите с двукомпонентна газова смес -  $C_2H_2F_4$  (97%) и *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>* (3 %). Потокът на всяка от компонентите на газовата смес се контролира от отделен клапан.

#### 6.2.6 Охладителна система

Охладителната система представлява климатична инсталация в помещението, където се намира телескопа. Система за водно охлажддане на камерите не се използва по време на тестовете.

### 6.3 Мюонен телескоп в Бари

Тригерната система се базира на четири големи пластмасови сцинтилационни детектора с площ  $125 \times 44 \text{ cm}^2$ . Два от тях са разположени един върху друг над металната кула на мюонния телескоп, а други два са разположени един върху друг под кулата. На фиг. 42 е показано схематично организацията на тригера: сцинтилатори S1 и S2 над кулата и сцинтилатори S3 и S4 под кулата. Всички те са свързани в схема логическо "И". Малките пластмасови сцинтилатори V1 и V2 с размер  $60 \times 40 \text{ cm}^2$ , са разположени над кулата на разстояние около 50 cm встрани от големите сцинтилатори. Включени са на антисъвпадение и целта им е да намаляват приноса от космични лавини. След като аналоговите сигнали от сцинтилаторите се дискриминират с подходящо подбран праг, от тях се формират логически импулси, които се подават на следната тригерна логика:  $T = (S1 \cap S2 \cap S3 \cap S4) \cap (\overline{V1} \cup \overline{V2})$ . Т.е. получаваме тригераен сигнал T само в случая, когато сцинтилаторите S1, S2, S3 и S4 са сработили едновременно и в същия момент нито един от сцинтилаторите V1 и V2 не е сработил. Тригерната система се поддържа от механична структура, която позволява преместване на тригера по дължината на сигналните електроди и позиционирането му над и под



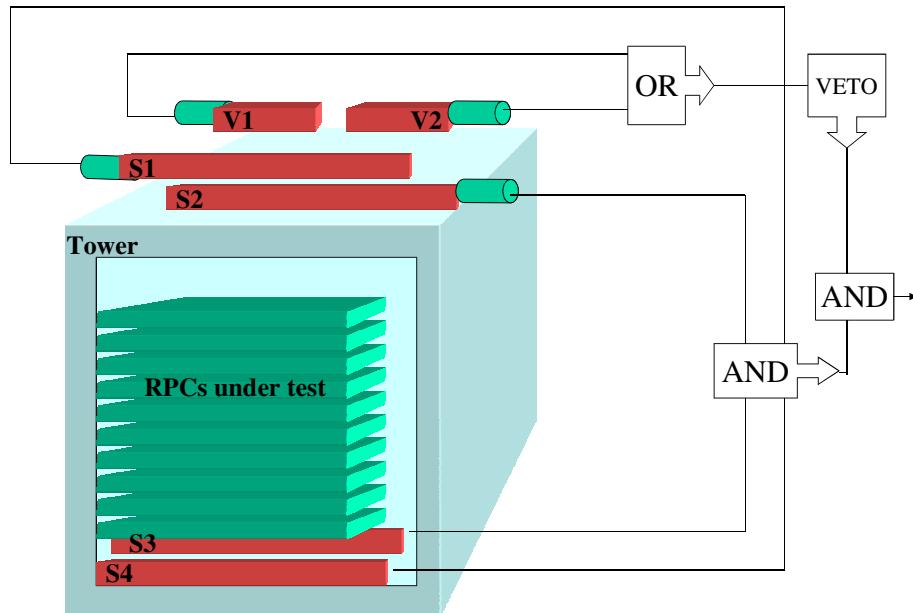
Фигура 41: Мюонният телескоп в ИНФН, гр. Бари, Италия. Вижда се кулата на телескопа, в която са разположени камерите.

съответно предната, централната и задната част на камерите.

### 6.3.1 Газова система

Газовата система е базирана на три клапана с вградени датчици за измерване и поддържане на зададен масов поток от серията EL-FLOW на компанията Bronkhorst High-Tech [162] от тип F-201C [163]. Всеки от клапаните се контролира от специален контролер E-5700 [164] на същата компания. Газовата смес съдържа фреон ( $C_2H_2F_4$ ) с добавени изобутан (*iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>*) и серен хексафлуорид ( $SF_6$ ) в следните пропорции:  $C_2H_2F_4$  (96.2%), *iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>* (3.5%) и  $SF_6$  (0.3%). Към сместа се добавят водни пари и тя се “овлажнява” до около 40 – 45%. Добавянето на водни пари става, като газовата смес се пропуска през дълга, навита тръбичка, поставена в съд с вода. Пропускливостта на тръбичката позволява газовата смес да се “овлажни”. Влажността на газовата смес, която се използва при изледстванията на камерите, се контролира чрез смесване на “овлажнена” със “суха” газова смес.

Камерите са свързани паралелно към разпределителните линии на газова-



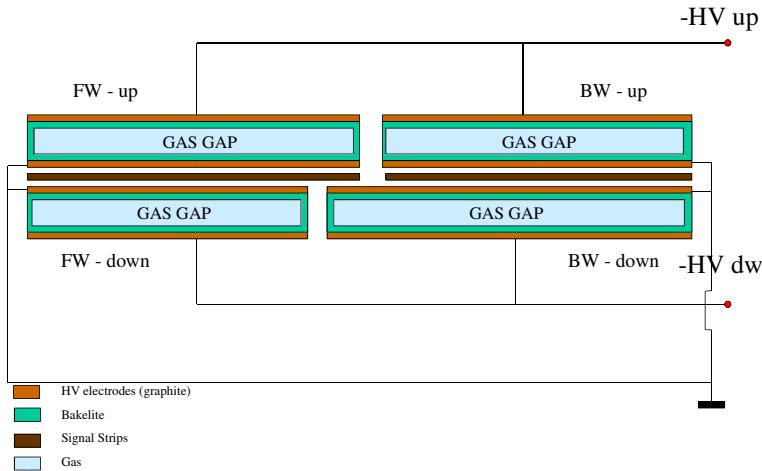
Фигура 42: Експериментална установка и схема на тригера.  $T = (S1 \cap S2 \cap S3 \cap S4) \cap (\bar{V1} \cup V2)$  [105]

та система. Състава на газовата смес се наблюдава и измерва непрекъснато с абсолютна точност 0,1%. Измерва се също така температурата и влажността на газовата смес на входа и на изхода на камерите с помощта на два RH-02 датчика на компанията Pico Technology [165]. Данните за температурата и влажността се съхраняват на компютър.

### 6.3.2 Високоволтова система

Всяка камера се захранва от два високоволтови канала фиг. 43. Един високоволтов канал захранва един слой от камерата, т.е. всички горни или всички долни газови процепи. Всички горни процепи на предния, средния и задния газов процеп са свързани към един високоволтов канал, а всички долни процепи на предния, средния и задния газов процеп - към друг.

Високоволтовото захранване се осигурява от универсална многоканална система CAEN-SY1527, която притежава процесор и възможности за връзка в компютърна мрежа. Използваните високоволтови модули са модел A1526 на CAEN. Всеки от модулите има 6 високоволтови канала, т.е. може да захранва до 3 камери. За наблюдение и записване на стойностите на напрежението и тока се използва специализиран програмен пакет с графичен потребителски интерфейс.



Фигура 43: Принципна схема на високоволтовото захранване.

### 6.3.3 Нисковолтова система

За захранване на камерите с ниско напрежение се използват GCTR модули на фирмата EUTRON [166]. Те захранват разпределителните платки в камерите, които от своя страна захранват всички платки на детекторната електроника. Разпределителните платки също отговарят за предаване на сигналите от системата за контрол, които се изпращат до платките на детекторната електроника по  $I^2C$  шина и които контролират праговете на платките. Електрическата връзка между сигналните електроди и платките на детекторната електроника е осъществена с гъвкава връзка изработена от материала *Kapton*<sup>®</sup>. Платките на детекторната електроника формират LVDS сигнали, след усилване и дискриминация, които по-нататък се обработват от системата за събиране на данни.

### 6.3.4 Система за събиране на данни

Системата за събиране на данни [120] е изградена от два VME<sup>42</sup> крейта, които помещават тридесет 64-канални ВЦП<sup>43</sup> модули, към които се подава  $40\text{ MHz}$  тактова честота, която отговаря на период  $25\text{ ns}$ . Всеки време-цифров преобразувател обработва LVDS сигналите, които пристигат от четири платки на детекторната електроника. Време-цифровите преобразуватели са програмирани в режим “общо спиране”. Когато пристигне тригър, данните се изпращат на компютъра на системата за събиране на данни, за съхранение и последващ анализ.

<sup>42</sup>VME (Versa Module Euro-Card) - стандартна шина за данни [168]

<sup>43</sup>ВЦП - време-цифров преобразувател - англ. TDC (Time to Digital Converter)

Влажността, температурата и налягането се наблюдават посредством метеорологична станция “Oregon Scientific-WMR918”, която непрекъснато изпраща данни посредством радиосигнал до базовата станция, която е свързана с компютър посредством RS-232 сериен интерфейс. Стойностите се записват на диска на компютъра през интервал от една минута.

#### 6.4 Мюонен телескоп в Павия



Фигура 44: Мюонния телескоп в INFN, гр. Павия, Италия. Вляво се вижда кулата, в която се разполагат камерите, в центъра се виждат компоненти от системата за събиране на данни и захранването. Вдясно са компютрите, отговарящи за събирането на данни и за системата за контрол.

Мюонния телескоп в INFN, гр. Павия е много близък по конструкция до този, изграден в INFN гр. Бари. Характерна особеност е, че тригерните сцинтилатори на телескопа покриват цялата площ на камерите. В допълнение, един малък тригерен сцинтилатор е разположен по средата на експерименталната кула и може да се движи и да сканира камерите с помощта на роботизирана система.

#### 6.5 Експериментална установка в тунела на ISR

Установката е разположена в тунела на излезлия от експлоатация ускорител ISR. Изправността на всички камери със съпротивителна плоскост се проверява отново в ISR, за да се установи състоянието им след транспортирането им до CERN. Характерното за тази установка е, че камерите се разполагат не хоризонтално, както в останалите телескопи, а вертикално. За изследвания най-често се използва случаен тригер, т.е. измерва се най-често само шума на камерите - това в повечето случаи е достатъчно за диагностика на проблеми възникнали при транспорта на камерите. Поради факта, че потокът мюони в хоризонтално



Фигура 45: Зона за съхранение и експериментална установка за изследване на камери със съпротивителна плоскост в тунела на излезлият от експлоатация ускорител ISR в ЦЕРН.

направление е значително по-малък от този във вертикално направление, времената необходими за набиране на данни с космически мюони на тази установка са много големи. Поради това тази установка почти не се използва за набор на данни с космически лъчи, а само със случаен тригер.

В ISR има разработена преносима установка, която дава възможност да се осъществяват опростени тестове на камера. Установката е разположена на подвижен стенд. Разполага с газова система с газ фреон или аргон, високоволтова система, нисковолтова система, устройство за проверка функционалността на  $I^2C$  шината на камерата и праговете на детекторната електроника. Има уред за мерене на шум на сигналните електроди. Тази установка се използва за тестване на камери със съпротивителна плоскост, вече скачени с дрейфови камери.

## 6.6 Заключение

- Разработен е мюонен телескоп за изследване на камери със съпротивителна плоскост. Разработени са програмни пакети за събиране и обработка на данни от телескопите.
- Разработен е подвижен стенд за тестване на камери със съпротивителна плоскост, включващ газова, нисковолтова и високоволтова система, устройство за измерване шума на камерата, система за проверка функционалността на платките на детекторната електроника и  $I^2C$  шината.

## 7 Изследване на характеристиките на камерите

Наратко са описани важните характеристики на камерите, като ток, ефективност, шум, среден размер на клъстерите.

Описани са методите за анализ на експерименталните данни от мюонните телескопи.

Представени са резултатите от изследванията на характеристиките на камерите със съпротивителна плоскост за централната част на детектора CMS [105].

Анализирани са характеристиките на камерите от измерванията в едно-процепна и двупроцепна конфигурация.

### 7.1 Характеристики на камерите

По-важните параметри на камерите със съпротивителна плоскост са консумирания от камерата ток, ефективността, шума и средния размер на клъстерите [120] [142] [143]. Под размер на клъстерите разбираме броят съседни, едновременно сработили сигнални електроди. Средният размер на клъстерите е средноаритметичната стойност на размера на клъстерите.

С цел по-подробно и изчерпателно изследване са направени измервания в три различни случая:

- когато само горните газови процепи на камерата са захранени с високо напрежение
- когато само долните газови процепи на камерата са захранени с високо напрежение
- когато едновременно и горните и долните газови процепи на камерата са захранени с високо напрежение

За краткост, случаят, когато се захранват с високо напрежение само горните или само долните газови процепи на камерата, ще наричаме еднопроцепна конфигурация, защото в този случай в действителност работи само едната газова междина. Когато се захранват с високо напрежение едновременно и горните и долните газови процепи, ще наричаме за краткост двупроцепна конфигурация.

Тези измервания дават възможност да се направи последователно сравнение на работата на еднопроцепни и двупроцепни камери със съпротивителна плоскост.

Анализирани са резултатите от измерванията в еднопроцепна и двупроцепна конфигурация [105]. Представени са резултатите за 210 двойни газови процепа.

За да се отчетат различните атмосферни условия, т.е. атмосферно налягане и температура на околната среда, по време на изследването е необходимо да се извърши корекция на приложеното високо напрежение по следната формула [105] [134] [139]:

$$HV_{eff} = HV_{app} \frac{P'_0}{P} \frac{T}{T_0}, \quad (32)$$

където  $HV_{eff}$  е корегираното, т.е. ефективно напрежение,  $HV_{app}$  е приложеното напрежение,  $P$  и  $T$  са съответно атмосферното налягане и температурата на околната среда по време на измерванията, а  $P'_0 = 1010 \text{ hPa}$  и  $T_0 = 293 \text{ K}$  са съответно избранныте референтни налягане и температура. Формулите за корекция (32) и (30) на практика съвпадат, но за референтна стойност на налягането е избрана различна стойност. Средното атмосферно налягане в София, Бари, Павия е съответно приблизително 950, 1010 и 1005  $\text{hPa}$ . Температурата в помещението е поддържана около  $20 - 21^\circ\text{C}$ . Средната дисперсия на корекцията е от порядъка на 1%, а максималното отклонение е около 3%, заради разликите през сезоните, най-вече лято-зима.

След извършване на корекцията за налягане и температура, стойностите на шума и средния размер на кълстерите са апроксимирани с полином от втора степен в интервала по напрежение  $HV_{eff}$  от 9,0 до 9,8  $kV$ . Токът се апроксимира със следната функция:

$$I = c_1 V_{eff} + c_2 e^{c_3 HV_{eff}}, \quad (33)$$

където  $c_1, c_2$  и  $c_3$  са свободни параметри.

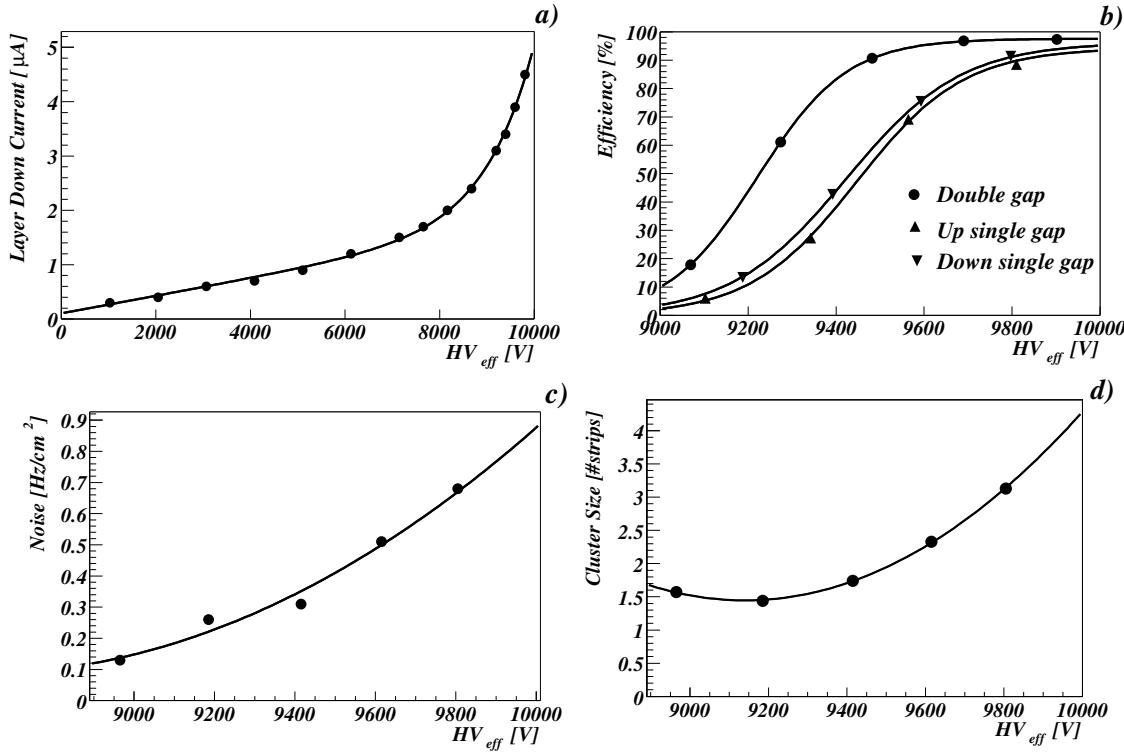
Данните за ефективноста са апроксимирани със следната функция:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{max}}{1 + e^{S(HV_{eff} - HV_{50\%})}} \quad (34)$$

където параметърът  $\epsilon_{max}$  представлява максималната ефективност, т.е. ефективността в платото. Параметърът  $HV_{50\%}$  е ефективното напрежение, при което камерата работи с 50% от максималната си ефективност, а параметърът  $S$  е пропорционален на наклона на кривата на ефективността при напрежение  $HV_{eff} = HV_{50\%}$ . Функцията (34) в литературата се нарича сигмоид или функция на Ферми.

На фиг. 46 са представени типични експериментални данни за тока на камерата, ефективността, шума и средният размер на кълстерите. Начертани са и кривите представляващи апроксимация на експерименталните данни. Неопределеността на измерването е по-малка от графичните символи с които са представ-

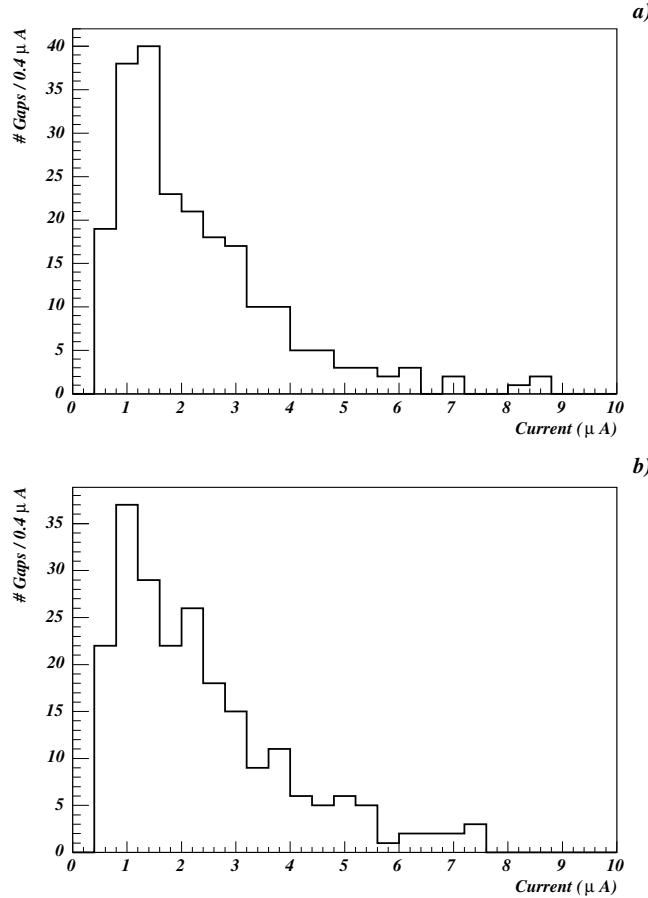
вени експерименталните точки.



Фигура 46: Пример на типично поведение на основните изследвани параметри, като функция на корегираното приложено (ефективно) напрежение. Данните са за случаен взета камера. Представени са и графиките на апроксимиращите функции: (а) волт-амперна характеристика; (б) ефективност на камерата в конфигурация “двоен газов процеп” и ефективност на неговите съставни единични газови процепи в зависимост от напрежението. Шумът е нормиран на активната площ на сигналните електроди, за да може да се сравнява шум на различни по големина камери; (д) среден размер на клъстерите в зависимост от високото напрежение.

## 7.2 Ток на камерата

На фиг. 47 е представено разпределението на тока, консумиран от камерата при напрежение  $HV_{eff} = 9,6 kV$  за горните и долните газови процепи на изследваните камерите със съпротивителна плоскост, т.е. за тяхния горен и долн слой. Слоеве с ток по-голям от  $10 \mu A$  не изпълняват приетият от колаборацията критерий за качество. В такъв случай, проблемната камера се изследва внимателно - проверява се дали проблема се дължи само на един от двойните газови процепи или и на двета такива. Проблемният двоен газов процеп се бракува и подменя с



Фигура 47: Разпределение на тока, потребяван от горния (а) и долния слой (б) на камерите. Средната стойност на разпределението за горния слой е приблизително  $2,3\mu A$  ( $RMS = 1,5\mu A$ ), а за долния слой е приблизително  $2,4\mu A$  ( $RMS = 1,6\mu A$ ).

нов. Ако проблемът се дължи на някой от контактите или захранващите кабели, то те се подменят. При всички положения, след интервенцията, камерата се изследва отново.

### 7.3 Ефективност по метода на съвпаденията

Ефективността се определя по метода на “съвпаденията”. Дефинира се, като отношението на събитията при които поне един сигнален електрод е сработил в тригърният порзорец към общия брой събития [105] [169]. Ширината на тригърният прозорец в случая е  $100 ns$ .

Приложена е също така корекция за фалшиви сработвания на камерата, т.е. за сработване на камерата в следствие на шум. Тази корекция се налага, защо-

то има, макар и минимална вероятност, камерата да не регистрира преминалия през нея мюон, но все пак да даде сигнал в тригерния прозорец поради случаен шум.

За наблюдаваната ефективност  $\epsilon_{obs}$  имаме:

$$\epsilon_{obs} = N_{obs}/N_{trig}, \quad (35)$$

където  $N_{obs}$  е броят на събитията, в които камерата е сработила в зададения тригера времеви прозорец, а  $N_{trig}$  е броят тригери.

Като се отчете вероятността  $P_s$  сигнален електрод да даде сигнал поради случайна причина, т.е. шум, може да се съобрази, че броят на събитията  $N_{obs}$  в даден времеви прозорец се задава по следния начин:

$$N_{obs} = \epsilon N_{trig} + P_s(1 - \epsilon)N_{trig}, \quad (36)$$

където  $\epsilon$  е ефективността на камерата, която трябва да се определи.  $\epsilon_{obs}$  е наблюдаваната ефективност определена по формула (35). Първият член в (36) дава броя събития, когато при тригер камерата е отчела преминаване на частица. Вторият член в (36) дава броя събития, когато при тригер камерата не е отчела преминаване на частица, но е сработила поради друга причина, т.е. шум.

Тогава имаме:

$$\epsilon_{obs} = \epsilon + P_s(1 - \epsilon) \quad (37)$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{obs} - P_s}{1 - P_s} \quad (38)$$

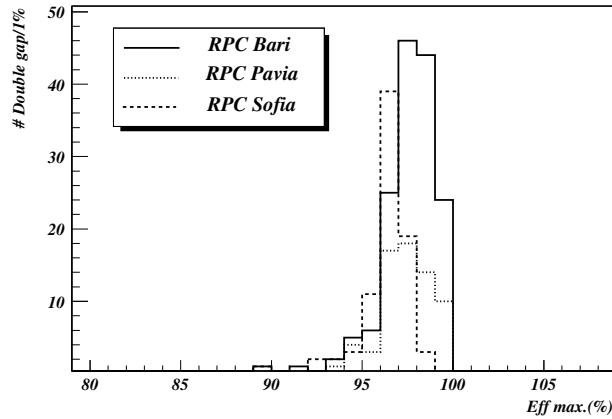
и ефективността на камерата се определя по формула (38).

Наблюдаваната ефективност и вероятността сигнален електрод да даде сигнал, поради случайна причина са разпределени биномиално и следователно за съответните неопределеноности  $\Delta\epsilon_{obs}$  и  $\Delta P_s$  имаме:

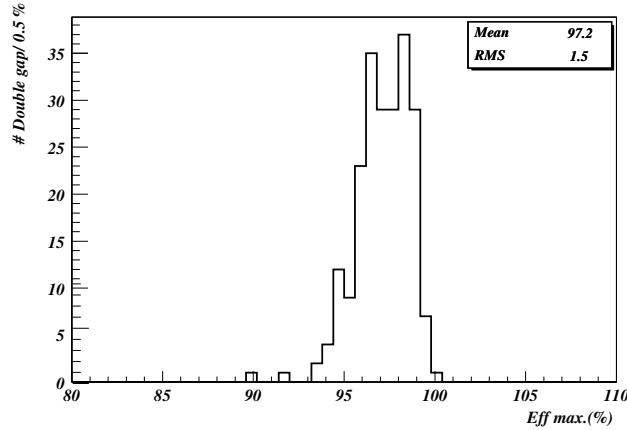
$$\Delta\epsilon_{obs} = \sqrt{\frac{\epsilon_{obs}(1 - \epsilon_{obs})}{N_{trig}}} \quad (39)$$

$$\Delta P_s = \sqrt{\frac{P_s(1 - P_s)}{N}} \quad (40)$$

На фиг. 48 е представено разпределението на максималната ефективност  $\epsilon_{max}$  за конфигурация “двоен газов процеп” за камерите изследвани на трите различни телескопа - София, Бари и Павия. На фиг. 49 е представено обобщение за максималната ефективност в конфигурация “двоен газов процеп” от трите телескопа. Средната стойност на разпределението е 97,2%. Камери с ефективност под 90% се отхвърлят.



Фигура 48: Разпределение на максималната ефективност на двойните газови процепи, изследвани на телескопите в София, Бари и Павия.

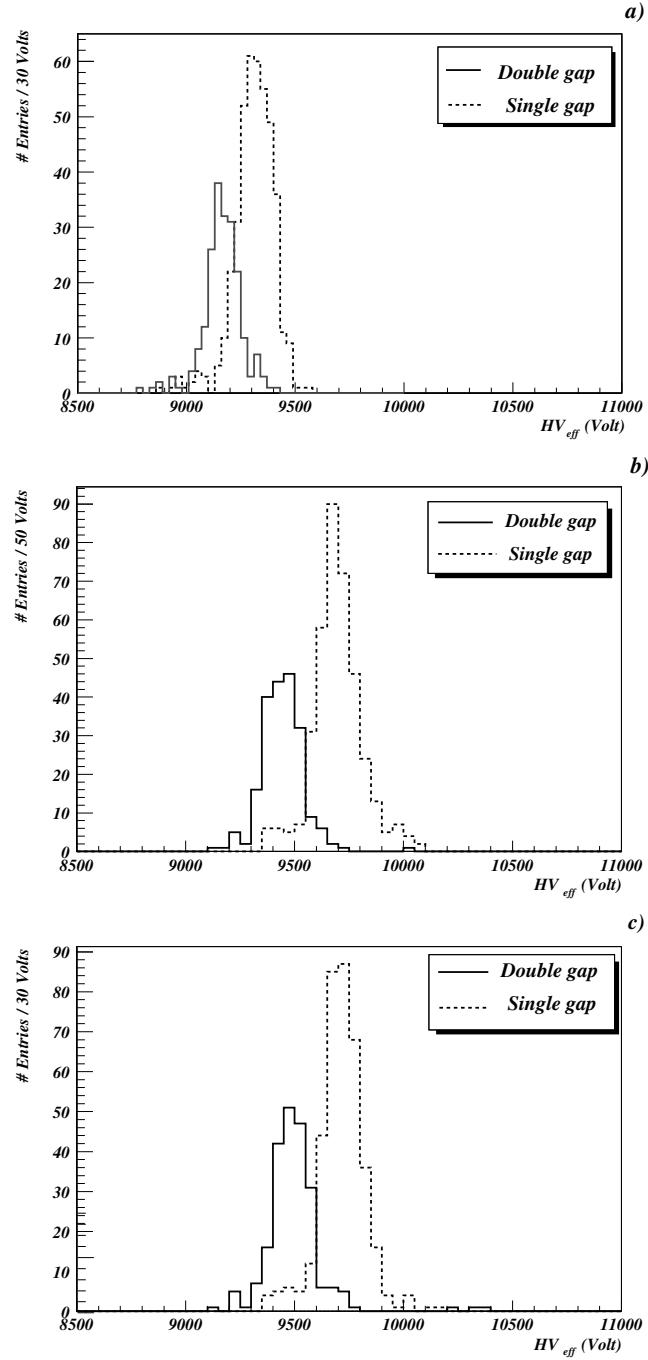


Фигура 49: Разпределение на максималната ефективност на двойните газови процепи.

На фиг. 50 са представени разпределенията на  $HV_{eff}$  за конфигурациите единичен и двоен газов процеп, при различни ефективности на камерите (50%, 90% и 95% от максималната ефективност).

Точката, отговаряща на 95% от максималната ефективност, наричаме “коляно” на графиката на ефективността. Както се очаква, напрежението за постигане на зададена ефективност при конфигурацията “двоен газов процеп” е по-малко от съответното напрежение при конфигурация “единичен газов процеп”.

Всяка камера се характеризира също и с наклона на кривата на ефективността. Наклона на кривата на ефективността се оценява, чрез величината  $\Delta_{10\%}^{90\%}$ , която дефинираме, като разликата в напрежението за достижане на 90% и на 10% от максималната ефективност  $\varepsilon_{max}$ . От (34) се вижда, че  $\Delta_{10\%}^{90\%}$  е обратнопропор-

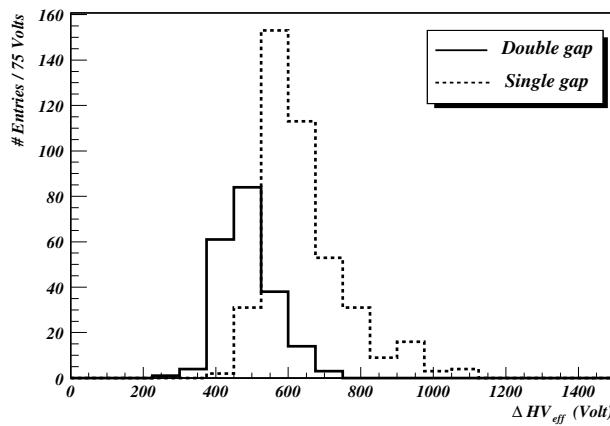


Фигура 50: Разпределение на ефективно високо напрежение ( $HV_{eff}$ ) при 50% от максималната ефективност (а); разпределение на  $HV_{eff}$  при 90% от максималната ефективност (б); разпределение на  $HV_{eff}$  при 95% от максималната ефективност (в).

ционално на  $S$ , т.e.  $\Delta_{10\%}^{90\%} \sim 1/S$ , или по-точно:

$$\Delta_{10\%}^{90\%} = \frac{1}{S} \ln 81 \quad (41)$$

Разпределението на  $\Delta_{10\%}^{90\%}$  е представено на фиг. 51.



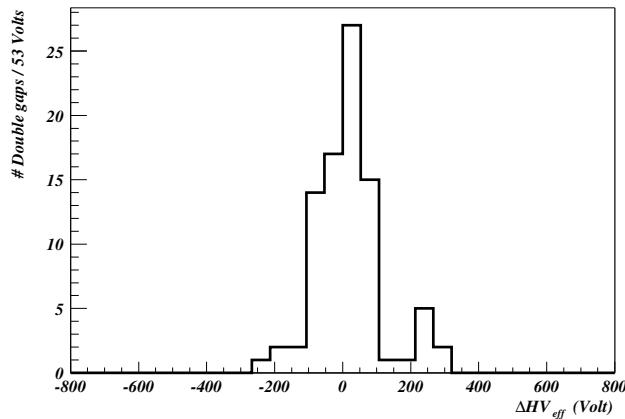
Фигура 51: Разпределение на  $\Delta_{10\%}^{90\%}$  за конфигурация единичен и двоен газов процеп.

Ширината на разпределението  $\Delta_{10\%}^{90\%}$  в случая на конфигурация “двоен процеп” е по-малка от тази за “единичен процеп”, което отговаря на по-добра хомогенност в поведението на камерите в режим “двоен процеп”.

Във всяка камера със съпротивителна плоскост за експеримента CMS има два или три, в зависимост от типа на камерата, разположени един до друг двойни газови процепа (фиг. 43). По този начин горните газови междини на двета (или трите) двойни газови процепа образуват един слой в камерата - горен слой (“UP”). Съответно долните газови междини образуват долн слой (“DOWN”). По време на изследванията, както и във финалната схема на свързване на камерите в експеримента, камерата се захранва от два високоволтови канала - един за горния слой и един за дения слой (фиг. 43). Камерите биха работили коректно само, ако разликите в напрежението необходимо за захранване на предния и задния модул не се различават драстично. При драстични разлики, може да се попадне в два неблагоприятни сценария:

- Ако настроим напрежението да бъде подходящо за “по-ефективния” модул, то “по-малко ефективният” няма да достигне до проектната ефективност.
- Ако пък настроим напрежението да бъде подходящо за “по-малко ефективния” модул, то “по-ефективният модулт” ще работи в стримерен режим, което е неприемливо.

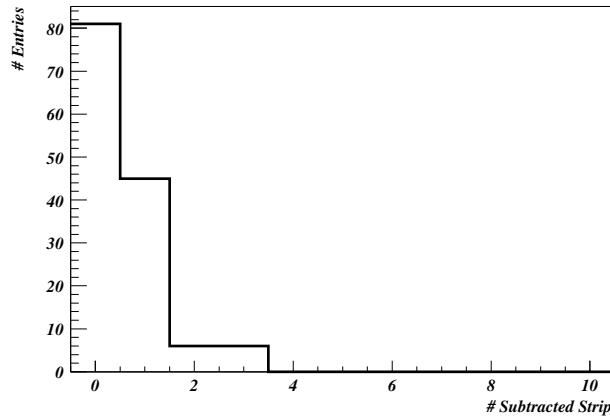
Поради тази причина е много важно разликите в напрежението необходимо за захранване на предния и задния модул да не се различават с повече от 100 – 200 V.



Фигура 52: Разпределение на разликата между високото напрежение отговарящо на “колоянето” на кривата на ефективността на предния и задния двоен газов процеп. Средната стойност на разпределението е прилизително  $19 V$  ( $RMS \approx 99 V$ ).

За оценка на разликата, може да използваме разликата в напрежението, необходимо за достигане на 95% от максималната ефективност за предния и задния двоен газов процеп в конфигурация “двоен газов процеп”. Резултата е представен на фиг. 52. Средно по-малко от  $100 V$  над напрежението на “колоянето” са достатъчни, за да достигне цялата камера максималната си ефективност.

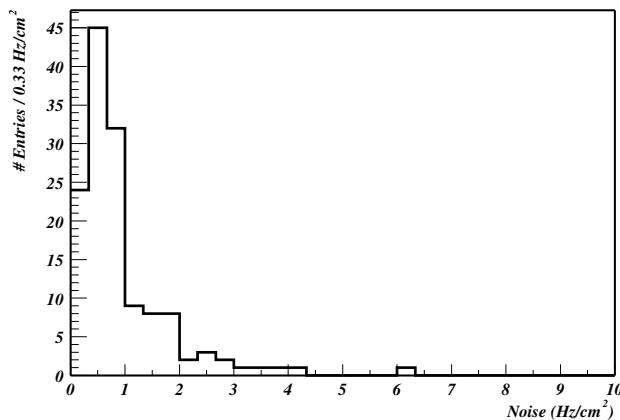
## 7.4 Шум



Фигура 53: Брой на неочетените “маскирани” сигнални електроди с шум над  $20 \frac{Hz}{cm^2}$  за всички камери.

Шум се дефинира, като броя на сработванията на сигналните електроди

за единица време, извън “прозореца” на тригера, нормирано на площта на сигналните електроди, т.е. активната площ на детектора. Прагът на платките на детекторната електроника позволява да се нагласяват ефективност и шум в желаните граници. Трябва да отбележим, че по-висок праг намалява ефективността и шума, а по-нисък - обратно увеличава ефективността и шума. Затова трябва да оптимизираме прага, така, че да имаме голяма ефективност и малък шум. Според изискванията на колаборацията, шум до  $10 \frac{Hz}{cm^2}$  се счита за приемлив<sup>44</sup>.



Фигура 54: Средна стойност на шума за конфигурация “двоен газов процеп” при напрежение  $V_{eff} = 9,6 \text{ kV}$ . Средната стойност на разпределението е приблизително  $0,9 \text{ Hz/cm}^2$ ,  $RMS \approx 0,9 \text{ Hz/cm}^2$

В случай, че шума се окаже неприемливо висок, проблемът се изследва внимателно. Най-често причината се оказва дефектна платка на детекторната електроника, която бива заменена с нова. В много от случаите, когато имаме голям среден шум се оказва, че той се дължи на един или няколко сигнални електрода. Според критериите на колаборацията е допустимо да има голям шум на един сигнален електрод, който в последствие може да се маскира. Това най-често е крайният електрод. Счита се, че този ефект се дължи на индуциране на шум върху крайния електрод от кабелите на високоволтовото захранване. Шумът на камерите се определя, като не се отчита приносът на единични сигнални електроди с шум над  $20 \frac{Hz}{cm^2}$ , като те се “маскират”. На фиг. 53 е показано разпределението на броят на “маскираните”, т.е. изключените от разглеждане сигнални електроди при анализа на всички камери от групата. Вижда се, че в много малко случаи имаме повече от един отстранен “шумен” сигнален електрод. Разпределението на средния шум при ефективно напрежение  $9,6 \text{ kV}$ , след маскирането

<sup>44</sup>Единиците  $Hz$  и  $Bq$  имат една и съща размерност -  $s^{-1}$ . Единицата  $Hz$  се използва за честота на периодични събития [170]. Величината  $Bq$  се използва за измерване на активност [171], но може да се използва и за измерване на честота на непериодични събития. Въпреки това често в литературата за честота на сработване [42] и шум на камери със съпротивителна плоскост [129] се използва единицата  $Hz$ ,  $\frac{Hz}{cm^2}$  и т.н.

на проблемните сигнални електроди е показано на фиг. 54. Изследваните камери имат средно равнище на шума под  $5 \frac{Hz}{cm^2}$ . Това е два пъти по-малко от допустимата стойност.

## 7.5 Среден размер на клъстерите

Под клъстер разбираме съвкупността от всички едновременно сработили съседни сигнални електроди. Размер на клъстера наричаме броя на сигналните електроди в клъстер, формиран в интервал от време  $25 ns$ . Средният размер на клъстера на камерата дефинираме, като средната стойност на разпределението на размера на всички клъстери.

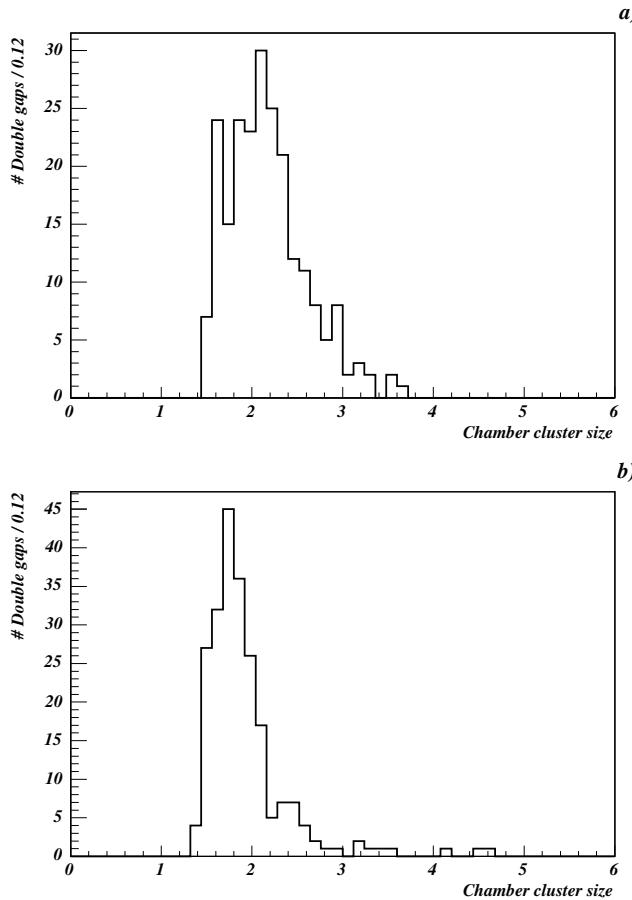
На фиг. 55(a) е представено разпределението на средния размер на клъстерите за всички изследвани камери при фиксирано напрежение  $HV_{eff} = 9,6 kV$ . Доколкото камерите имат различно работно напрежение, разпределението на средния размер на клъстери за всички изследвани камери при напрежение, отговарящо на напрежението на коляното на съответната камера също е представено на фиг. 55(b). Както може да се очаква, второто разпределение е със значително по-малка дисперсия от разпределението при фиксирано напрежение. Това се дължи на факта, че в напрежението на “коляното” се отчитат индивидуалните особености на конкретната камера.

Зависимостта на средния размер на клъстера на камерите от ефективното напрежение е представено на фиг. 56, като профил на хистограми, за всички изследвани камери. Точките представляват среднаната стойност на средния размер на клъстера на всички камери при различните ефективни напрежения  $HV_{eff}$ . Чертите представляват, средно-квадратичното отклонение на съответната хистограма.

## 7.6 Индуциран кръстосан паразитен сигнал

Както вече бе отбелязно, камерите със съпротивителна плоскост за експеримента CMS се състоят от две или три двойни газови процепа, сигналите от които се снемат посредством различни плоскости от сигнални електроди. Важно е прехвърлянето на паразитен сигнал от едната плоскост електроди на другата да е минимално, за да се избегне неопределеността при реконструиране на траекториите на частиците от тригерната система.

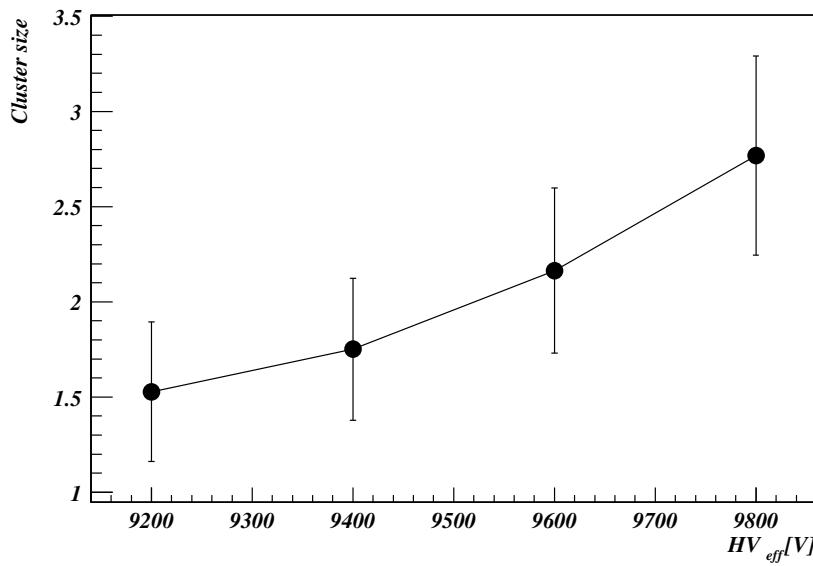
По време на изследванията с космични лъчи само един от двойните газови процепи е под тригерните сцинтилатори. Следователно, ако в газовия процеп, който не се изследва в момента имаме някакъв сигнал, то този сигнал не би трябвало да е корелиран по време с тригерния сигнал и най-вероятно ще се дължи на шум. Корелация във времето между сигналите от различните двойни газови



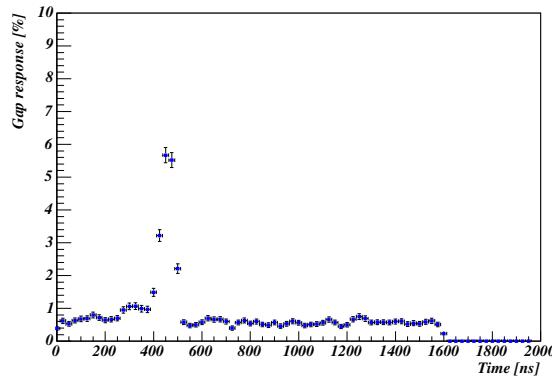
Фигура 55: Разпределение на средния размер на клъстера на камерите при: (а) напрежение  $HV_{eff} = 9,6 \text{ kV}$ , средна стойност приблизително 2,2 сигнални електроди; (б) напрежение, отговарящо на “коляното” на кривата на ефективността. Средна стойност приблизително 1,9 сигнални електрода;

процепи може да се очаква при регистриране на лавина, но това е сравнително по-рядко събитие от регистрирането на мюон. В действителност, обаче, както се вижда на фиг. 57, се наблюдава забележимо увеличаване на вероятността за сработването на двойния процеп, който не се намира под сцинтилаторите и то в тригерния прозорец – интервал от време  $425 - 525 \text{ ns}$ . Този ефект може да се дължи на индуциран кръстосан паразитен сигнал между сигналните електроди от предната и задната газова междина, космически лавини или външни електромагнитни смущения. Поради тази причина бе проведено изследване за евентуално индуциране на кръстосан паразитен сигнал между сигналните електроди от предния и задния газов процеп.

Индукрианият кръстосан паразитен сигнал се дефинира, като частта от събитията, при които едновременно са сработили разположени геометрично един срещу друг сигнални електроди от два съседни двойни газови процепа на една камера.



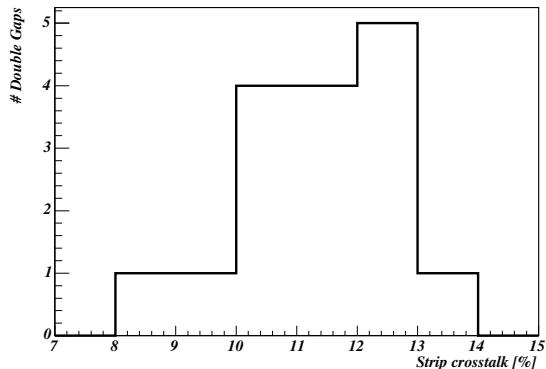
Фигура 56: Профил-хистограма. Разпределението на размера на кльстера на камерите в зависимост от ефективното напрежение. Точките и интервалите на грешките представлят съответно средната стойност и средно-квадратично отклонение на разпределенията.



Фигура 57: Вероятността за сработване на двойния газов процеп, който не е под тригера в зависимост от времето. Тригерният прозорец е с ширина  $100\text{ ns}$ , т.е. от  $425$  до  $525\text{ ns}$ . Тъй като системата за събиране на данни работи в конфигурация “общ стоп”, то на скалата е нанесено времето преди изчитането на данните от контролера, т.е. оста на времето е обрната. Данните са за един случайно подбран двоен газов процеп.

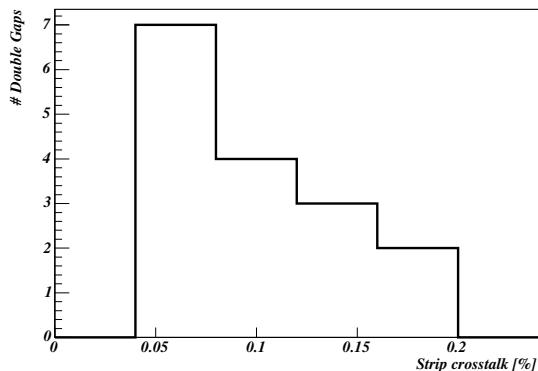
Подробно изследване на кръстосания паразитен сигнал се проведе, като се използваха данните от един сеанс на набиране на събития. Бяха използвани осем камери, т.е. 16 двойни газови процепа с подадено високо напрежение  $9,8\text{ kV}$ .

Броят събрани събития по време на сеанса е приблизително 14 000. На фиг. 58 е представено разпределение на вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал в тригерния прозорец, като за анализа са използвани всички събития.



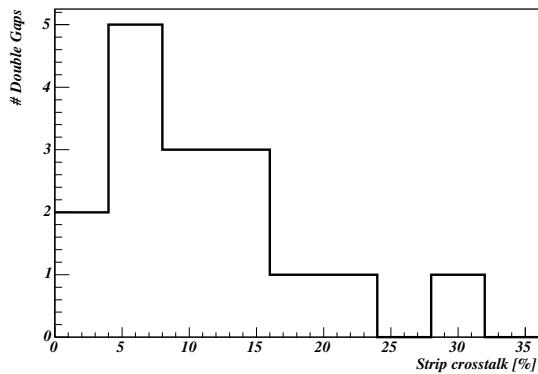
Фигура 58: Вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал в тригерния прозорец. Използвани са всички събития.

С цел да се елиминира евентуален принос на космически лавини или други смущения, бяха отстранени събитията с повече от шест едновременно сработили сигнални електроди в двойния процеп, разположен под тригерните сцинтилатори. На фиг. 59 е представено разпределение на вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал именно в този случай, т.е. анализирани са събития с не повече от шест едновременно сработили сигнални електроди в двойния процеп, разположен под тригерните сцинтилатори.

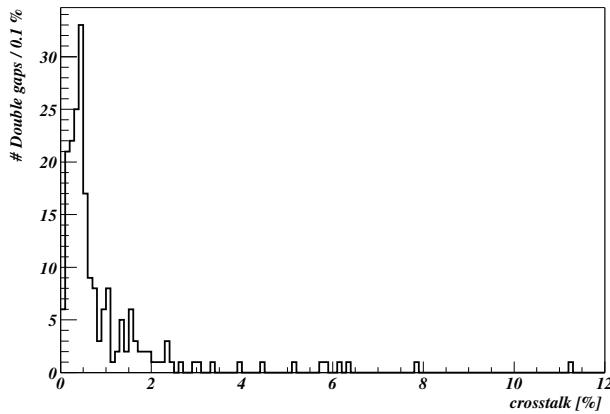


Фигура 59: Разпределение на вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал в тригерния прозорец. Използвани са събития с не повече от шест едновременно сработили сигнални електроди в двойния процеп, разположен под тригерните сцинтилатори.

Вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал извън тригерния прозорец също може да се изследва. Дефинира се като вероятността геометрично разположени един срещу друг сигнални електроди от съседни двойни газови междини да сработят едновременно извън прозореца на тригера. На фиг. 60 е представена вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал извън тригерния прозорец.



Фигура 60: Вероятността за индуцираният кръстосан паразитен сигнал извън тригерния прозорец.



Фигура 61: Вероятност за индуциране на кръстисан паразитен сигнал между предния и задния двоен газов процеп при напрежение  $9,8\text{kV}$ . Тригърните сцинтилатори се разположени над предния двоен газов процеп.

Тъй като вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал в тригерния прозорец е величина, която на практика може да повлияе на тригърната система на експеримента, то бе проведено подробно изследване на всички камери, използвайки наличните данни. На фиг. 61 е представена вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал при напрежение  $9,8\text{kV}$  за всички

камери. Отново са разгледани само събития с не повече от шест едновременно сработили сигнални електроди в газовия процеп под тригерните сцинтилатори.

Вижда се, че за повечето камери вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал е под 5%, като само в един случай е над 10%. Допустимите стойности на вероятността за индуциране на кръстосан паразитен сигнал са до 10%.

## 7.7 Заключение

Изследвани са параметрите и работните характеристики на 105 камери със съпротивителна плоскост (210 двойни газови процепа) и са разработени критерии за приемане на камерите.

- Показано е, че токът през един слой от камерите не надвишава  $10 \mu A$ , като средната стойност от всички измерени горни слоеве е  $2,3 \mu A$ , от всички долни слоеве е  $2,4 \mu A$ .
- Показано е, че средната стойност на разпределението от средния размер на клъстерите за всички камери се изменя от 1,5 до 2,7 сигнални електрода при промяна на ефективното напрежение от 9,2 kV до 9,8 kV.
- Показано е, че средната стойност на разпределението на максималната стойност на ефективността на камерите е 97,2%. Показано е, че мнозинството от камерите достигат и надвишават необходимата ефективност от 95%, но седем газови процепа имат по ниска ефективност и са бракувани.
- Показано е, че шумът на камерите е близо два пъти под максимално допустимата стойност от  $10 Hz/cm^2$ . Средната стойност на разпределението на шума на всички изследвани камери при напрежение 9,6 kV е  $0,9 Hz/cm^2$ .
- Показано е, че разликата в напрежението на предния и задния двоен газов процеп, необходимо за достигане на 95% от максималната ефективност е приемлива. Като резултат е установено, че два единични газови процепа могат да се свържат към един високоволтов канал, без това да влоши характеристиките им. Благодарение на това броят на необходимите високоволтови каналини е намален над два пъти.
- Показано е, че вероятността за индуциране на паразитен кръстосан сигнал върху сигналните електрони на двойните газови процепи е под максимално допустимата стойност от 10%.

## 8 Изследване на характеристиките на камерите с реконструирани мюонни следи

Описан е разработеният програмен пакет за реконструиране на мюонни следи.

Описани са методите за анализ на експерименталните данни от мюонните телескопи с помощта на реконструирани мюонни следи.

Представени са резултатите от изследванията с реконструирани мюонни следи на характеристиките на камерите [105].

Сравнени са резултатите получени без и с помощта на реконструирани мюонни следи.

### 8.1 Реконструиране на мюонни следи

Разработен е програмен пакет за реконструиране на следите в мюонния телескоп. С негова помощ е възможно да се оцени много по-точно ефективността на изследваните камери. Също така този метод дава възможност да се изследват и локалните характеристики на камерите. Разгледаните по-горе мюонни телескопи позволяват реконструиране на мюонния трек в двумерна равнина, където координатата по оста  $X$  се задава от позицията на сигналния електрод в камерата, а координатата по оста  $Y$  се задава от мястото на камерата в кулата на телескопа. За всяко събитие се прилага процедурата описана по-долу [105].

### 8.2 Разпознаване на образ

Групираме в клъстер едновременно сработилите съседни един на друг сигнални електроди. Сигналите са цифрови и поради това всеки клъстер се определя еднозначно с координатите  $(x, y)$  на своя геометричен център и своя размер. Събития с три или повече “толеми” клъстера, т.е. клъстери с размер по-голям от шест сигнални електрода, не се обработват, тъй като се считат за принос от космически лавини.

Мюонната следа се параметризира по следния начин:

$$X = B - (\operatorname{tg}\alpha)Y, \quad (42)$$

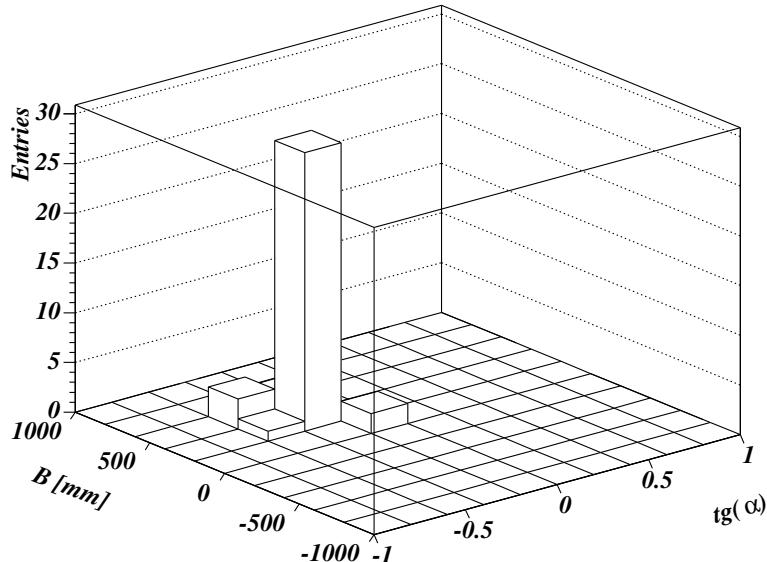
където  $X$  и  $Y$  са съответно координатите по хоризонталната и вертикалната ос, а  $\alpha$  е ъгъла между вертикалата и следата.

На всяка двойка клъстери  $(x_i, y_i)$  и  $(x_j, y_j)$ , принадлежащи на различни камери се съпоставя двойка параметри  $(\operatorname{tg}\alpha_{ij}, B_{ij})$ , съгласно следните формули:

$$\operatorname{tg}\alpha_{ij} = \frac{x_i - x_j}{y_i - y_j} \quad (43)$$

$$B_{ij} = x_i + \frac{x_i - x_j}{y_i - y_j} y_i \quad (44)$$

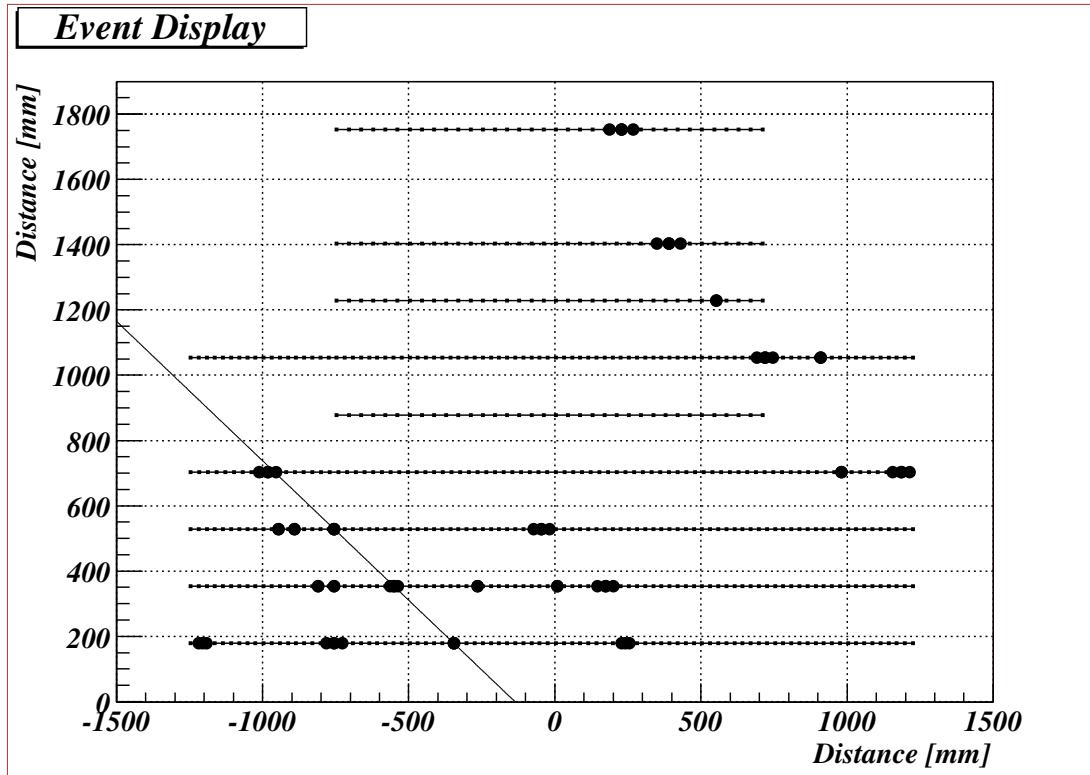
Всяка двойка клъстери дава принос към двумерната хистограма ( $\operatorname{tg}\alpha, B$ ) фиг. 62. Двойките, лежащи на права линия имат близки стойности на  $\operatorname{tg}\alpha$  и  $B$  и дават принос в един или няколко съседни клетки на хистограмата. Следователно, „кандидат“ за мюонен трек може да се намери, като се вземат клъстерите, даващи принос към клетката с най-голям брой попадения.



Фигура 62: Пример на двумерна ( $\operatorname{tg}\alpha, B$ ) хистограма. Приносите в максимума отговарят на клъстерите от кандидата за следа.

Обработват се само събития, в които има следа, която преминава и през двета тригерни сцинтилатора, за да се елиминира приноса от събития, при които тригерът е задействан, например от два отделни мюона. На фиг. 63 е представено реално събитие, на което се вижда как тригерът е задействан от два различни мюона.

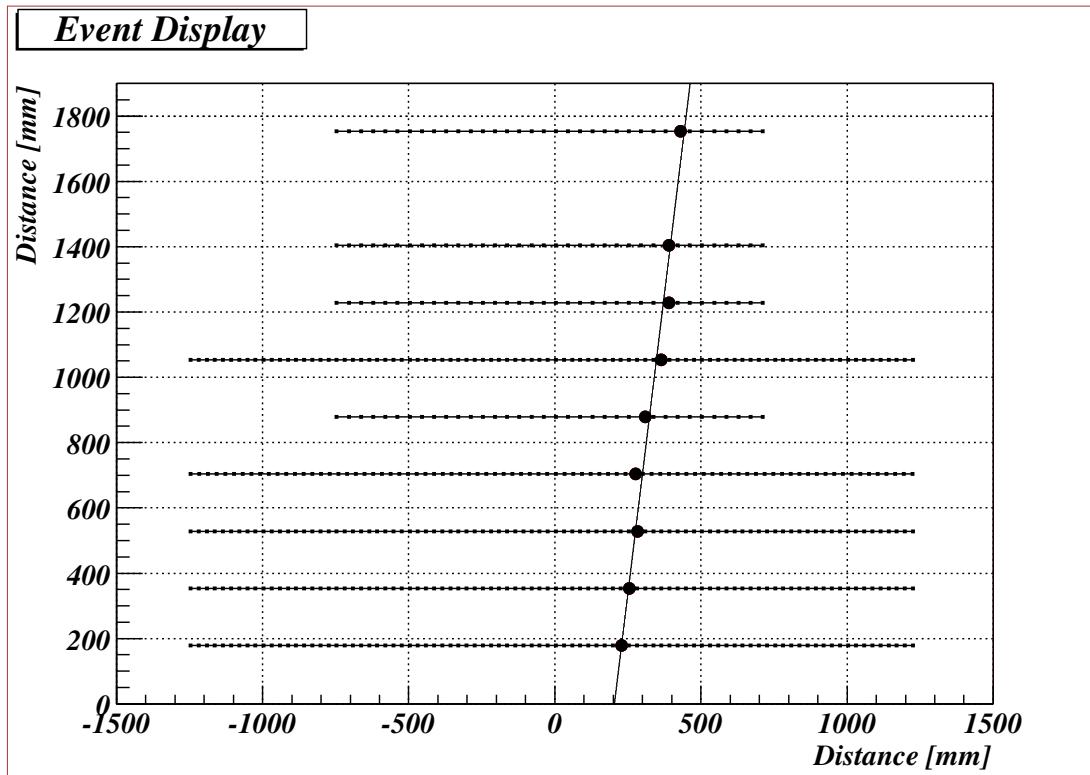
Една камера се избира за „изследвана“ камера, а другите камери служат за референтни камери, като само информацията от референтните камери се използва за реконструиране на мюонната траектория. Считаме, че траекторията е реконструирана успешно, ако имаме клъстери от тази траектория поне в четири



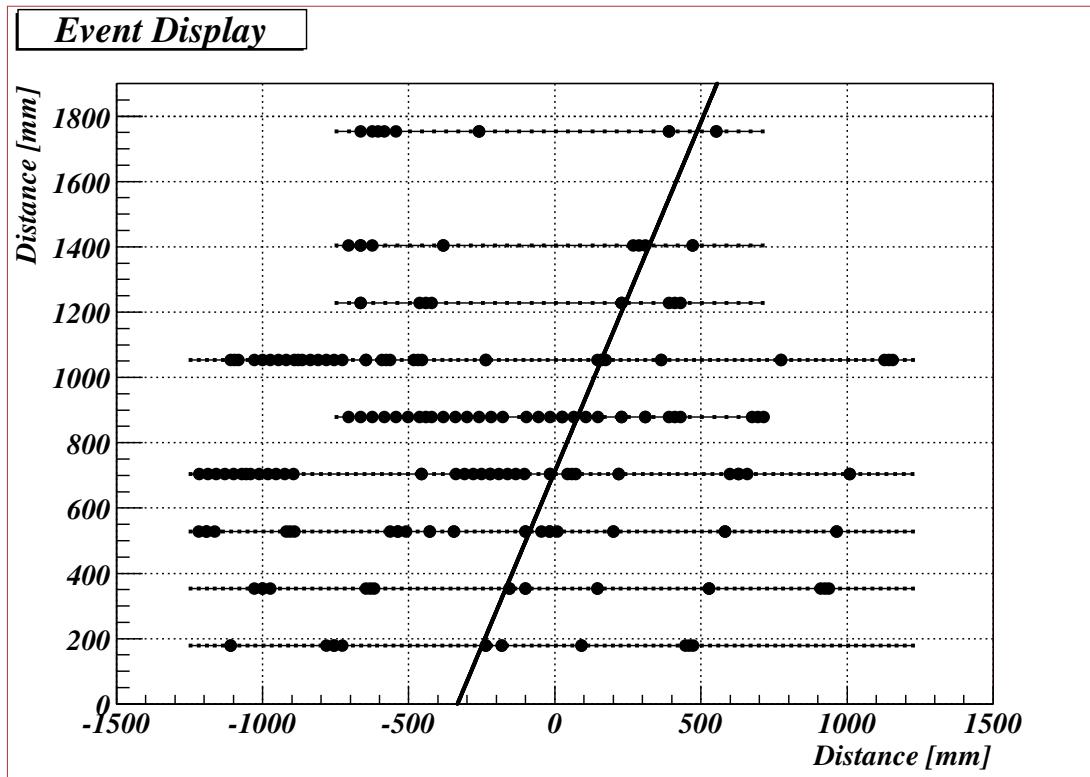
Фигура 63: Събитие с повече от един мюон. Ясно се вижда, че тригера е задействан от два различни мюона.

от референтните камери. Параметрите на мюонната траектория се получават от апроксимацията на така получените центрове на клъстерите с линейна функция, като за тегло се използва реципрочната стойност на размера на клъстерите. По време на реконструкцията и апроксимирането се използват само клъстери от референтните камери с цел да се избегнат систематични ефекти. Типично събитие с успешно реконструиран мюонен трек е показано на фиг. 64. Сигналните електроди на камерите са означени с точки, а сработилите сигнални електроди са означени с плътни кръгчета. Реконструираната мюонна траектория е означена с плътна линия.

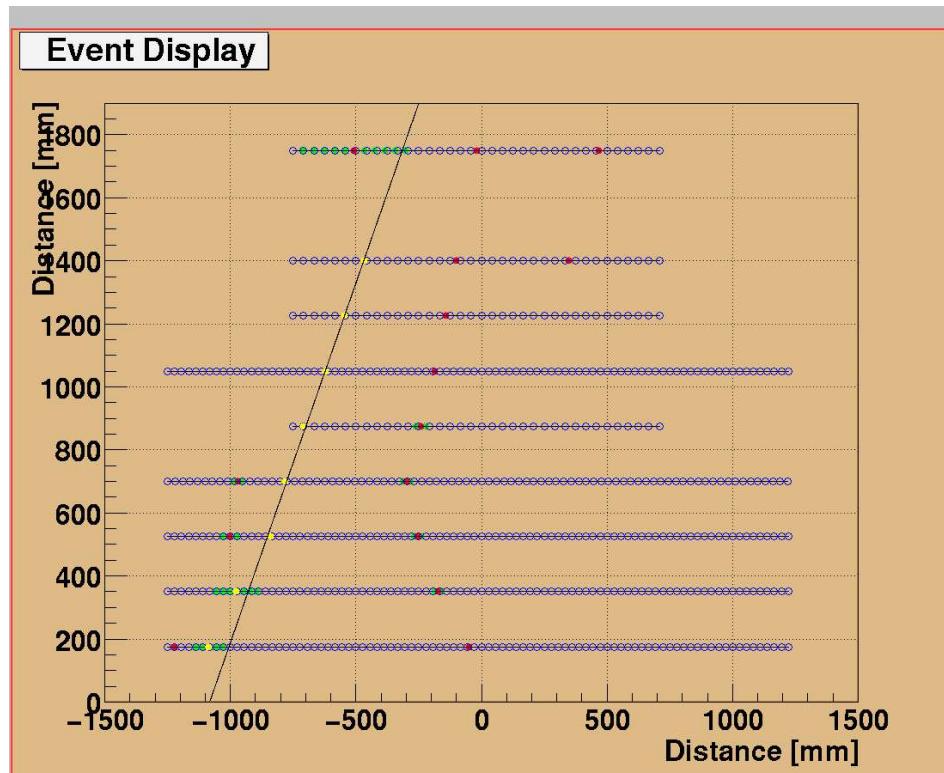
На фигури 65, 66, 67, 68 и 69 са дадени различни събития, които биха могли да повлият на анализа на данните, ако на се използва реконструкция.



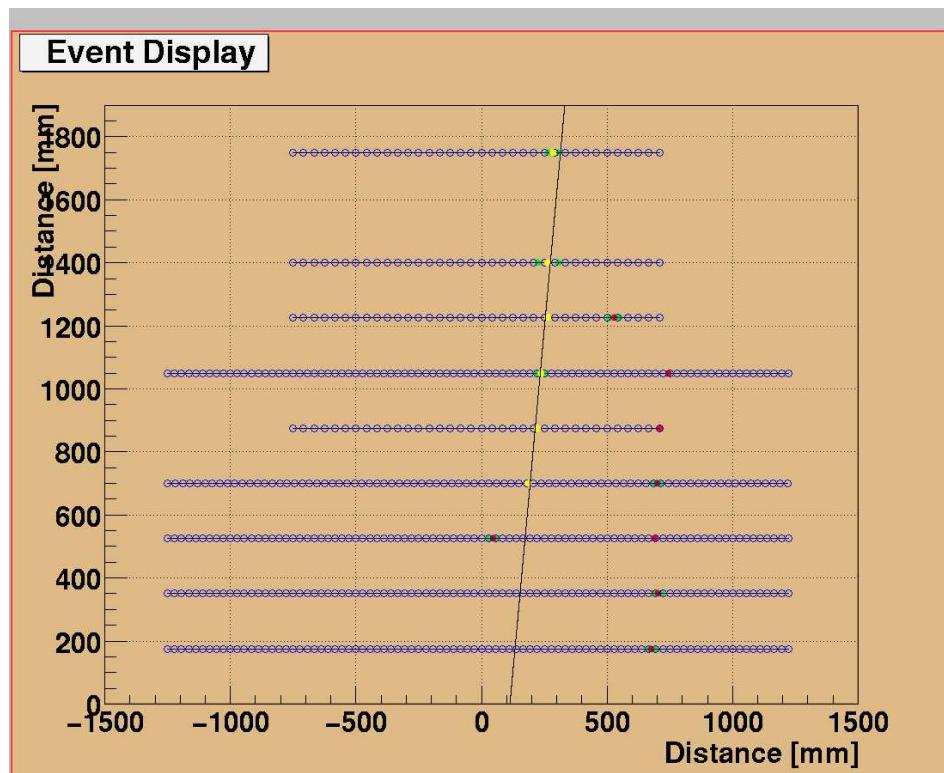
Фигура 64: Събитие с успешно реконструирана мюонна траектория.



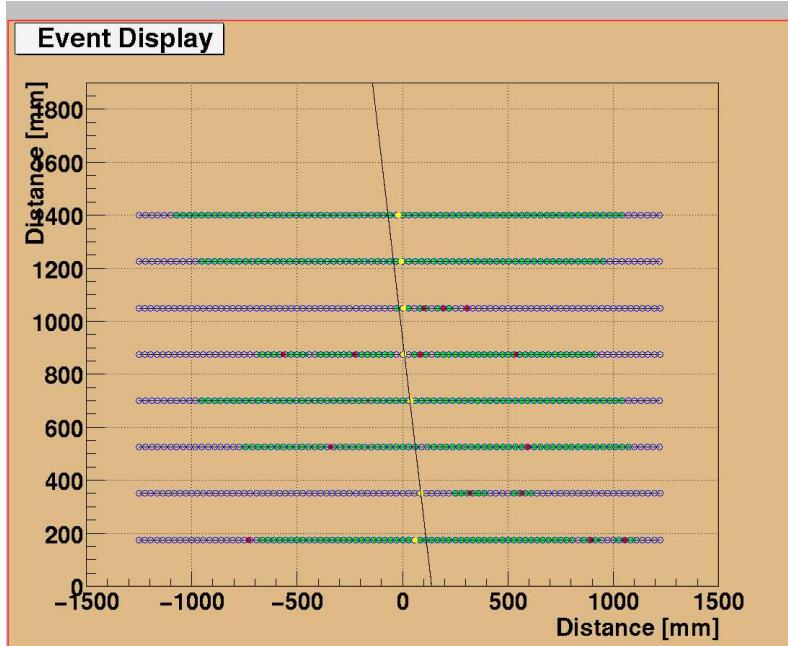
Фигура 65: Събитие с лавина.



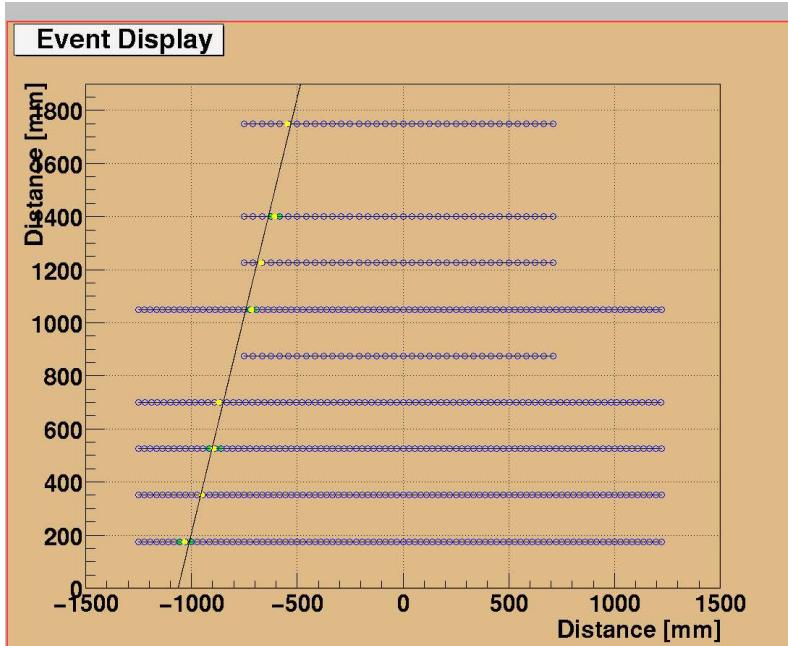
Фигура 66: Събитие с взаимодействие в мюонния телескоп.



Фигура 67: Задействане на тригера от два различни мюона.



Фигура 68: Събитие, където почти всички сигнални електроди са сработили.



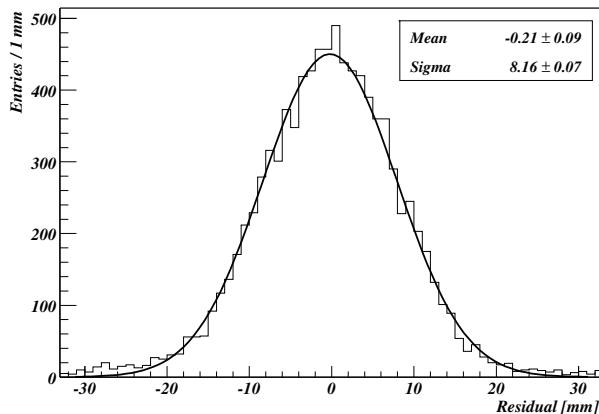
Фигура 69: Събитие, при което мюонът преминава покрай една от камерите. В този случай, ако не се използва реконструкция, това събитие ще даде принос към неефективността на камерата. В случай на реконструкция, при анализа ще се отчете, че мюонът не е преминал през активния обем на камерата и това събитие няма да се използва при оценка на ефективността на тази камера.

### 8.3 Анализ и резултати

Подробен анализ на параметрите на камерите може да се проведе, използвайки реконструираните мюонни траектории. Реконструирани са събитията от изследванията проведени върху 200 двойни газови процепа, при работно напрежение 9,6 kV и 9,8 kV. Тези стойности на напрежението са подбрани, за да сме сигурни, че детекторите работят в режим, при който достигат пълната си ефективност.

### 8.4 Глобални характеристики на камерите

След успешно реконструиране на траектория, определяме пресечната точка на следата и повърхността на активния обем на изследваната камера. На фиг. 70 е представено типично разпределение на разликата между пресечната точка на следата с повърхността на активния обем на изследваната камера и центъра на най-близкия клъстер. В този пример ширината на сигналните електроди е 27,3 mm, а разстоянието между два сигнални електрода е много по-малко от 1 mm.



Фигура 70: Апроксимация с функция на Гаус на разпределението на разликата между пресечната точка на следата с повърхността на активния обем на изследваната камера и центъра на най-близкия клъстер.

Дисперсията  $\sigma$  на разпределението представлява пространствената разделителна способност на камерата. За характеристика на пространствената разделителна способност често се използва и FWHM - пълната ширина на половината от максимума<sup>45</sup>, но в случая сме избрали да използваме дисперсията  $\sigma$  на гаусовото разпределение.

<sup>45</sup> англ. Full Width at Half Maximum

За дисперсията на Гаусовото разпределение от фиг. 70 очевидно е изпълнено:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{RPC}^2 + \sigma_{traj}^2, \quad (45)$$

където  $\sigma_{tot}$  е дисперсията на апроксимираното разпределение,  $\sigma_{traj}$  е неопределеността на трека, а  $\sigma_{RPC}$  е разделителната способност на камерата със съпротивителна плоскост. Доколкото неопределеността на трека  $\sigma_{traj}$  е пренебрежима, то:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{RPC}^2 + \sigma_{traj}^2 \approx \sigma_{RPC}^2, \quad (46)$$

Както е показано, разделителната способност се доминира от ширината на сигналния електрод. Пространствената разделителна способност на детектори с цифров сигнал, при разстояние между сигналните електроди  $s$  е  $\sigma = \frac{s}{\sqrt{12}}$  [31] [172].

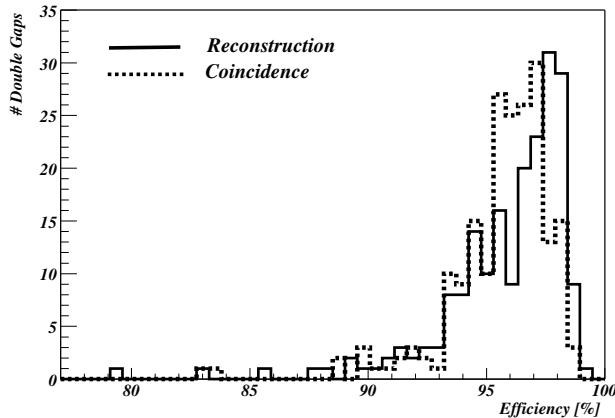
Средната стойност на разпределението, представлява отместването на камерата в кулата по оста X. С цел по-прецизно определяне на параметрите на камерата, програмата се стартира повторно, но този път позицията на камерата се коригира със стойността на отместването, т.е. програмно сме “наместили” камерата.

Глобалната ефективност на камерите се изчислява с реконструирани траектории. Ако реконструирана мюонна траектория премине през сработил сигнален електрод или негов съсед, то камерата се приема за сработила. Ефективността се определя като отношението на броя събития, при които камерата е сработила, към броя събития, при които имаме успешно реконструирана мюонна траектория, преминаваща през активния обем на камерата.

Ефективностите при напрежение 9,6 kV и 9,8 kV получена след реконструиране на трекове и тези получени по метода на съвпаденията, описан в предишната глава, са представени на фиг. 71 и фиг. 72. Както се забелязва от фигурите ефективността получена, чрез реконструкция е по-висока. Това се дължи главно на многочастични събития, подобни на показаните на фиг. 65, 66, 67, 68 и 69, които в случая на реконструкция са анализират по подходящ начин или не се отчитат въобще. Някои от камерите имат значително по-ниска ефективност с реконструкцията, тези камери се оказаха с различни проблеми.

## 8.5 Локални характеристики на камерите

Определянето на пресечната точка на траекторията на мюона и повърхността на активния обем на изследваната камера дава възможност да се изследва ефективността на камерата, като локална величина. Т.е. може да се изследва ефективността на всеки сигнален електрод поотделно.

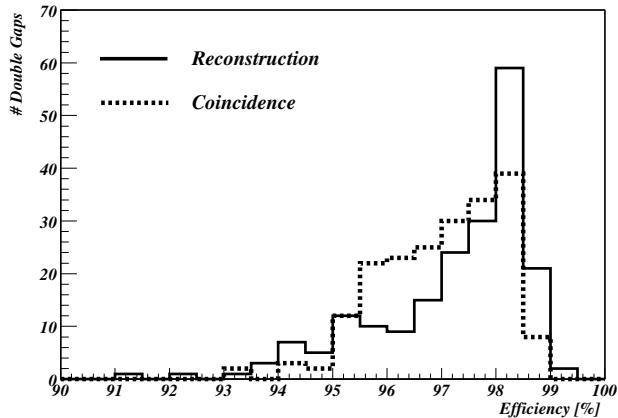


Фигура 71: Разпределение на ефективността при напрежение  $9,6 \text{ kV}$ , получена с реконструкция - плътна линия. Разпределение на ефективността при напрежение  $9,6 \text{ kV}$ , получена по метода на съвпаденията - прекъсната линия.

Ако има сработил сигнален електрод съвместим в рамките на експерименталната неопределеноност с пресечната точка на следата с камерата, то електродът се счита за сработил. Ако няма съвместим със следата сигнален електрод, то сигналният електрод, през който е преминала следата се отчита като неефективен. Ефективността на сигнален електрод се определя като отношението на броя събития, при които той е сработил, когато през него е преминала следа към общия брой събития, при които през него е преминала следа.

Типична графика на ефективността за отделните сигнални електроди на една камера е представена на фиг. 73. Вижда се, че ефективността, както би следвало да се очаква, е равномерна в изследваната област. На фиг. 74 е представена хистограма на ефективността на сигналните електроди на камерата. Средно-квадратичното отклонение на такава хистограма може да служи за оценка на хомогенността на ефективността на сигналните електроди. На фиг. 75 е представено разпределение на средно-квадратичното отклонение на ефективността на сигналните електроди за всички изследвани двойни газови процепи при захранващо напрежение  $9,8 \text{ kV}$ . Средно-квадратичното отклонение е изчислено в интервала от 0 до 100 %, като клетките на хистограмата са с размер 1 %. От разпределението се вижда, че средно-квадратичното отклонение на локалната ефективност за повечето двойни газови процепи е под 5 %. Случайте с по-голямо средно-квадратично отклонение са изследвани допълнително. Установено е, че те се дължат не на камерите, а на дефектни канали на системата за събиране на данни. Дефектните канали на системата за събиране на данни се дължат почти изключително на прекъснати сигнални кабели, чиято подмяна е практически невъзможна поради финансови и технически причини.

Локалната ефективноста може да се изследва много по-подробно, като не се



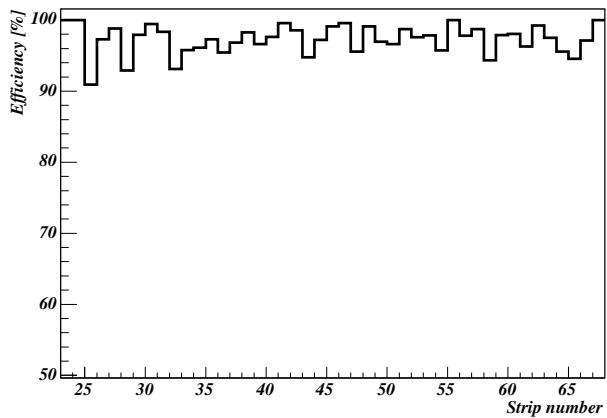
Фигура 72: Разпределение на ефективността при напрежение  $9,8 \text{ kV}$ , получена с реконструкция – плътна линия. Разпределение на ефективността при напрежение  $9,8 \text{ kV}$ , получена по метода на съвпаденията – прекъсната линия.

ограничаваме с размера на сигналните електорди – могат да се изследват както по-големи, така и по-малки области [173]. Локалната ефективността в случая се дефинира по аналогичен начин.

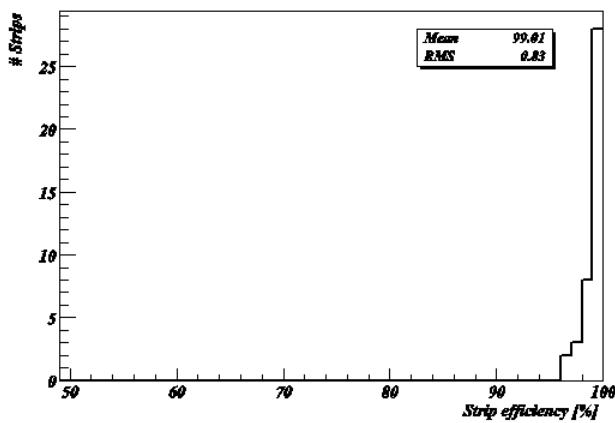
Могат да се очакват области с по-малка локална ефективност, дължащи се на ограничителите, които поддържат бакелитните електроди на газовия процес на фиксирано разстояние един от друг. Тези ограничители са цилиндрични обекти с диаметър  $0,8 \text{ cm}$  и височина  $2 \text{ mm}$ , залепени за бакелитните плоскости във възлите на квадратна мрежа с размер на клетката  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ .

С цел да се подчертая ефекта, дължащ се на ограничителите и ефективно да се увеличи статистиката, при анализа на данните камерата е разделена на ивици с ширина  $100$  или  $200 \text{ mm}$ . Тези ивици са насложени и центрирани при анализа програмно една върху друга и е изследвана локално ефективността. Локалната ефективност на такива ивици е представена на фиг. 76 и фиг. 77. Ясно се виждат области с по-ниска ефективност. Положението и размера на областите с по-малка ефективност са в добро съответствие с положението и размера на ограничителите. Разстоянието между съседните неефективни области и разстоянието между ограничителите са също в добро съответствие.

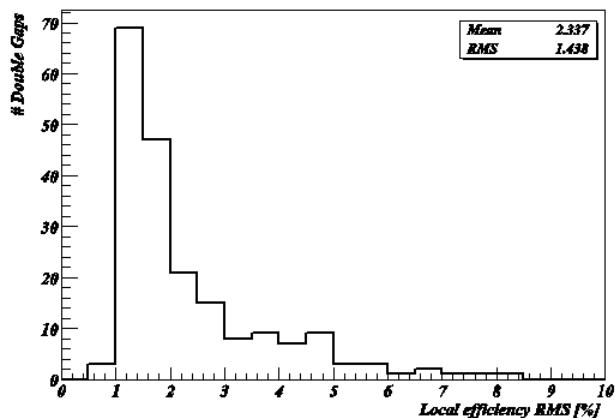
Трябва да подчертаем, че по-малката ефективност наблюдавана на фиг. 76 и фиг. 77 се дължи на “изкуствено” наслагване на ефектите на десетки пластмасови ограничители. В действителност ефекта, дължащ се на един ограничител е пренебрежим на фона на ефективността на цялата камера.



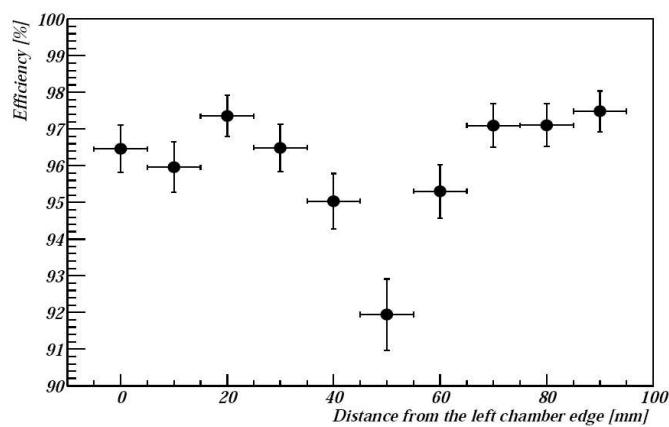
Фигура 73: Ефективността на сигналните електроди на една камера. По оста  $X$  имаме номера на сигналния електрод [173].



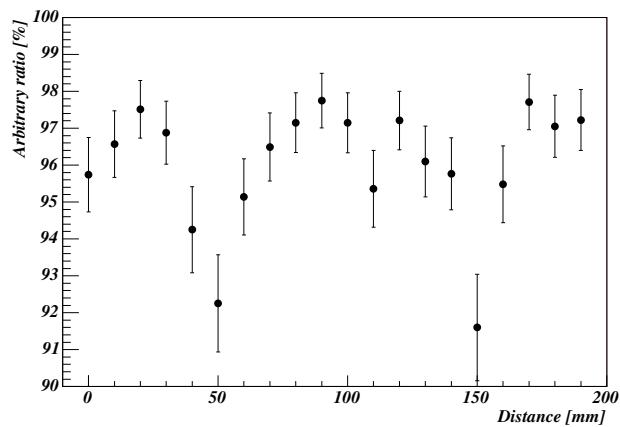
Фигура 74: Разпределение на ефективността на сигналните електроди на една двойна газова междина при напрежение  $9,8kV$  [173].



Фигура 75: Разпределение на средно-квадратичото отклонение на ефективността на сигналните електроди за всички изследвани двойни газови прицели при захранващо напрежение 9,6 kV [173].



Фигура 76: Локална ефективност. Камерата е “разделена” на ленти с ширина 100 mm, които са “наложени” една върху друга. Разстоянието между две неефективни области съвпада с разстоянието между сигналните електроди [173].



Фигура 77: Локална ефективност. Камерата е “разделена” на ленти с ширина  $200\text{ mm}$ , които са “наложени” една върху друга. Разстоянието между две не-ефективни области съвпада с разстоянието между сигналните електроди [105].

## 8.6 Заключение

- Разработена е специализирана методика за изследване на камерите с космически лъчи.
- Разработен е метод за реконструиране на мюонни следи и с негова помощ са изследвани работните характеристики на камерите.
- Определени са ефективностите на камерите при различни подадени напрежения. Показано е, че камерите имат по-висока ефективност от тази определена по метода на съвпаденията. Показано е, че няколко камери имат значително по-ниска ефективност и при тях са открити сериозни проблеми.
- Определена е локалната ефективност на камерите, която е много висока. За първи път е показано, че ефективността на камерите е равномерна по цялата им активна площ.
- Извършена е оценка на влиянието на цилиндричните ограничители в газовите процепи върху ефективността на камерите. Показано е убедително, че неефективността дължаща се на ограничителите е пренебрежима.
- За първи път е извършена оценка на пространствената разделителна способност на камерите. Показано е, че тя отговаря на теоретичната стойност и е по-малка от ефектите дължащи се на многократно разсейване в съответната станция.

## 9 Научни приноси

1. Разработена е технология за асемблиране на камери със съпротивителна плоскост и тестови процедури за контрол на качеството.
2. Изследвано е поведението на камерите при продължителна работа и е разработен метод за екраниране влиянието на високоволтовото захранване върху характеристиките им. В резултат значително е намалял шумът и токът на камерите. Отстранени са проблеми в механичната конструкция на камерата, водещи до недопустимо механично напрежение върху газовите процепи.
3. Променена е конструкцията на газовата система. Извършен е подбор на подходящи материали за газовата система на камерите.
4. Разработени са камери - прототипи и е проведено изследване на характеристиките им на спонове в ускорителя SPS.
  - (а) С помощта на прототипите е изследвано поведението на камерите при продължителна работа.
  - (б) Показано е, че камерите могат да работят при интегриран заряд, еквивалентен на десет години работа на ускорителя LHC без съществено изменение на характеристиките им.
  - (в) Изследвани са ефектите върху пълномащабни камери-прототипи от тип RB1 в следствие на облъчване с радиация на установката GIF, при интегриран заряд в прототипите, еквивалентен на пет години работа на ускорителя LHC. Показано е, че камерите запазват работните си характеристики при интегриран заряд, еквивалентен на пет години работа на ускорителя LHC.
  - (г) Показано е, че при продължително прдухване на камерите със "суха" газова смес работните им характеристики значително се влошават и падат под минималните изисквания. Разработен е метод за възстановяване на работните характеристики на камерите, както и за предотвратяване на влошаването им, чрез използването на газова смес с водни пари.
5. Разработен е мюонен телескоп за изследване на камери със съпротивителна плоскост. Разработени са програмни пакети за събиране и обработка на данни от телескопите.
6. Разработен е подвижен стенд за тестване на камери със съпротивителна плоскост, включващ газова, нисковолтова и високоволтова система, устройство за измерване шума на камерата, система за проверка функционалността на платките на детекторната електроника и  $I^2C$  шината.

7. Изследвани са параметрите и работните характеристики на 105 камери със съпротивителна плоскост (210 двойни газови процепа) и са разработени критерии за приемане на камерите.

- (а) Показано е, че токът през един слой от камерите не надвишава  $10 \mu A$ , като средната стойност от всички измерени горни слоеве е  $2,3 \mu A$ , от всички долни слоеве е  $2,4 \mu A$ .
- (б) Показано е, че средната стойност на разпределението от средния размер на кълстерите за всички камери се изменя от 1,5 до 2,7 сигнални електрода при промяна на ефективното напрежение от  $9,2 kV$  до  $9,8 kV$ .
- (в) Показано е, че средната стойност на разпределението на максималната стойност на ефективността на камерите е 97,2%. Показано е, че мнозинството от камерите достигат и надвишават необходимата ефективност от 95%, но седем газови процепа имат по ниска ефективност и са бракувани.
- (г) Показано е, че шумът на камерите е близо два пъти под максимално допустимата стойност от  $10 Hz/cm^2$ . Средната стойност на разпределението на шума на всички изследвани камери при напрежение  $9,6 kV$  е  $0,9 Hz/cm^2$ .
- (д) Показано е, че разликата в напрежението на предния и задния двоен газов процеп, необходимо за достигане на 95% от максималната ефективност е приемлива. Като резултат е установено, че два единични газови процепа могат да се свържат към един високоволтов канал, без това да влоши характеристиките им. Благодарение на това броят на необходимите високоволтови каналини е намален над два пъти.
- (е) Показано е, че вероятността за индуциране на паразитен кръстосан сигнал върху сигналните електрони на двойните газови процепи е под максимално допустимата стойност от 10%.

8. Разработена е специализирана методика за изследване на камерите с космически лъчи.

- (а) Разработен е метод за реконструиране на мюонни следи и с негова помощ са изследвани работните характеристики на камерите.
- (б) Определени са ефективностите на камерите при различни подадени напрежения. Показано е, че камерите имат по-висока ефективност от тази определена по метода на съвпаденията. Показано е, че няколко камери имат значително по-ниска ефективност и при тях са открити сериозни проблеми.
- (в) Определена е локалната ефективност на камерите, която е много висока. За първи път е показано, че ефективността на камерите е равномерна по цялата им активна площ.

- (г) Извършена е оценка на влиянието на цилиндричните ограничители в газовите процеси върху ефективността на камерите. Показано е убедително, че неефективността дължаща се на ограничителите е пренебрежима.
- (д) За първи път е извършена оценка на пространствената разделителна способност на камерите. Показано е, че тя отговаря на теоретичната стойност и е по-малка от ефектите дължалици се на многократно разсейване в съответната станция.

## 10 Благодарности

Бих искал да изразя искрената си благодарност към доц. д-р Леандър Литов под чието ръководство работя от 1999 г. насам, най-напред като негов дипломант, а по-късно като докторант и асистент. Благодаря му за всичко което е направил за мен: за знанията които ми е дал, за чудесните условия за работа, за разбирането и всеотдайнността с които се отзовава при всички възникнали проблеми, както и за топлото отношение, което проявява към всички свой студенти, дипломанти и докторанти, за неговата всеотдайност и самораздаване. Бих искал да му благодаря също така и за интересната и актуална тема на настоящата дисертация, както и за възможността да специализирам във водещи в областта лаборатории, като ЦЕРН и ИНФН.

Искам също така да благодаря на колегите от Института за Ядрени Изследвания и Ядрена Енергетика към БАН с които участвахме заедно от Българска страна в проекта по разработването, изграждането и изследването на камери-те със съпротивителна плоскост за експеримента CMS и по-специално на ст.н.с. Владимир Генчев, ст.н.с. Георги Султанов, Цветомир Ангелов, Петър Ванков, Ивайло Пеев, Иван Атаносов, Георги Георгиев.

Искам да благодаря и на проф. Джузепе Ясели с когото имах честа да работя в ръководената от него група в Националния Институт за Ядрена Физика в гр. Бари (Италия). Искам също така да благодаря на моите колеги и приятели Пейчо Петков и Антон Димитров с които бяхме заедно в Бари, в трудни и във весели моменти, за дългите и ползотворни дискусии на различни теми и въобще на приятното време изкарано с тях. Благодаря също така и на инж. Константин Абаджиев, който помагаше на мен и на всички българи по време на престоя им в Бари. Трябва да благодаря също така и на останалите колегите от Бари за топлия прием и приятелското отношение, най-вече на Габриела Пулиезе, Емануела Кавало, Марчело Абреша, Анна Колалео, Марчело Маджи, Флавио Лодо, Антонио Раниери, Джулиана Комунале, Рафаело Трентадуе, Салваторе Нуцо и т.н.

За мен е приятно задължение да благодаря на всички преподаватели от Катедра Атомна Физика и Физическия Факултета, който ми дадоха изключително много знания в областта на физиката.

Искам също така да благодаря и на останалите колеги от Групата по Физика на Елементарните Частици в Софийския Университет за подкрепата и доброто отнищение, а по-специално на доц. Румен Ценов, доц. Димитър Колев, Николай Дърменов, Стоян Стойнев, Мартин Макариев, Евелина Маринова, Венелин Кожушаров, Галина Ванкова, Милена Дюлендарова.

Не на последно място искам да благодаря и на моето семейство за непрекъснатата подкрепа, която ми е оказвало.

Използвани съкращения и означения:

KKM - матрица на Кабибо-Кобаяши-Маскава

КХД - квантова хромодинамика

MCCM - MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model) минимално суперсиметрично разширение на СМ

СМ - стандартен модел на електрослабите и силните взаимодействия

ALICE - A Large Ion Collider Experiment

ATLAS - A Toroidal LHC ApparatuS

CMS - Compact Muon Solenoid

CSC (Cathode Strip Chamber) - катодни стрипови камери

DT (Drift Tube) - камери с дрейфови тръби или за по-кратко дрейфови камери

GIF(Gamma Irradiation Facility) - комплекс за облъчване с гама лъчи

GMT (Global Muon Trigger) - глобален мюонен тригер

L1 ( Level-1) - тригер от първо ниво

LEP (Large Electron-Positron Collider) - голям електрон-протонен ускорител на насрещни спонове

LHC (Large Hadron Collider) - голям адронен ускорител на насрещни спонове

LHCb - Study of CP violation in B-meson decays at the LHC collider

LSP (lightest superparticle) - най-леката суперсиметрична частица

PACT (Pattern Comparator Trigger) - тригер със сравняване на шаблони

PET - полиетиленов терефталат

PS (Proton Synchrotron) - протонен синхротрон

QED (Quantum electrodynamics) - квантова електродинамика

RPC (Resistive plate chamber) - камера със съпротивителна плоскост

SPS (Super Proton Synchrotron) -супер протонен синхротрон

TOTEM - Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC

$E_T^{miss}$  - недостигаша напречна енергия

$P_T$  - напречен импулс

$\eta$  -псевдобързина

## Публикации във връзка с дисертацията

1. M. Abbrescia, ... B. Pavlov et al., NIM A 550 (2005) 116-126, "Cosmic Ray Tests of double-gap resistive plate chambers for the CMS experiment"
2. M. Abbrescia, ... B. Pavlov et al., NIM A 533 (2004) 208-213, "The cosmic rays quality test procedure for the CMS barrel resistive plate chambers"
3. M. Abbrescia, ... B. Pavlov et al., NIM A 533 (2004) 102-106, "Study of long-term performance of CMS RPC under irradiation at the CERN GIF"
4. M. Abbrescia, ... B. Pavlov et al., NIM A 535 (2004) 283-286, "Production and test of one-third of barrel Resistite Plate Chambers of the CMS experiment at LHC"

## Доклади на конференции във връзка с дисертацията

1. B. Pavlov, "CMS barrel resistive plate chambers - tests and results", XXIII Physics in Collision, Zeuthen, Germany, June 26-28, ed.: S.Riemann, W.Lohmann, 2003
2. T. Anguelovet, ... B. Pavlov et al. "CMS barrel resistive plate chambers - assembly and preliminary tests", Meeting in Physics at University of Sofia, 2003
3. A.Dimitrov, ... B. Pavlov et al. "Cosmic Muon Trajectory Reconstruction for Compact Muon Solenoid Resistive Plate Chambers", Meetings in Physics at University of Sofia, vol. 6, 2005
4. B. Pavlov, AIP Conf.Proc.899:215-216,2007, "CMS muon system overview"
5. T. Angelov, ... B. Pavlov et al., "Test set-up for the CMS resistive plate chambers", Meeting in Physics at University of Sofia, vol.3 ed. A. Proykova, Heron Press, Sofia, 2002

## Вътрешен доклад на колаборацията

1. K. Abadjiev, ... B. Pavlov et al., "Resistive Plate Chambers Assembly Procedure" CMS IN-2003/032

## Литература

- [1] A. Pich, "The Standard Model of Electroweak Interactions", arXiv:hep-ph/0502010v1, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0502010>
- A. Pich, "The Standard Model of Electroweak Interactions", arXiv:0705.4264v1, <http://arxiv.org/abs/0705.4264>

- [2] H.D. Politzer, Phys. Rev. Lett 30 (1973) 1346;  
H. Fritzsh and M. Gell-Mann, Proc. XVI Int. Conf. on High Energy Physics, eds. J. D. Jackson and A. Roberts (Fermilab 1972).
- [3] S. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264. A. Salam, in: ‘Elementary Particle Theory’, W. Svartholm,ed., Almquist and Wiksell, Stockholm,1968;
- [4] P. W. Higgs, “Spontaneous Symmetry Breakdown Without Massless Bosons”, Phys. Rev. 145 (1966) 1156-1163.
- [5] Particle Data Group, Review of Particle Physics, Phys. Lett. B592 (2004) 1.
- [6] T. Hambye and K. Riesselmann, Phys. Rev. D55 (1997) 7255.
- [7] R. Kinnunen, “LHC Potential for the Higgs Boson Discovery”, CMS CR-2004/058, [http://cmsdoc.cern.ch/documents/04/cr04\\_058](http://cmsdoc.cern.ch/documents/04/cr04_058)
- [8] LEP Higgs Working Group, Phys. Lett. B569 (2003) 61.
- [9] The LEP ElectroweakWorking Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>
- [10] S.P. Martin, in Perspectives on Supersymmetry , edited by G.L. Kane (World Scientific, Singapore, 1998) pp. 198; hep-ph/9709356;
- [11] I.J.R. Aitchison, hep-ph/0505105.
- [12] G.W. Anderson and D.J. Castano, hep-ph/9409419, Phys. Lett. B347 (1995) 300.
- [13] N. Polonsky, Supersymmetry: Structure and phenomena. Extensions of the standard model, Lect. Notes Phys. M68, 1 (2001).
- [14] CMS Collaboration, CMS Physics Performance, Physics Technical Design Report, Volume II, 2006, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 995-1579, CMS TDR 8.2, CERN/LHCC 2006-021 [http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/tdr/ptdr2\\_final.pdf](http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/tdr/ptdr2_final.pdf)
- [15] M. Carena, S. Heynemeyer, C.E.M.Wagner and G.Weiglein, Suggestions for improved benchmark scenarios for Higgs-boson searches at LEP2, CERN-TH/99-374, DESY 99-186, hep-ph/9912223.
- [16] ATLAS Collaboration, ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE, Technical Design Report, Volume II, 1999, ATLAS TDR 15, CERN/LHCC 99-15
- [17] J. Wells, "Implications of Supersymmetry Breaking with a Little Hierarchy between Gauginos and Scalars arXiv:hep-ph/0306127v3

- [18] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, "Supersymmetric Unification Without Low Energy Supersymmetry And Signatures for Fine-Tuning at the LHC arXiv:hep-th/0405159v2
- [19] G. Giudice, A. Romanino, "Split Supersymmetry arXiv:hep-ph/0406088v2
- [20] TOTEM, "Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the Large Hadron Collider at CERN", 2004, TOTEM-TDR-001, CERN-LHCC-2004-002
- [21] "Prospects for Diffractive and Forward Physics at the LHC", CERN/LHCC 2006-039/G-124, CMS Note-2007/002, TOTEM Note 06-5, 2006, <http://cmsdoc.cern.ch/cms/PRS/sm/diffractive-lhcc2.pdf>
- [22] Pablo Yepes and Bolek Wyslouch, "Heavy Ion Physics with CMS", <http://yepes.rice.edu/cms/doc/HeavyIonExecutiveSummary.pdf>
- [23] The Compact Muon Solenoid, Letter of Intent, CERN/LHCC 92-3
- [24] "The LHC Main Ring", LHC Design Report Volume I, <http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>
- [25] "The LHC Infrastructure and General Services", LHC Design Report Volume II, <http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>
- [26] "The LHC Injector Chain", LHC Design Report Volume III, <http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>
- [27] "ATLAS Detector and physics performance", Technical Design Report, Volume I, 1999, ATLAS TDR 14, CERN/LHCC 99-14
- [28] "ATLAS Detector and physics performance", Technical Design Report, Volume II, 1999, ATLAS TDR 15, CERN/LHCC 99-15
- [29] "ALICE TRD Technical Design Report", 2001, ALICE TDR 9, CERN/LHCC 2001-021
- [30] LHCb, Technical Proposal, CERN-LHCC-98-004
- [31] W.-M. Yao et al, "Review of Particle Physics", J. Phys. G 33, 1 (2006)
- [32] CMS Collaboration, CMS Detector Performance and Software, Physics Technical Design Report, Volume I, 2006, CMS TDR 8.1, CERN/LHCC 2006-001 [http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/tdr/ptdr1\\_final\\_colour.pdf](http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/tdr/ptdr1_final_colour.pdf)
- [33] The Compact Muon Solenoid, Technical Proposal, CERN/LHCC 94-38, 1994, <http://cmsdoc.cern.ch/TPref/TP.html>

- [34] The Tracker Project, Technical Design Report, CERN/LHCC 98-36 <http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/TRACKER/tracker.html>
- [35] Addendum to the CMS Tracker TDR by the CMS Collaboration, CERN/LHCC 2000-016 [http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/TRACKER/tracker\\_addendum.pdf](http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/TRACKER/tracker_addendum.pdf)
- [36] CMS ECAL Technical Design Report CERN/LHCC 97-33 CMS TDR 4 (1997) <http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/ECAL/ecal.html>
- [37] The HCAL Technical Design Report (CERN/LHCC 97-31, CMS TDR 2, 20 June 1997) <http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/HCAL/hcal.html>
- [38] The Muon Project, Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32, CMS TDR3, 1997, <http://cmsdoc.cern.ch/cms/TDR/MUON/muon.html>
- [39] B. Pavlov, "CMS muon system overview", AIP Conference Proceedings Volume 899, 2007
- [40] E. Gatti et al., NIM 163 (1979) 83:
- [41] Charpak et al. NIM 167 (1979) 455
- [42] R. Santonico and R. Cardarelli, "Development of Resistive Plate Counters", NIM 187 (1981) 377-380
- [43] M. Abbrescia et al. "Effect of the linseed oilnext term surface treatment on the performance of resistive plate chambers", NIM A 394 (1997) 13
- [44] CMS, "The Trigger and Data Acquisition project, Volume I", "The Level-1 Trigger", Technical Design Report, CERN/LHCC 2000-038, 15 December 2000
- [45] N. Amapane, "The CMS Muon Trigger System", CMS CR 2003/047, [http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/CR2003\\_047](http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/CR2003_047)
- [46] M. Andlinger et al., "Pattern Comparator Trigger (PACT) for the muon system of the CMS experiment", NIM A 370 (1996) 389-395
- [47] P. Fonte et al. "Very high position resolution gamma imaging with resistive plate chambers NIM A, Volume 567, Issue 1, 1 November 2006, Pages 96-99
- [48] M. Abbrescia et al. , "Resistive Plate Chambers with Gd-coated electrodes as thermal neutron detectors", NIM A, Volume 533, Issues 1-2, 1 November 2004, Pages 149-153
- [49] А. Минкова и др. "Практикум по атомна и ядрена физика", Университетско издателство, 2006
- [50] F. Sauli, "Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers", 1977, CERN 77-09

- [51] S. Biagi, IMONTE, програма за изчисляване на транспортните параметри на газа
- [52] W. Riegler and C. Lippmann, “The physics of Resistive Plate Chambers”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 518 (2004) 86-90
- [53] W. Riegler et al. “Detector physics and simulation of resistive plate chambers”, NIM A , Volume 500, Issues 1-3, 11 March 2003, Pages 144-162
- [54] H. Genz, “Single electron detection in proportional gas counters”, Nucl. Instr. and Meth. 112 (1973) 83
- [55] M. Abbrescia et al., “The simulation of resistive plate chambers in avalanche mode: charge spectra and efficiency”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 431 (1999) 413-427
- [56] Igor Smirnov, HEED, program to compute energy loss of fast particles in gases, Version 1.01, CERN.
- [57] F. Rieke, W. Prepejchal, “Ionization Cross Sections of Gaseous Atoms and Molecules for High-Energy Electrons and Positrons”, Phys. Rev. A 6 (1972) 1507-1519
- [58] M. Abbrescia et al. “Properties of  $C_2H_2F - 4$ -based gas mixture for avalanche mode operation of resistive plate chambers”, NIM A 398 (1997) 173-179,
- [59] W. Blum, G. Rolandi, “Particle Detection with Drift Chambers”, Springer, Berlin, 1993
- [60] S. Ramo, “Current induced in electron motion”, PROC. IRE 27 (1939), 584
- [61] E. Gatti et al., “Signal evaluation in multielectrode radiation detectors by means of a time dependent weighting vector”, NIM 193 (1982), 651-627
- [62] W. Riegler, “Induced signals in resistive plate chambers”, NIM A 491 (2002) 258271
- [63] B. Schnizer et al. “Simple models for RPC weighting fields and potentials”, NIM A 535 (2004) 554557
- [64] S. Biagi, MAGBOLTZ, програма за изчисляване на транспортните параметри на газа, Version 2.2, CERN.
- [65] Eduardo Gorini, “Measurements of drift velocity and amplification coefficient in  $C_2H_2F_4$ -isobutane mixtures for avalanche operated RPC”, Fourth International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, Napoli, October 1997.

- [66] M. Abbrescia et al. "Progresses in the simulation of Resistive Plate Chambers in avalanche mode", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 78 (1999) 459-464, CMS NOTE 1998-021
- [67] R. Arnaldi et al. "Study of resistive plate chambers for the ALICE dimuon spectrometer". Nucl. Phys. B - Proc. Suppl., 78:8489, 1999.
- [68] C. Bacci et al. "High altitude test of RPCs for the ARGO YBJ experiment". Nucl. Instr. Meth., A 443:342350, 2000.
- [69] C. Bacci et al. "A hodoscope made of resistive plate chambers to identify muons in a fixed targed beauty hadroproduction experiment", Nucl. Instr. Meth., A 324:83-92, 1993.
- [70] A. Aloisio et al. "Long-term performance of the L3 RPC system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 456 (2000) 113-116
- [71] G. Carlino. "The RPC trigger system of L3: history and current status", Scientifica Acta, 13:269-280, 1998.
- [72] A. Zallo, "The BABAR RPC system", Nucl. Instr. Meth., A 456:117-121, 2000.
- [73] K. Abe et al. "Glass RPC module for the BELLE endcap K1/ detector" Scientifica Acta, 13:281-293, 1998.
- [74] J. Va'vra, "Summary of session 6: aging effects in RPC detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 515 (2003) 354-357
- [75] M. Alaviggi et al., "Results on long-term performances and laboratory tests of the L3 RPC system at LEP", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 515, (2003) 328-334
- [76] D. Malow, "Water vapor in the BELLE KLM", <http://wwwphy.princeton.edu/~marlow/rpc/gas/water.ps>
- [77] F. Anulli et al. "Mechanisms affecting performance of the BaBar resistive plate chambers and searches for remediation", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 508 (2003) 128-132
- [78] G. Aielli et al. "RPC operation at high temperature", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 508 (2003) 44-49
- [79] F. Anulli et al. "Performances of RPCs in the BaBar experiment", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 515 (2003) 322-327
- [80] ALICE muon spectrometer technical design report. CERN/LHCC 99-22, ALICE TDR 5, page 145, 1999.
- [81] Addendum to the ALICE muon spectrometer technical design report. CERN/LHCC 2000-046, Addendum 1 to ALICE TDR 5, pages 44-46, 2000.

- [82] C. Bacci et al. "Results from the analysis of data collected with a  $50m^2$  RPC carpet at YangBaJing". Nucl. Instr. Meth., A 456:121-125, 2000.
- [83] S. Dusini et al. "Design and prototype tests of the RPC system for the OPERA spectrometers", Nuclear Instruments and Methods A 508 (2003) 175-180
- [84] G. Bencivenni et al., "Performance of a test prototype for MONOLITH" Nucl. Instr. Meth., A 461:319-323, 2001.
- [85] Q. Gou, "Test for YBJ-ARGO RPC working in avalanche mode", NIM A Volume 560, Issue 2, 10 May 2006, Pages 617-620
- [86] P. Fonte, V. Peskov, and B.D. Ramsey. "Streamers in MSGC's and other gaseous detectors", ICFA instrumentation bulletin, Fall 1997, (SLAC-PUB-7718, SLAC-JOURNAL-ICFA-15), [www.slac.stanford.edu/pubs/icfa/fall97/paper1/paper1.pdf](http://www.slac.stanford.edu/pubs/icfa/fall97/paper1/paper1.pdf)
- [87] J. Ying et al " Study of an avalanche-mode resistive plate chamber", 2000 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 26 1291-1298
- [88] H. Raether, "Electron Avalanches and Breakdown in Gases", Butterworths Advanced Physics Series, Washington, 1964
- [89] P. Fonte et al., "VUV emission and breakdown in parallel-plate chambers", Nucl. Instr. and Meth. A310 (1991) 140-145
- [90] R. Cardarelli et al. "Avalanche and streamer mode operation of resistive plate chambers", Nuclear Instruments and Methods A 382, (1996), 470-474
- [91] R. Cardarelli, A. Di Caiccio, and R. Santonico. "Performance of a resistive plate chamber operating with pure CF<sub>3</sub>Br", Nucl. Instr. Meth., A 333:399B403, 1993.
- [92] P. Camarri et al., "Streamer Suppression with SF<sub>6</sub> in RPCs Operated in Avalanche Mode", NIM A414 pp. 317-324, 1998
- [93] ATLAS muon spectrometer technical design report. CERN LHCC-97-22, ATLAS TDR 10, CERN, 1997.
- [94] ALICE TOF - Time-of-flight technical design report. CERN/LHCC 2000-012, ALICE TDR 8, 2000.
- [95] M. Bogomilov et al. "The RPC time-of-flight system of the HARP experiment", presented at the 'RPC 2001' 6th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, 26-27 November 2001, Coimbra, Portugal.
- [96] M. Bogomilov et al. "The HARP RPC time-of-flight system", Nuclear Instruments and Methods A 508 (2003) 152-158
- [97] A. Akindinov et al. "The multigap resistive plate chamber as a time-of-flight detector", Nucl. Instr. Meth., A 456:16-22, 2000.

- [98] Cerron Zeballos, "A new type of resistive plate chamber: The multigap RPC", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 374 (1996) 132-135; CERN PPE/95-166; CERN/LAA-MC 95-23
- [99] P. Fonte et al., "A new high-resolution TOF technology", NIM A 443 (2000) 201-204, CERN-EP/99-68
- [100] Addendum to the ALICE TOF - Time-of-flight technical design report. CERN/LHCC 2002-016, 2002.
- [101] The HARP collaboration. Proposal for an RPC TOF system. 2000. Available: <http://harp.web.cern.ch/harp>
- [102] P. Fonte et al. "High resolution RPCs for large TOF systems", Nucl. Instr. and Meth., A 449:295-301, 2000.
- [103] M.C.S. Williams et al. "The multigap RPC : The time-of-flight detector for the ALICE experiment", Nucl. Instr. Meth., A 478:183-186, 2002.
- [104] Cardarelli et al. "Progress in resistive plate counters", Nuclear Instruments and Methods A 263 (1988) 20-25
- [105] M. Abbrescia et al. "Cosmic ray tests of double-gap resistive plate chambers for the CMS experiment" NIM A 550 (2005) 116-126
- [106] A. Zichichi, "The LAA Project", CERN-EP/87-122, 1987
- [107] E. Cerron Zeballos et al. "Comparison of the wide gap and narrow gap resistive plate chamber", Nucl.Instrum.Meth. A 373 (1996) 35-42 ; CERN-PPE-95-146; CERN-LAA-MC-95-21
- [108] I. Duerdorff et al., "The transition from proportional to streamer mode in a resistive plate chamber", Nucl. Instr. and Meth. A 348 (1994) 303
- [109] V.Ammosov et al., "Study of  $SF_6$  addition influence on narrow gap RPC performnace", IHEP 99-53
- [110] I. Crotty et al., "The non-spark mode and high rate operation of resistive parallel plate chambers", Nucl. Instr. and Meth. A 337 (1994)370
- [111] E. Ceron Zeballos et al. "Resistive plate chambers with secondary electron emitters and microstrip readout", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 392 (1997) 15O-154
- [112] I. Crotty et al. "High-rate, high-positionnext term resolution microgap RPCs for X-ray imaging applications", Nuclear Instruments and Methods A 505 (2003) 203-206
- [113] A. Blanco et al. "Perspectives for positron emission tomography with RPC", Nuclear Instruments and Methods A 508, (2003), 88-93

- [114] A. Blanco et al. "Very high position resolution gamma imaging with resistive plate chambers", Nuclear Instruments and Methods A 567 (2006) 96-99
- [115] G. Iaselli et al., "Study of Detailed Geometry of Barrel RPC Strips", CMS IN 2000/044, 2000, [http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2000\\_044](http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2000_044)
- [116] G. Wrochna et al. "Acceptance of the Baseline and Modified RPC System Geometry", CMS IN-2001/026 [http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2001\\_026](http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2001_026)
- [117] G. Bruno et al. "RPC System Geometry Simulated in CMSIM 118-120 and ORCA 4.2" CMS Internal Note, CMS IN 2000/054, [http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2000\\_054](http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2000_054)
- [118] M. Abbrescia et al. " Beam test results on double-gap resistive plate chamber proposed for CMS experiment NIM A 414 (1998) 135-148"
- [119] M. Abbrescia et al., "New developments on front-end electronics for the CMS Resistive Plate Chambers" , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 456 (2000) 143-149
- [120] M. Abbrescia, "Production and test of one-third of barrel Resistive Plate Chambers of the CMS experiment at LHC", NIM A 535 (2004) 283-286
- [121] M.L. Simpson et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-42 (4) (1995) 762
- [122] M. Abbrescia et al., "Production and quality control of the Barrel RPC chambers of the CMS experiment", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 150 (2006) 290-294
- [123] K. Abadjiev et al., "Resistive Plate Chambers Assembly Procedure", CMS Internal Note 2003-032 [http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2003\\_032](http://cmsdoc.cern.ch/doc/notes/docs/IN2003_032)
- [124] T. Anguelov et al., "CMS barrel resistive plate chambers - assembly and preliminary tests", Meeting in Physics at University of Sofia, vol.3 ed A. Proykova, Heron Press, Sofia, 2003
- [125] [http://webcms.ba.infn.it/~rpc-user/Cartelle\\_Tematiche/Meccanica/Schemi/](http://webcms.ba.infn.it/~rpc-user/Cartelle_Tematiche/Meccanica/Schemi/)
- [126] <http://www.mysql.com/products/enterprise/server.html>
- [127] M. Huhtinen et al., "Calculation of neutron background generated by various beam pipe geometries at LHC", NIM A 351, (1994) 236-239
- [128] M. Huhtinen and P. Aarnio "Neutron and photon fluxes and shielding alternatives for the CMS detector at LHC", NIM A 363 (1995) 545-556
- [129] J. Va'vra, "Summary of session 6: aging effects in RPC detectors", NIM A 515 (2003) 354-357

- [130] J. Va'vra, "Physics and chemistry of aging—early developments", NIM A 515 (2003)
- [131] J. Va'vra, [http://www.slac.stanford.edu/Bjjv/activity/babar\\_rpc\\_my\\_summary.pdf](http://www.slac.stanford.edu/Bjjv/activity/babar_rpc_my_summary.pdf)
- [132] M. Alviggi, et al., "Results on long-term performances and laboratory tests of the L3 RPC system at LEP". NIM A 515 (2003) 354357
- [133] M. Adolfi et al., "Proposal for the RPC muon detector", LHCb Note 2000-053, May 2000
- [134] M. Abbrescia et al. "Study of long-term performance of CMS RPC under irradiation at the CERN GIF", NIM A 533 (2004) 102-106
- [135] S. Agosteo, et al. NIM A 452 (2000) 94
- [136] A. Manarin, G. Vismara, The Delay Wire Chamber (DWC) description, CERN Report LEP/BI-TA/Note 83-3, 1985.
- [137] <http://sl.web.cern.ch/SL/eagroup/beams.html>
- [138] <http://sl.web.cern.ch/SL/eagroup/irrad.html>
- [139] M. Abbrescia, et al., "Resistive plate chambers performances at low pressure", NIM A 394 (1997) 341
- [140] T. Angelov et al. "Test set-up for the CMS Resistive Palte Chambers", Meetings in Physics at University of Sofia, vol.3 ed., A. Proykova, Heron Press, Sofia, 2002
- [141] T. Anguelov, ... B. Pavlov et al. "DAQ for CMS RPCchambers test", Nuclear electronics & computing, NEC2001, Proceedings of XVIII International Symposium
- [142] B. Pavlov, "CMS barrel resistive plate chambers - test and results", XXIII Physics in Collision, ed.:S. Riemann, W. Lohmann, 2003
- [143] M. Abbrescia "The cosmics rays quality test procedure for the CMS barrel resistive plate chambers" NIM A 533, 208-213 , 2004
- [144] <http://www.php.net/>
- [145] J. F. Ziegler, "Terrestrial cosmic ray intensities", IBM Journal of Research and Development, Volume 42, Number 1, 1998, <http://www.research.ibm.com/journal/rd/421/ziegler.html>
- [146] M.P. De Pascale et al., J. Geophys. Res. 98, 3501 (1993).
- [147] P.K.F. Grieder, Cosmic Rays at Earth, Elsevier Science (2001).
- [148] R.R. Daniel and S.A. Stephens, Revs. Geophysics & Space Sci. 12, 233 (1974).

- [149] K.P. Beuermann and G. Wibberenz, Can. J. Phys. 46, S1034 (1968).
- [150] M.J. Berger and S.M. Seltzer, "Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons", National Aeronautics and Space Administration Report NASA-SP-3012 (Washington DC 1964)
- [151] I.S. Diggory et al., J. Phys. A7, 741 (1974).
- [152] IEEE-758 1979 IEEE Standard Subroutines for CAMAC (Computer Automated Measurements and Control)
- [153] <http://www.xilinx.com/>
- [154] <http://www.microchip.com/>
- [155] B. Kernighan, D. Ritchie, "The C Programming Language", 1972
- [156] M. Ellis, B. Stroustrup, "The Annotated C++ Reference Manual by - Addison-Wesley Pub Co, 1990
- [157] Michael R. Sweet. Serial Programming Guide for POSIX Operating Systems, <http://www.easysw.com/~mike/serial/>
- [158] A. D. Marshall, Programming in C (UNIX System Calls and Subroutines using C) (Lectur Notes), <http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/C/CE.html>
- [159] Rene Brun, Fons Rademakers, "ROOT Reference Guide ", <http://root.cern.ch/root/Reference.html>
- [160] А. Георгиев, И. Чурин, "Контроллер кейта КАМАК KK009 для персонального компьютера Правец и IBM PC/XT", ОИЯИ, 10-88-281, Дубна, 1988.
- [161] <http://www.caen.it>
- [162] <http://www.bronkhorst.nl>
- [163] <http://www.bronkhorst.nl/files/downloads/brochures/folder-el-flow.pdf>
- [164] [http://www.bronkhorst.com/files/downloads/brochures/e-5700\\_leaflet.pdf](http://www.bronkhorst.com/files/downloads/brochures/e-5700_leaflet.pdf)
- [165] <http://www.picotech.com>, <http://www.picotech.com/humidity.html>
- [166] <http://www.eutron.com>
- [167] ANSI/TIA/EIA-644-A-2001 Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits
- [168] ANSI/IEEEANSI/IEEE Std 1014-1987 IEEE Standard for A Versatile Backplane Bus: VMEbus

- [169] R. Bock, A. Vasilescu, “The Particle Detector Briefbook”, Springer
- [170] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hertz>
- [171] <http://en.wikipedia.org/wiki/Becquerel>
- [172] G. Charpak et al, “The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles”, Nucl. Instrum. Methods 62, 262 (1968)
- [173] A. Dimitrov et al., “Cosmic Muon Trajectory Reconstruction for Compact Muon Solenoid Resistive Plate Chamber studies”, Meeting in Physics at University of Sofia, vol. 6, 2005