



Физически факултет
Катедра „Атомна физика“

Изследване на прототипи на
калориметъра FoCal-H на
експеримента ALICE

Радослав Симеонов

Автореферат на дисертационен труд за придобиване на
образователно-квалификационна степен „доктор“

„Физика на елементарните частици и високите енергии“

Научен ръководител:
/доц. д-р Венелин Кожухаров/

София, януари 2025

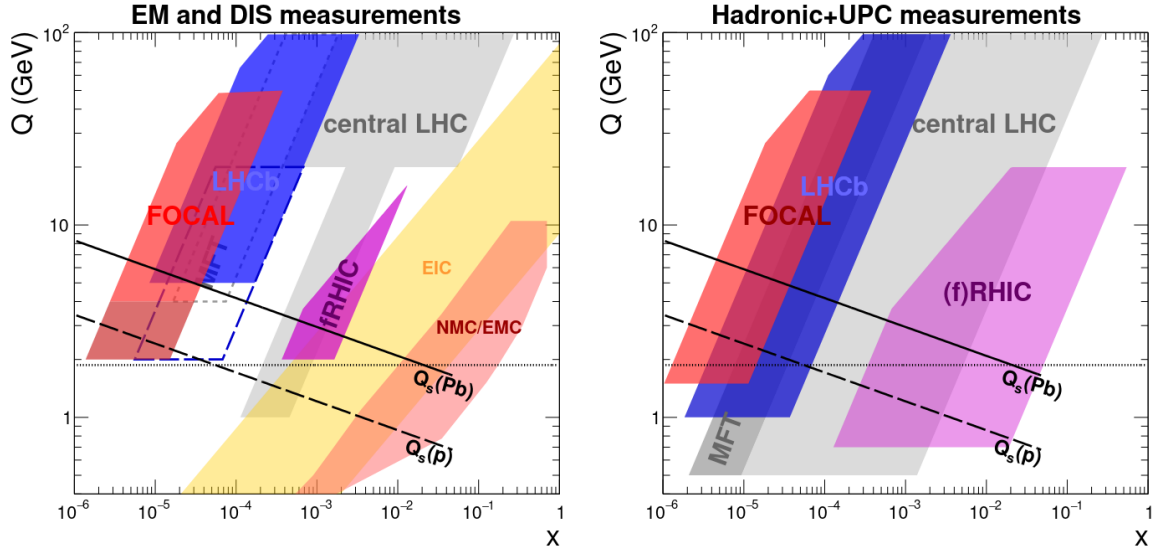
Съдържание

1	Увод	3
2	Експериментът ALICE	6
3	Детекторът FoCal	8
3.1	Дизайн на FoCal	8
3.2	Тестове със сноп от заредени частици	10
3.3	Прототип 1 на адронния калориметър FoCal-H	11
3.3.1	Установка за набор на данни	12
3.3.2	Реконструкция на данни	13
3.3.3	Монте Карло Симулации	16
3.3.4	Окончателни резултати	16
4	Прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H	19
4.1	Прилежаща електроника	19
4.2	Софтуер за симулации	20
4.3	Валидиращ набор на данни на прототип на калориметъра FoCal	24
4.3.1	Детекторна установка	24
4.3.2	Определяне на позицията на пиедестала	24
4.3.3	Софтуер за апроксимиране	27
4.3.4	Редуциране на ефект на насищане	27
4.4	Калибровка	31
4.5	Разделителна способност	34
	Научни приноси	38
	Научни приноси	38

Глава 1

Увод

Едно от най-интересните за изследване състояния на материята е това, при което кварките и глюоните са свободни частици. Квантова Хромодинамика (Quantum Chromodynamics) (QCD) предвижда, че такова състояние е възможно да се получи при много високи температури, за които да се случи фазовото преминаване на адрони към адронен флуид. Това състояние се нарича Кварк-глюонна плазма (Quark Gluon Plasma) (QGP) и се счита, че е част от ранната еволюция на Вселената, около 10^{-6} s след Големия взрив. Експерименталната проверка на състояние, съдържащо свободни кварки, е сложна задача. Директното наблюдение на свободни кварки е невъзможно, но те могат да бъдат изучени посредством създаването на микроскопична кварк-глюонна плазма. В днешни дни достигането на екстремно горещи и плътни състояния на материята, с които да бъде преминат прагът за създаване на QGP от 1 GeVfm^{-3} , е възможно чрез експерименти с колайдери. Тези условия биват достигнати чрез ядрени сблъсъци както на Large Hadron Collider (LHC), така и на Релативистки колайдер на тежки йони (Relativistic Heavy-Ion Collider) (RHIC). В тези ускорителни комплекси тежки златни или оловни ядра биват ускорени и сблъскани при ултравелативистки енергии. Предизвикателството за изучаване на състоянието на QGP е наистина голямо! Макар все още да няма експериментална установка, с която да се наблюдава директното състояние на тази материя, съществуват редица косвени методи да се изучават параметрите на QGP. Те се делят най-общо на два типа - меки проби и твърди проби. Меките проби, или нискоенергетични, идват от последния етап на сблъсъка, където Q^2 е относително малко. Родените от взаимодействието различни типове частици дават информация за колективните характеристики на кварк-глюонната плазма. Твърдите проби, или високоенергетични, произлизат от ранния етап на формиране на кварк-глюонната плазма. Сред примерите за високоенергетични указания за съществуване на кварк-глюонна плазма са затихването на адронни струи и усиляването на странността. Електромагнитно указание са директните фотони, идващи от сблъсъци на тежки йони. Те се делят на три типа - бързо излъчени фотони, фрагментационни фотони и термални фотони и носят различна информация при развитието на кварк-глюонна плазма. Друго интересно състояние на материята е формирането на кондензата от цветно стъкло. Счита се, че се проявява при много малки стойности на Бьоркен-х, при които плътността на глюоните става толкова висока, че се получава глюонно насищане. Такова състояние все още не е наблюдавано експериментално и зоните на глюонно насищане не са достигнати. За целта е необходим експеримент, който да предостави измервания при голяма бързина. Измерването на произведените адрони не осигуряват директен до до кинематиката на партоните в разсейването, но могат да се използват за проверка на Партон дистрибутивни функции (Parton Distribution Functions) (PDF). Това става чрез сравнение на измерените сечения с предсказаните такива, получени с различни набори от PDF. Частта от импулса x на входния партон зависи от напречния импулс p_T и бързината y на излъчените партони в сблъсъци с енергия на центъра на масите



Фигура 1.1: Приблизителното покритие на (x, Q) за различни експерименти, изследващи области чрез измервания на дълбоко нееластично разсейване, както и възможни бъдещи измервания чрез директни фотони (ляво), и измервания на адрони плюс ултра перфирени сблъсъци (дясно) в RHIC и LHC. Показани са също така и оценените скали на насищане за протон и Pb [1].

\sqrt{s} , може да бъде приближена с:

$$x \approx \frac{2p_T}{\sqrt{s}} \exp(\pm y). \quad (1.1)$$

Следователно измерванията при висока бързина и ниски стойности на p_T са най-чувствителни към най-малките стойности на x за дадена енергия на снопа. Използването на детектор при възможно най-ниски стойности на p_T при висока бързина позволява изследване на високи плътности на глюоните. Програмата на експеримента Голям експеримент на сблъскващи се йони (A Large Ion Collider Experiment) (ALICE) включва добавянето на нов детектор, който ще позволи измервания без аналог до момента. Това е планираният Калориметър за малки ъгли (Forward Calorimeter) (FoCal), чиято задача ще бъде измервания за Бьоркен-х до $\sim 10^{-6}$. Това би позволило изследванията в зоната на глюонно насищане. Очакваното параметричното пространство на (x, Q) , което се очаква да бъде покрито от FoCal, както и от други съвременни детектори, е показано на Фиг. 1.1 [1].

Настоящата дисертация се базира на изследвания свързани с разработването и тестването на прототипи на адронния сегмент на калориметъра - FoCal-H. Тя се състои от 7 глави. В **Глава 1** е даден кратък въвеждащ обзор в теорията на квантовата хромодинамика. Също така е засегнато състоянието на материята наречено кварк-глюонна плазма, като са показани някои от най-актуалните доказателства за съществуването ѝ. В **Глава 2** е описан ускорителният комплекс на CERN. В тази глава са описани в детайли и залите, в които се тестват и верифицират нови детекторни технологии. **Глава 3** е посветена на детекторния комплекс на експеримента ALICE. В **Глава 4** е описана важността на калориметрията, нейните основни принципи и физични закони, както и са дадени примери за калориметричните системи на големите експерименти. Допълнително са показани и изследвания на докторанта във връзка с влиянието на снопа от заредени частици върху разделителната способност на даден калориметър, чрез виртуалния експеримент MASA. **Глава 5** запознава читателя с проекта FoCal. Показани са резултати от разработването на първия прототип

на адронния калориметър FoCal-H и тестването му с йонизиращо лъчение. Изложени са основните проблеми, срещнати при тестовете. В **Глава 6** е представен вторият прототип на адронния калориметър FoCal-H. Описана е подробно методиката на анализ на данни, както и разработените за целта софтуери. Получените резултати валидираха технологията на FoCal-H и дадоха официален старт на неговото конструиране. Последната **Глава 7** е заключителна.

Глава 2

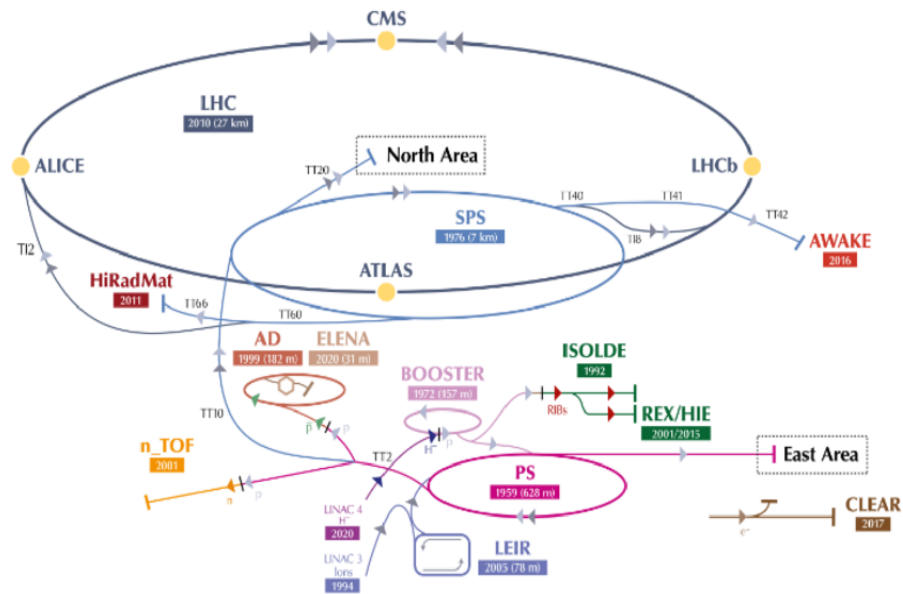
Експериментът ALICE

Големият адронен колайдер (LHC) е най-големият ускорител на частици в света към 2024 г. Построен е в периода 1998-2008 с цел да сблъсква протони и/или тежки йони при енергии в точката на взаимодействие до 14 TeV. LHC се намира близо до Женева в комплекса на Европейската организация за ядрени изследвания (Европейска организация за ядрени изследвания (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) (CERN)). Той е разположен в подземен кръгов тунел с дълбочина 175 m и обиколка приблизително 26.7 km, разположен между Франция и Швейцария. Първоначално тунелът е използван за Големия електрон-позитронен колайдер (LEP), функционирал между 1989 и 2000 г. Основната цел на LHC е достигането на енергии от порядъка на TeV, необходими за изследване на фундаментални въпроси във физиката на елементарните частици. Той дава възможност за търсене на отговори на нерешени проблеми свързани както със Стандартния модел, така и с теории извън него. Данните от експериментите в LHC играят решаваща роля за проверката на текущите теоретични разработки, валидирането на техните прогнози и подпомагането на бъдещото развитие на науката.

LHC има осем точки на взаимодействие, където частиците могат да бъдат инжектирани, ускорени, извлечени или сблъскани. На 4 от тези точки са поставени големите експерименти на CERN - ALICE [2], ATLAS [3], CMS [4] и LHCb [5].

Подробна схема на ускорителния комплекс на CERN е дадена на Фиг. 2.1

Експериментът ALICE [2]) е предложен през 1993 г. с основна цел изследване на сблъсъци на ядра при ултрарелативистични енергии, осигурени от Големия адронен колайдер (LHC) в Европейския център за ядрени изследвания (CERN). ALICE е проектиран, за да разшири съвременното познание на природата около нас, чрез изучаване в детайли физиката на силно взаимодействаща материя. Това се случва посредством достигане на възможно най-високите енергийни плътности в лабораторна среда. При такива условия се образува екстремната фаза на материята QGP. Пресъздаването на това първично състояние на материята в лабораторни условия, разбирането на нейното развитие във времето и основните и кинематични свойства би дало отговори на въпросите за това как е организирана материята и механизмите, които ограничават кварките и глюоните. За тази цел се извършва цялостно изследване на адроните, електроните, мюоните и фотоните, произведени при сблъсъци на тежки ядра (^{208}Pb). ALICE изучава Протон-протонен сблъсък (p-p) и протон-ядрени (p-Pb) сблъсъци както като сравнение със сблъсъците ядро-ядро (Pb-Pb), така и сами по себе си. Експериментът стартира набора си на данни, заедно със старта на LHC през 2010г, а през 2021 г. ALICE завършва значителна модернизация на своите детектори, за да подобри допълнително възможностите си. С увеличаването на честотата на събития, благодарение на High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC), се дава възможност за изследване на физични задачи, за които липсата на статистика е била решаваща при предходни набори на данни. Целта пред настоящия трети етап на експеримента е да се изследват всички събития



Фигура 2.1: Ускорителен комплекс на CERN към 2022г [6].

от над 10 nb^{-1} Pb-Pb сблъсъци достигайки 10^{11} взаимодействия при светимост $L = 6 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ с честота на взаимодействия 50 kHz. В допълнение трябва да бъдат записани с честота 500 kHz 6 pb^{-1} протон-протонни сблъсъци при същата като при Pb-Pb сблъсъци енергия, а също и 50 nb^{-1} p-Pb сблъсъци [7].

Детекторният комплекс на ALICE се намира във френската част на CERN, в точка на взаимодействие 2 от LHC. Той се помещава в зала на $\sim 100 \text{ m}$ под земята. Неговите размери са 26 m дължина и 16 m височина и общо тегло от 10 тона. Дизайнът му предоставя отлични възможности за идентификация на частици в интервала $0.15 \text{ GeV}/c < p_T < 20 \text{ GeV}/c$. В основата си тази система може да бъде разделена на три основни типа - централна цилиндрична част, предна част и Мюонен спектрометър.

Предвиждат се допълнителни подобрения в детекторния комплекс при следващото спиране на големия адронен колайдер, с цел разширяване на полето на научни предизвикателства. В същото време се правят планове за надграждане за ALICE 3, експериментът от следващо поколение за LHC Runs 5 и 6.

Глава 3

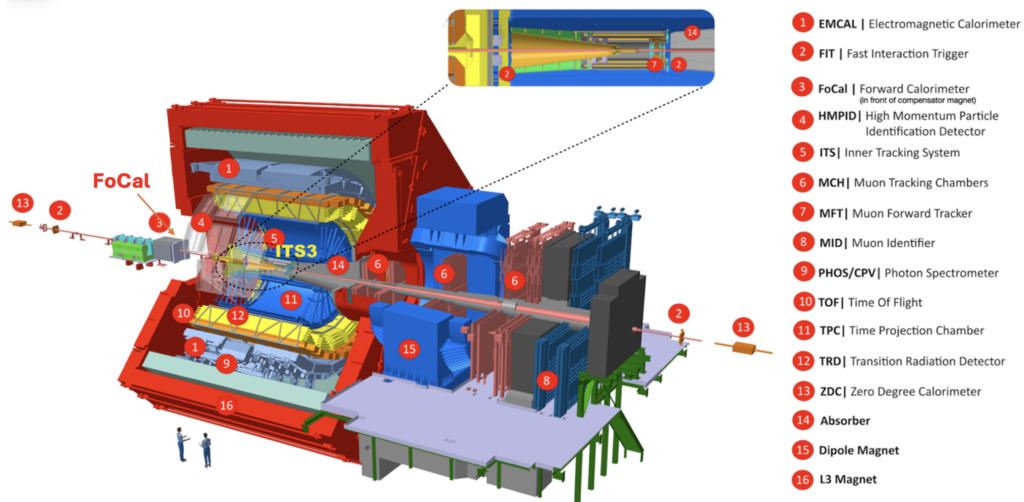
Детекторът FoCal

След старта си през 2009 г. детекторният комплекс на ALICE е подобрен за първи път през Първото дълго спиране (The First Long Shutdown) (LS1). Модернизацията на ALICE по време на предходното спиране Второто дълго спиране (The Second Long Shutdown) (LS2) подобри значително неговите възможности, особено по отношение на прецизността при реконструкцията на трекове и работата при висока честота на взаимодействие. За да се използва пълният потенциал от подобриеното на големия адронен колайдер в етапа HL-LHC, големите експерименти на CERN ще извършат сериозно подобрене на част от детекторните си системи през периода на Третото дълго спиране (The Third Long Shutdown) (LS3), планиран за 2026-2029г. Той ще включва инсталирането на два нови детектора - нов вътрешен слой за Вътрешната трекинг система - Inner Tracking System (ITS)3 [8] и калориметър за малки ъгли (FoCal), оптимизиран за регистриране на фотони, излетели на малки ъгли спрямо оста на снопа. Ще бъдат извършени и подобрения на някои от наличните вече детекторни системи. Схема на детекторния комплекс на ALICE с включените планирани ъпгрейди е показана на фиг. 3.1.

Детекторът FoCal е калориметър с висока степен на сегментираност, който е изграден от две основни части - електромагнитна и адронна [1]. Очаква се детекторът да бъде част от предстоящия набор на данни на ALICE от етап RUN 4 в периода 2029 - 2032 [9]. FoCal ще записва данни от pp, p-Pb и Pb-Pb сблъсъци както за адронни взаимодействия, така и за ултра-периферни сблъсъци. Програмата на калориметъра има за цел да разшири обхвата на зоната за изучаване на гореща и плътна партонна материя като добавя възможност за изследване на партолната структура на нуклоните и ядрото при малки x . В частност FoCal предоставя възможност за изучаване на PDF във все още неизследвания регион на Бьоркен- x до $x \sim 10^{-6}$ и при ниски стойности на придаден импулс за $Q \sim 4$ GeV/c. Основните предмети на изследване на FoCal са измервания с висока прецизност на директни фотони, идентификация на π^0 и други неутрални мезони, J/Ψ и неговите възбудени състояния, W и Z бозони, адронни струи и различни корелации между изброените. Също така ще спомогне за корелиране на измервания с другите детекторни системи от ALICE, разположени в централната цилиндрична част в зоната $|\eta| < 0.9$. Работният режим на FoCal се очаква да бъде при средна честота на събитията от 1 MHz за pp и p-Pb сблъсъци и 50 kHz за Pb-Pb [9].

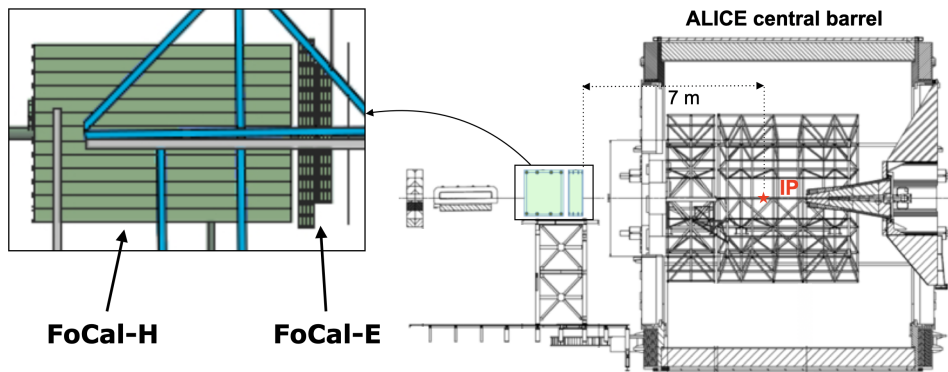
3.1 Дизайн на FoCal

FoCal се състои от две компоненти - Електромагнитен калориметър за малки ъгли (Electromagnetic Forward Calorimeter) (FoCal-E) и Адронен калориметър за малки ъгли (Hadronic Forward Calorimeter) (FoCal-H). Той ще бъде монтиран на разстояние 7 m от точката на взаимо-



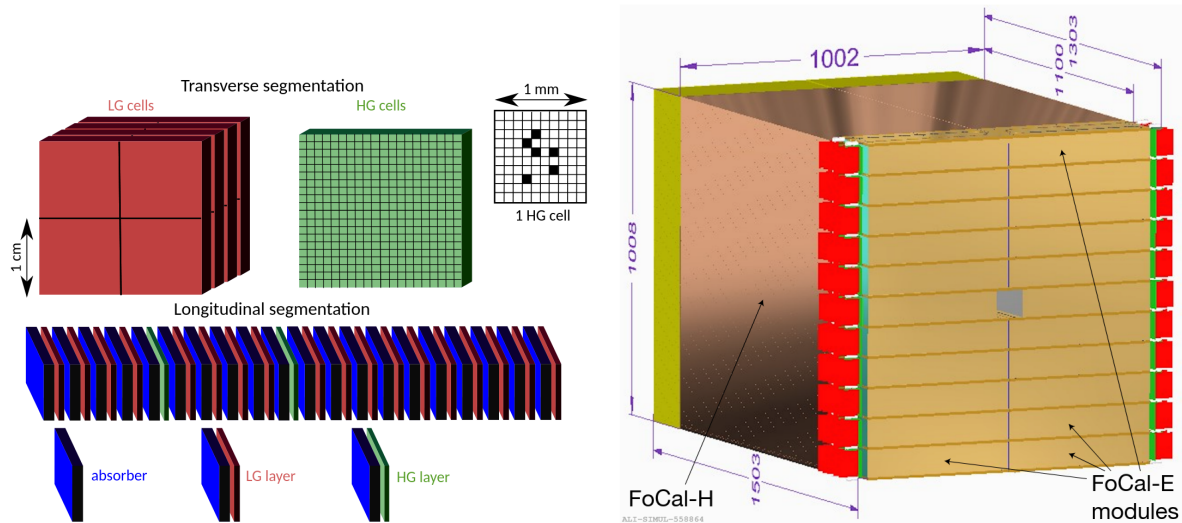
Фигура 3.1: Схема на детекторния комплекс на ALICE за предвидения Run 4. Добавени са 2 нови детектора - Вътрешна трекинг система ITS3 и преден калориметър FoCal. За този рън са предвидени и подобрения в наличните от Run 3 детектори.

действие на ALICE, което ще позволи изследвания в областта на псевдобързина $3.4 < \eta < 5.8$. Детекторът ще бъде поставен около тръбата на снопа, като за целта в средата му ще има правоъгълна кухня с напречно сечение $84 \times 84 \text{ mm}^2$. Схема на детектора заедно с планираната за инсталация позиция може да бъде видяно на Фиг. 3.2.



Фигура 3.2: FoCal ще бъде монтиран на разстояние 7 m от точката на взаимодействие (IP) на ALICE, което ще позволи изследвания в областта на псевдобързина $3.4 < \eta < 5.8$ [10].

FoCal-E е надлъжно сегментиран електромагнитен калориметър от тип сандвич и в дизайна си има интегрирани две независими подсистеми. Елементите на FoCal-E са волфрамови плочи, силициеви сегменти и пикселни сензори. Абсорберната среда е изградена от 20 волфрамови плочи, всяка с дебелина от приблизително една радиационна дължина ($1 X_0$). Тези плочи се редуват с 18 слоя от силициеви сегменти, като така се образуват приблизително $20 X_0$. Целта е да се осигури добра разделителна способност по енергии в широк диапазон за измерване на енергията на електромагнитни лавини. Активната зона на детектора предоставя напречна сегментираност, която спомага за точното определяне на позицията и разпространението на електромагнитната лавина. Споменатите 18 силициеви сегменти са изградени от активни клетки с напречна площ от 1 cm^2 . Те предоставят ниска сегментираност в сравнение с допълнително поставените 2 слоя пикселни детектори.



Фигура 3.3: Схема на електромагнитния калориметър FoCal-E, който се състои от 20 слоя W плочи и силициеве сензори и на детектора FoCal-H, поставен на минимално разстояние зад него [9].

Те представляват Силициев Монолитен активен пикселен сензор (Monolithic Active Pixel Sensor) (MAPS) с размер на клетка от $\approx 30 \times 30 \mu\text{m}^2$. На Фиг. 3.3 е представена схема на FoCal-E, на която ясно се виждат различните надлъжни и напречни сегментации.

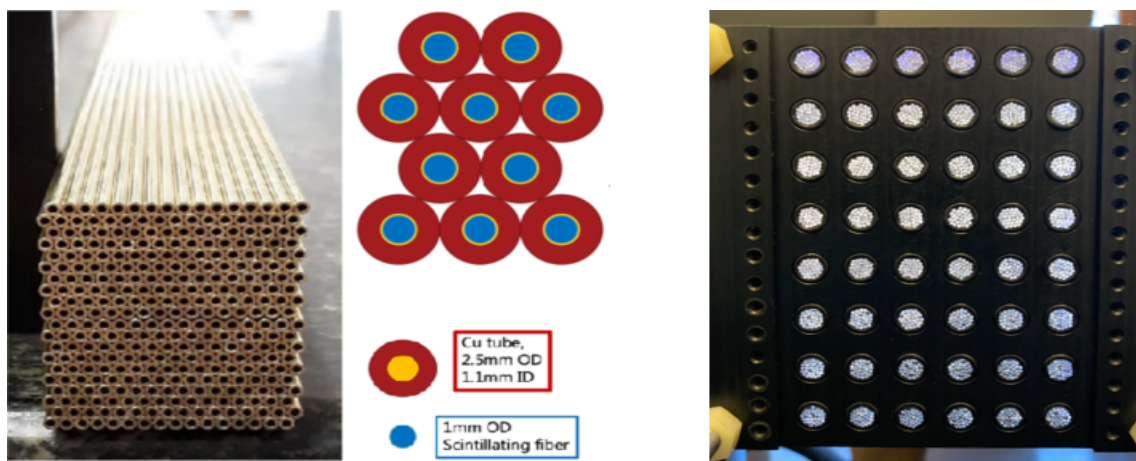
На възможно най-малко разстояние зад FoCal-E е поставен адронният калориметър FoCal-H. Това е с цел да се минимизира напречното разпространение на лавини, стартирани в обема на FoCal-E. Основната задача на адронния калориметър е да послужи за детектиране на адронни струи. FoCal-H е базиран на медни тръбички с поставено сцинтилационно влакно във всяка от тях. Сходен дизайн е използван също от колаборацията IDEA [11]. Ефективната ядрена дължина на взаимодействие на FoCal-H е 25 cm, което отговаря на $\sim 5\lambda_{int}$ за дължина от 110 cm. FoCal-H не е надлъжно сегментиран. Очакванията са тежлото на FoCal-H да бъде около 7000 kg[9]. Тези размери са предизвикателство за платформата, на която детекторът ще бъде поставен. Схема на FoCal-E и FoCal-H са представени на Фиг. 3.3.

3.2 Тестове със сноп от заредени частици

В периода 2021 - 2023 бяха проведени серия от тестове, чрез които задълбочено да се изучи откликът на прототипи на детектора FoCal, да се направи сравнение между получените данни и резултатите от симулации, както и да се получат указания за прецизирането на финалния дизайн на детектора. Бяха използвани снопове с електрони и адрони с енергии в интервала 1 - 350 GeV, за да се изследват различни лавинни топологии, които биха възникнали в електромагнитния и адронния калориметър. Тези снопове бяха осигурени от ускорителните линии в тестовите зали на PS и SPS. През тригодишния период детекторните компоненти търпяха развитие както по размер, така и по сложност, като в края на 2022 бе разработена финалната версия на тестовия прототип. В Таблица 3.1 може да се види списък с използваните тестови площадки, интервалите от енергии, предоставяни от ускорителната линия, както и целта на теста.

Test Beam List			
Период	Ускорителна линия	Енергия на снопа	Основна цел
24 Sep - 06 Oct 2021 8 Jun - 19 Jun 2022	H6 SPS T9 PS	20 - 120 GeV 1 - 15 GeV	Тест на първи прототип Тест на нова изчитаща електроника
15 Sep - 20 Sep 2022 21 Sep - 28 Sep 2022 2 Nov - 9 Nov 2022	H6 SPS T10 PS H2 SPS	20 - 120 GeV 1 - 10 GeV 60 - 350 GeV	Набор на данни с външен тригер Тестове на електроника Комбиниран набор на данни (HCal + ECal)
17 May - 23 May 2023	H2 SPS	60 - 350 GeV	Тест на основен прототип

Таблица 3.1: Таблица с тестови набори на данни на прототипи на адронния калориметър FoCal-H



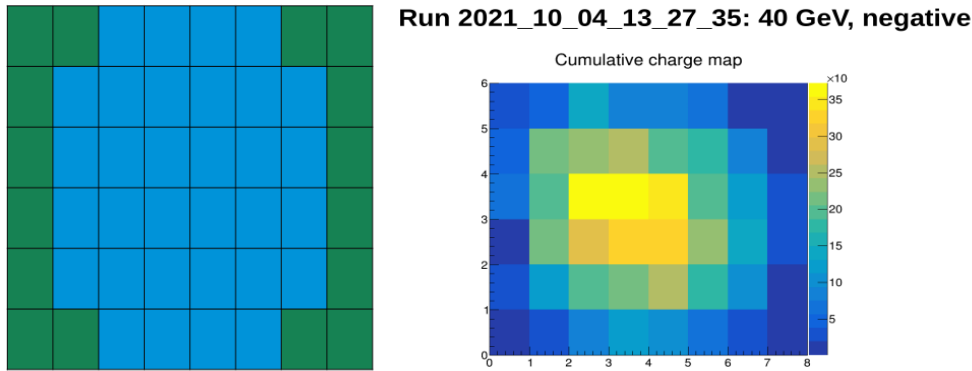
Фигура 3.4: Първият FoCal-H прототип направен от 1440 медни тръбички преди поставянето на сцинтилационните влакна (ляво), скица на размерите на тръбичките и влакната (център) и групирани влакна в края на детектора (дясно).

3.3 Прототип 1 на адронния калориметър FoCal-H

Първият прототип на адронния калориметър на FoCal представлява паралелепипед с напречни размери 9.5×9.5 cm, а дължината от 55 cm е половината от номиналната за FoCal-H. Абсорберната му среда е изградена от медни капиларни тръбички с вътрешен диаметър 1.2 mm и външен диаметър от 2.5 mm. В тях е поставено сцинтилационно влакно VCF10 [12] с диаметър 1 mm. В задната част на детектора влакната са групирани по 30 в сноп, като са подбрани по 5 във вертикално и по 6 в хоризонтално направление. Общият брой влакна е 1440, а общият брой снопове е 48. Влакната са захванати с изработена на 3D принтер пластмасова матрица. Медните тръбички и групиранието на влакната може да бъде видно на Фиг. 3.4.

Към края на сноповете са прикрепени силициеви фотоумножители Onsemi MICROFC-60035-SMT-TR1 с $35 \mu\text{m}$ клетка и $6 \times 6 \text{ mm}^2$ активна повърхност [13]. По този начин се формират каналите за изчитане на светлинни сигнали, идващи от развитите в детектора адронни лавини.

Големият брой влакна, отиващи към един Силициев фотоумножител (Silicon Photomultiplier) (SiPM) е проблем, тъй като води до отвеждането на голямо количество светлина до него.



Фигура 3.5: Разпределение на каналите по позиция. В различни цветове са отбелязани двете зони, които се управляват от платки CAEN A1702 (ляво). Карта на натрупан заряд от събития със сноп с енергия 40 GeV (дясно).

Това обаче бе оптималното решение предвид трудностите със закупуване на SiPM-и през 2020 и началото на 2021 г. За четяща електроника бяха използвани две CAEN A1702 платки [14]. Всяка от тях притежава Weeroc CITIROC ASIC чип. 12-битов Аналогово-цифров преобразувател (Analog-to-Digital Converter) (ADC), част от NXP LPC4370 ARM микроконтролер, дигитализира събрания заряд от всеки канал [15], [16]. Всяка от тези платки може да обработва сигнали от 32 канала. За провеждането на тестове бе избрано едната от тях да предоставя информация за 32 централни канала на детектора. Те бяха определени спрямо позицията на снопа. Останалите 16 канала, които покриваха зона с по-малко количество светлина, бяха обработвани от другата платка.

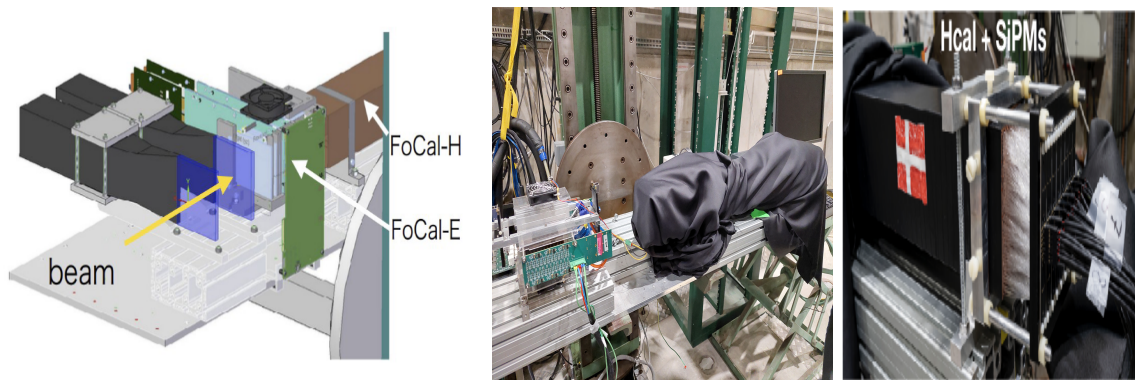
На Фиг. 3.5 е показана избраната карта на каналите.

Причина за това разделение бе поради невъзможността от гледна точка на технически спецификации на платките, те да бъдат синхронизирани. По този начин опериращата в централната зона платка - условно наричана Централна платка от Прототип 1 (Board 1) (B1), бе основната за набор на данни, докато външната (Външна платка от Прототип 2 (Board 2) (B2)) бе използвана основно за изучаване на поведението ѝ по време на набора на данни и за количествен анализ.

3.3.1 Установка за набор на данни

Прототипът, свързан с прилежащата електроника, е изложен на сноп заредени частици на ускорителна линия Н6 на Супер протонен синхротрон (Super Proton Synchrotron) (SPS) в CERN за тестов период от 2 седмици. За това време бяха набрани данни при енергии на снопа от 20, 30, 40, 60 и 80 GeV при различни конфигурации на прототипи на електромагнитния и адронния калориметър на FoCal. Първият прототип на FoCal-H бе поставен върху подвижна повърхност с цел прецизно позициониране спрямо снопа. В идеалния случай частици, идващи от тръбата на снопа, биха попаднали в центъра на калориметъра, развивайка лавина в обема на калориметъра. Тъй като този прототип е с по-малки размери, то отечки при адронни лавини бяха очакван резултат, но тяхното свеждане до минимум зависи от доброто позициониране на тестовата установка. Разстоянието между адронния и електромагнитния прототип бе избрано да е възможно най-малко, за да се сведе до минимум разсейването на лавини, стартирали в електромагнитния калориметър. Поради същата причина, за да се избегне стартирането на адронни лавини в обема на използвания прототипа на FoCal-E, е извършен и набор на данни без неговата пасивна среда - W плочите. На Фиг. 3.6 е показана схема на тестовата установка и снимки на детекторните прототипи.

Наборът на данни бе извършен посредством ROOT базирания софтуеър FEBDAQMULT,



Фигура 3.6: Тестова установка за провеждане на верифициращи експерименти с прототипи на детектора FoCal. **Вляво** е показана схема на установката, поставена на подвижна повърхност. Снопът преминава последователно през сцинтилаторни подложки, прототип на електромагнитния калориметър и достига до адронния калориметър. В изображението в **средата** е показана снимка от тестове, а на **дясното** изображение е снимка на задната част на адронния калориметър от момент на свързването на силициевите фотоумножители с каналите на изчитащата електроника.

разработен от CAEN. Напълно дигитализираните данни бяха трансферирани чрез Ethernet до конфигурирания за обработката им сървър.

3.3.2 Реконструкция на данни

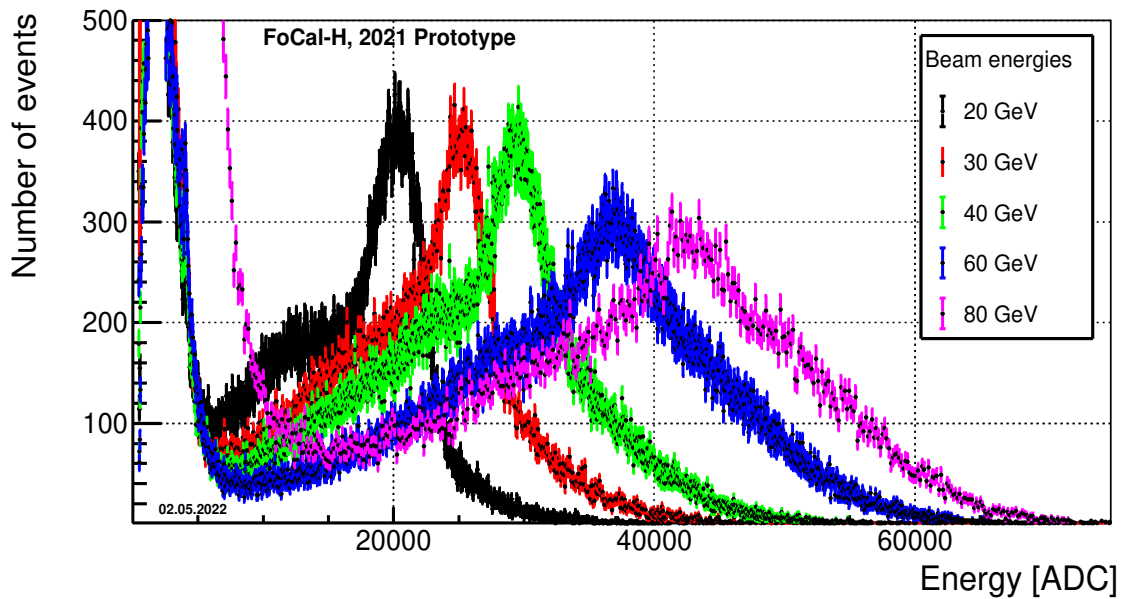
За реконструкция на данни бе разработен софтуер на програмния език C++ използващ за основа ROOT — Обектно-ориентирана среда за анализ на данни (ROOT) библиотеки. Софтуерът се състои от няколко основни компонента, като първата стъпка е за всеки канал да бъде определена стойността на пиедестала. Тази стойност се получава от събития, при които не е очакван сигнал от SiPM. За тях се записва сигнал от външен източник. Той трябва да е достигнал до който и да е от двата входни тригерни жака на платката - T0 и T1. Използваният сигнал за T0 е с честота 1Hz, докато този за T1 е с честота 10Hz с константно отместване от 25 ms между тях. Тъй като в тези допълнителни събития не се очакват сигнали, предизвикани от частиците от снопа, те бяха използвани за определяне на пиедесталите. След премахването на стойността на пиедестала за всеки канал, на следващата стъпка се реконструира пълният заряд. Той може да се дефинира като сума от всичките заряди q_i^k за каналите, принадлежащи на V1, V2 или и на двете, илюстрирано с уравнение 3.1:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{32} q_i^1 ; \quad Q_2 = \sum_{j=1}^{16} q_j^2 ; \quad Q_{all} = Q_1 + Q_2. \quad (3.1)$$

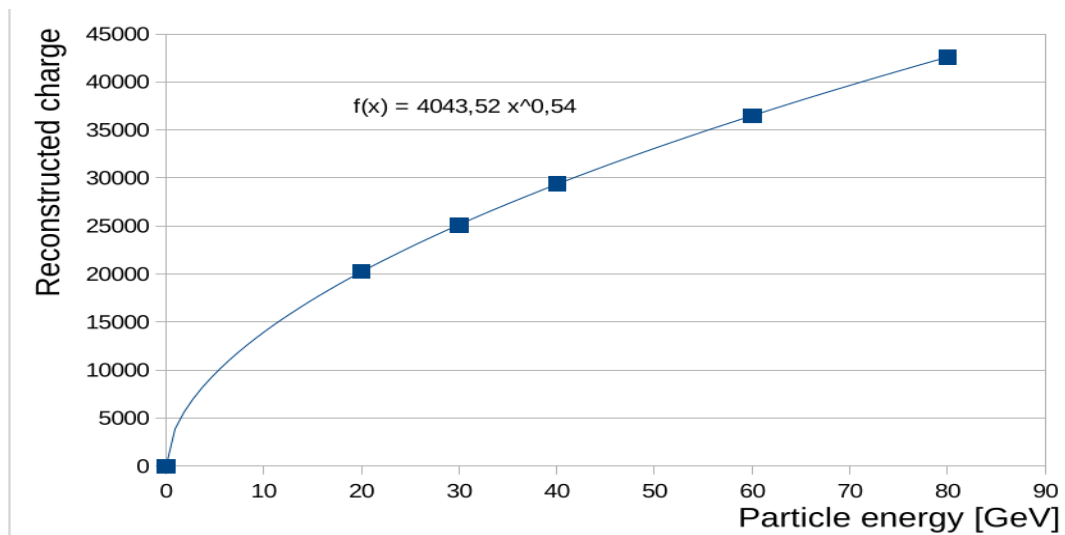
Поради споменатите проблеми със синхронизацията на платките за последвалия анализ са използвани събранните данни само за V1.

Като финална стъпка на анализа бе апроксимирането на получените разпределения с гаусова функция. От получените параметри на фитата, за всяко разпределение бе определена средната стойност (μ). Тази стойност е изследвана като функция на енергията на частиците на снопа и е дадена на Фиг. 3.8.

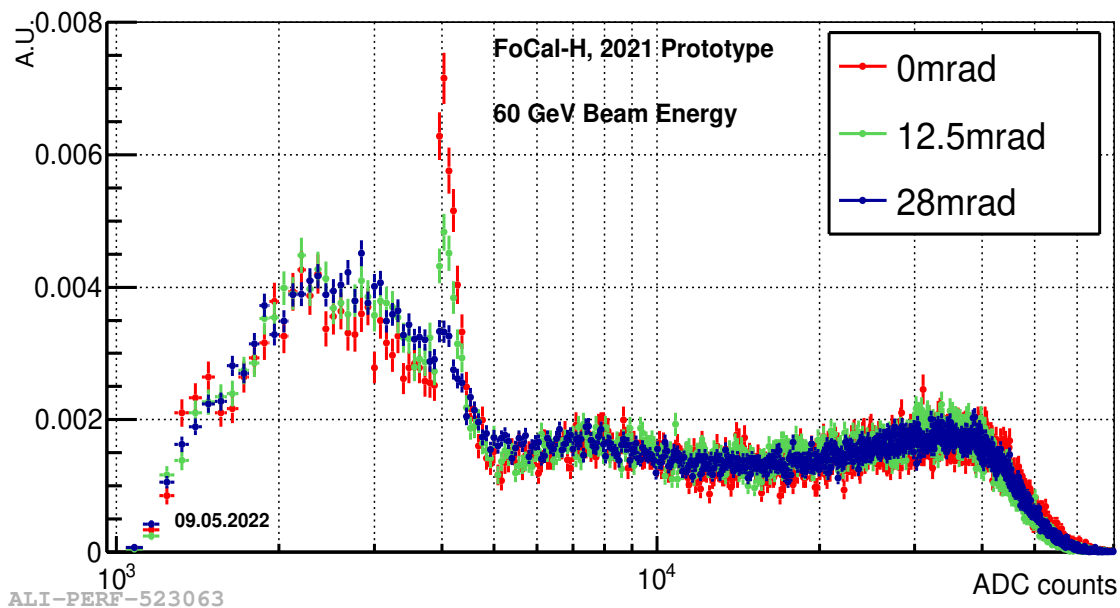
Вижда се изразена нелинейност, което е сигнал за възможно насищане в изчитащата апаратура. Тези резултати бяха получени след провеждането на тестовия набор на данни и



Фигура 3.7: Реконструиран заряд в първия прототип на FoCal-H. Стойностите са представени в ADC единици като функция на енергията на снопа при енергии от 20 GeV до 80 GeV.



Фигура 3.8: Средна стойност на реконструирания заряд като функция на енергията на снопа. Зависимостта е нелинейна, което е вероятна индикация за насищане в електрониката. Точката (0,0) е въведена с илюстративни цели и няма физичен смисъл, тъй като измервания при липса на сноп не са извършени.

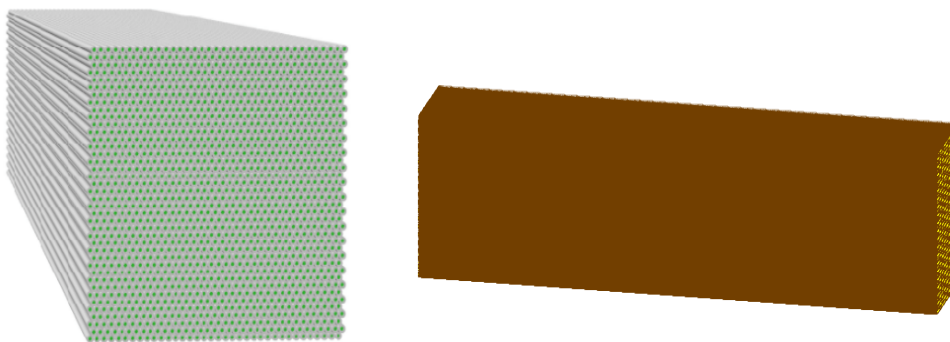


Фигура 3.9: Пикът, който се дължи на частица идваща от снопа и преминава през обема детектора движейки се през обема на сцинтилационно влакно може да бъде намален чрез поставяне на детектора под наклон. Изследваната зависимост е за ъгли от 0 mrad, 12.5 mrad и 28 mrad. Както се вижда, поставянето на блокче, което осигурява наклон от 28 mrad води до почти пълното изчезване на пика на насищане. Това е причината и последващият набор на данни да бъде извършен именно при такива условия.

моментна корекция в настройките не бе възможна. Въпреки това последващият анализ спомогна за разбирането на оперативния режим на изчитащата електроника и за изучаването на характеристиките на дизайна на адронния калориметър.

Позиция на прототип 1 спрямо снопа

В дизайна на адронния калориметър FoCal-H е заложено, както вече бе споменато, той да покрива региони на псевдобързина в интервала $3.4 < \eta < 5.8$. Също така той трябва да бъде разположен около тръбата на снопа на ЛНС. Това в условията на тестовия режим наложи да бъдат въведени някои корекции в установката. Те се състоят в поставянето на адронния калориметър под определен ъгъл спрямо посока на движение на частиците, идващи от снопа. Това е необходимо, тъй като при поставяне на детектора фронтално срещу тръбата на снопа в позиция успоредна на движението на частиците, то ще се получи насищане в 12-битовото ADC. То се дължи на частици, които се движат по продължение на влакното. Тогава депозираната енергия и произведената сцинтилационна светлина водят именно до такова насищане и в резултат то може да се наблюдава точно на стойността на 4096 ADC единици. За да бъде намален този ефект, в задния край на детектора бе поставено пластмасово блокче, което да повдигне калориметъра и да създаде ъгъл между надлъжната ос на детектора и оста на движение на частиците от снопа. Целта на това изследване бе да се види ефекта от намаляване на насищането в ADC. Използваните блокчета са с височини 5.5 mm и 11 mm и предоставят наклон на детектора съответно 12.5 mrad и 28 mrad. Разпределението по пълния заряд за различен ъгъл на наклона на FoCal-H прототип 1 е показано на Фиг. 3.9.



Фигура 3.10: Изображения фронтално (ляво) и странично (дясно) на въведения дизайн в симулационния пакет на адронния калориметър - FoCal-H.

3.3.3 Монте Карло Симулации

За подробното описание на данните, получени по време на тестовете през ноември 2021, беше разработен софтуер за Монте Карло (Monte Carlo) (MC) симулации, базиран на GEANT4 [17]. Дизайнът и геометрията на използвания прототип на детектора FoCal бяха въведени прецизно и редица симулации бяха използвани за подробно изучаване на отклика на прототипите. В този софтуер не беше въведена пълна симулация на електрониката, но някои нейни характеристики бяха изследвани качествено като част от анализа на симулираните данни. Основният списък с физични процеси, използван в симулацията е FriTioF parton model and Precompound model (FTFP) - FTFP_BERT, но за част от анализа бе използван и Quark-Gluon String model and Precompound model (QGSP) - QGSP_BERT. Енергията, депозирана във всяко пластмасово сцинтилационно влакно, бе използвана като изходен сигнал от симулациите, докато разпространението на светлината, отклика на SiPM-а и дигитализацията бяха извършени на ниво анализ. Беше използван параметър за превръщането на депозирана енергия в събран заряд (величината получена от електрониката, давана от софтуера за набор на данни в ADC единици).

Монте Карло имплементация

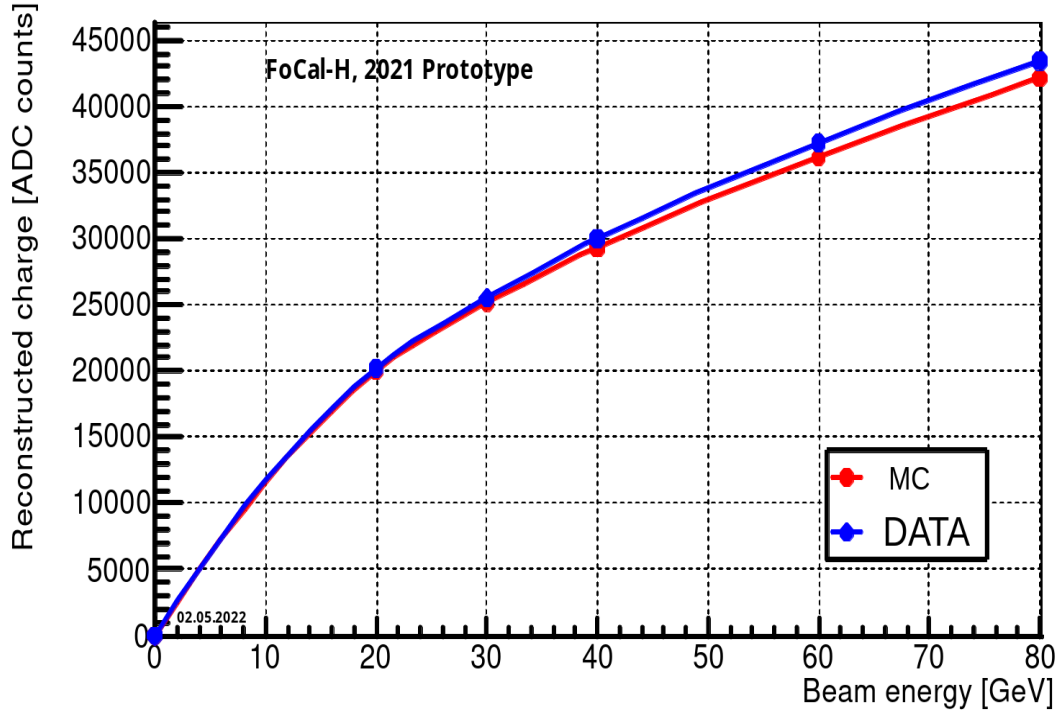
Въведеният дизайн на адронния калориметър в симулационния пакет включва:

- Размерите на тръбичките - външен диаметър 2.5 mm, вътрешен диаметър 1.2 mm и дължина от 50 cm
- Сцинтилационни влакна с диаметър 1.0 mm и дължина от 50 cm
- Общ брой тръбички/влакна - 1440
- Разпределение на тръбичките с поставените в тях влакна в паралелепипед с размери 100 × 100 × 500 mm

На Фиг. 3.10 е показано изображение на въведения в симулацията дизайн на адронния калориметър.

3.3.4 Окончателни резултати

За окончателната оценка на получените резултати беше направено сравнение между данни и MC симулации на зависимостта на реконструирания заряд при различни енергии на



Фигура 3.11: Сравнение на данни и MC симулирани данни за реконструирания електронен заряд за енергия в интервала 20 - 80 GeV. Показаните стойности са в ADC единици. Данните са отбелязани в синьо, а получените резултати от симулациите - в червено.

частиците в снопа. Интервалът от енергии на снопа е 20 до 80 GeV. За зависимостта на реконструирания заряд от данните бе предположено, че десният пик в общото разпределение на енергията се дължи на електрони и бе взета стойността на заряда след фитиране с гаусова функция. За симулацията бяха използвани аналогични съображения. Бяха проведени симулации на електрони за същите енергии. Отново пикът бе фитиран с гаусова функция.

Получените средни стойности на гаусовите функции при данни и MC симулации са използвани за сравнение. Зависимостта на реконструирания заряд за e^- (стойност на пика) в ADC единици като функция на енергията на снопа може да се види на Фиг. 3.11.

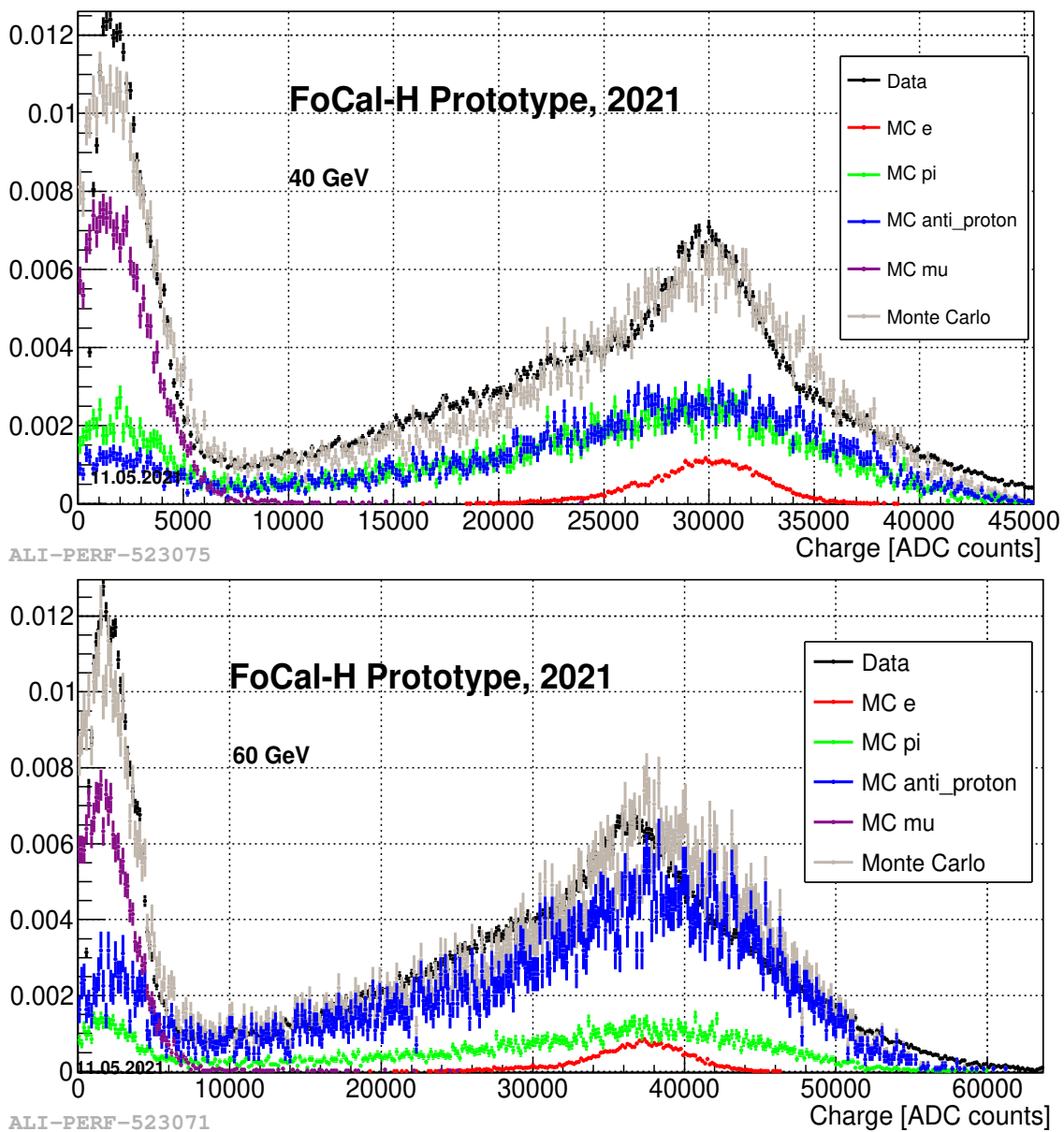
Получените стойности за функцията $f(x) = a \cdot x^b$, избрана за описание на резултатите са:

- За данни: $a = 4043.52$, $b = 0.54$
- за симулации: $a = 4031.86$, $b = 0.54$

Тези стойности са много близки и показват доброто описание на данните от MC модела. Използването на пика в разпределението на реконструирания заряд, получен от частици преминаващи през неабсорберна среда, за калибровка, и изследването на стойност за праг на насищане на електрониката се оказа достатъчни за валидация на модела. Получената стойност за конвертиране на депозираната енергия от MC сигнал в реконструирани заряд в ADC единици от данни се оказа достатъчно точна и позволи надеждно сравнение. Множителят във функцията за описание на зависимостите на реконструиран заряд от енергия на сноп са с припокриване от 99.7%.

За детайлно описание на данните от тестовия период, бе използвана и параметризацията на Атертън [18]. Бяха проведени 2 набора от симулации с равен брой събития с e^- , π^- , K^- , p , μ^- . Първият набор бе с енергия на частиците 40 GeV, а вторият с енергия 60

GeV. Получените разпределения бяха сумирани с тегла, където приносът на всяка частица бе изчислен с помощта на параметризацията. Всяко от тези разпределения бе сравнено с разпределението, получено от данните по време на тестовия период. Получените резултати могат да бъдат видени на Фиг. 3.12.



Фигура 3.12: Разпределение на пълния заряд от данните сравнен с MC генерирани събития. Използваните енергии на снопа са 40 GeV (горе) и 60 GeV (долу). Частиците от симулираните събития са събрани с тегла, където приносът на всяка частица е изчислен според параметризацията на Атертгън [18].

Глава 4

Прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H

През 2022 година беше сглобен втори прототип на адронен калориметър FoCal-H. Той е конструиран от 9 модула, всеки с размери $6.5 \times 6.5 \times 110 \text{ cm}^3$. Те са групирани в квадратна решетка от тип 3×3 . Всеки модул е съставен от 668 медни тръбички, като отново в тях е поставено сцинтилационно влакно VCF-12 [19]. Тръбичката е с външен диаметър 2.5 mm, вътрешен диаметър 1.1 mm, а еднослойното влакно е с диаметър 1 mm. Във всеки от тългите на модулите има месингова тръбичка, която служи за закрепване на последващата конструкция за изчитане на сигнали. Сцинтилационните влакна са групирани в снопове. Тези от централния модул са групирани по ~ 14 влакна в сноп, а тези в крайните модули - по ~ 27 в сноп. По този начин влакната от централния модул биват свързани към 49 SiPM-а, а тези от крайните са свързани към 25 SiPM-а, за да се осигури по-добра сегментираност в централната зона, където количеството светлина е по-голямо. Общият брой използвани SiPM-и е 249 от модел Hamamatsu S13360-6025PE SiPM с 25 μm клетка [20]. Разстоянието между SiPM-ите е намалено значително в сравнение с това при първия прототип. Разстоянието от ръб до ръб за SiPM-и в централния модул е 0.5 mm, а за тези във външните модули е 2.5 mm. На Фиг. 4.1 са показани изображения на Прототип 2 преди поставянето на SiPM-и.

4.1 Прилежаща електроника

За записване на сигналите от прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H бе избрана система от платки CAEN DT5202 [21], които са специално разработени за управление на SiPM и за набор на данни. Всяка платка DT5202 притежава 2 чипа Citiroc-1A, които да обработват сигналите от 64 изходни канала от SiPM-и. За подаване на обратно напрежение към SiPM-ите платките са снабдени със захранване A7585D. Тези платки позволяват работа в синхронен режим, като за целта е необходим или външен тригер, или дадена платка да бъде използвана в режим на тригер спрямо останалите. Управлението на платките се осъществява посредством Ethernet връзка. Тази връзка позволява и дистанционен контрол над SiPM-ите, както и мониторинг на текущото състояние на електроника. Използваният софтуер както за този контрол, така и за набор на данни е предоставеният от CAEN - JANUS.

Платките DT5202 могат да бъдат използвани за прецизно и индивидуално подаване на обратно напрежение на всеки SiPMs на детектора. Платката притежава две различни вериги на предусилвателите в чипа Citiroc-1A. Сигналът през едната верига преминава през кондензатор с капацитет 15 pF, преди да премине през усилвателя. Тази верига предоставя сигнал с Високо усилване (High Gain) (HG). Другата верига записва сигнал с Ниско усилва-



Фигура 4.1: Изображения на прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H от процеса на подготовка за монтаж. Показани са: Модул на прототип 2 - изграден от 668 медни тръбички и 4 месингови пръчки за монтиране (ляво). Групиране на сцинтилационни влакна в снопове с помощта на пластмасова решетка **център**. Прототип 2 подготвен за монтиране **дясно**.

не (Low Gain) (LG) и в нейната схема е използван кондензатор с капацитет 1.5 pF. Сигнали могат да бъдат записвани независимо от всяка от двете вериги. И за двата типа усилване може да бъде зададена предварителна стойност от софтуера за управление на платката.

Схеми на платката CAEN DT5202, както и на чипа Citiroc-1A са показани на 4.2.

4.2 Софтуер за симулации

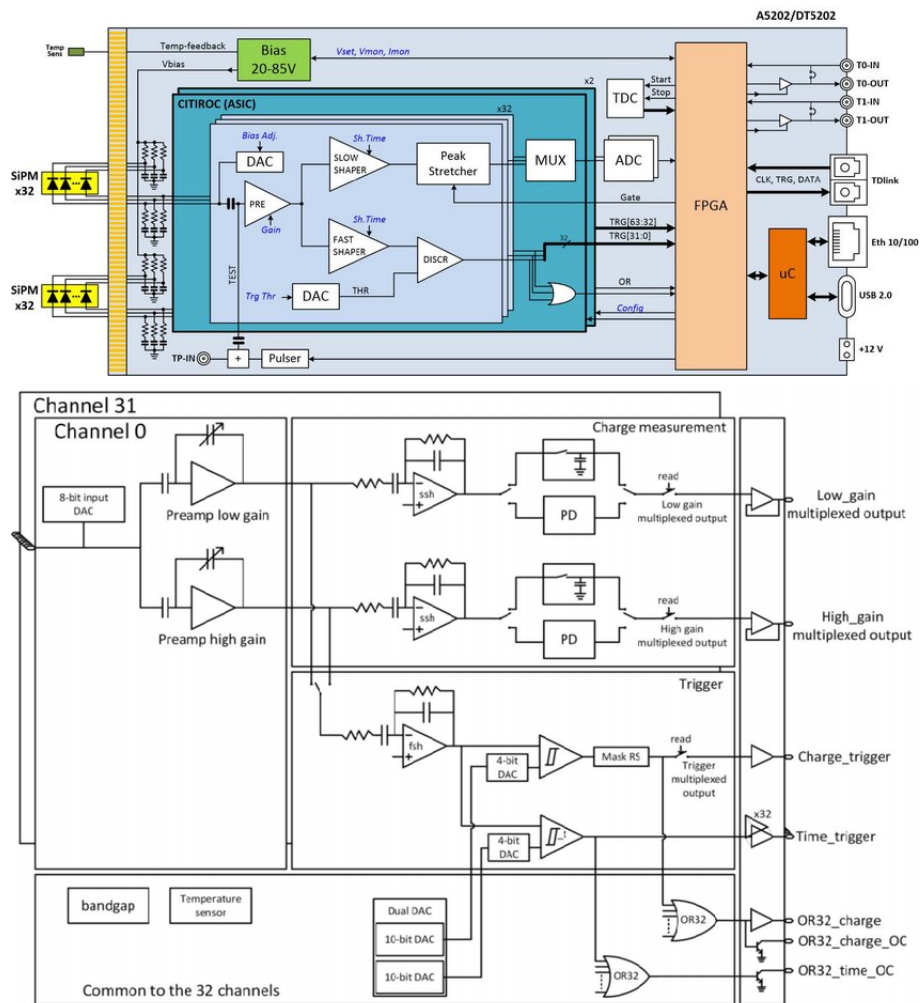
За детайлно моделиране на прототипи на FoCal беше разработен специализиран софтуер, базиран на пакетите на Geant4.10.7 [17]. Имплементираната конструкция на FoCal-E се състои от 20 слоя с 1.2 mm въздушно пространство между слоевете. Всеки от слоевете се състои от волфрамова сплав за абсорбер и силициев сензор. Волфрамовата сплав е съставена от 94% W, 4% Ni и 2% Cu. От 20-те силициеви сензора, 18 са подложки, а в слой 5 и слой 10 са поставени пикселни сензори.

В симулационния пакет FoCal-H се състои от 9 правоъгълни призми подредени в матрица 3×3 поставена на 44 mm зад FoCal-E.

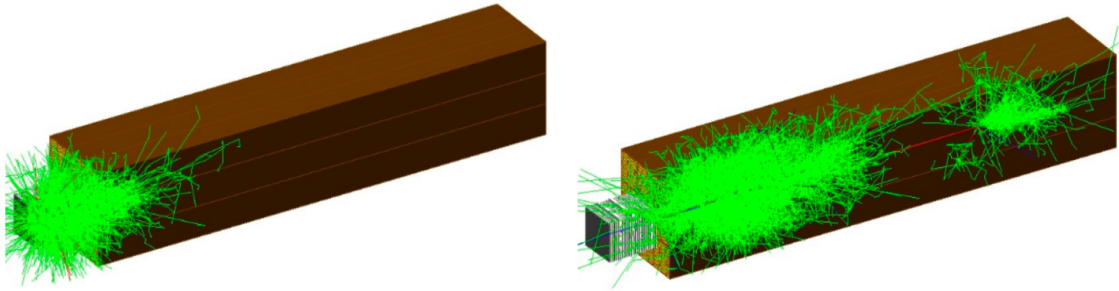
Всеки модул е с външни размери $64.75 \times 64.75 \times 1100 \text{ mm}^3$ и вътрешни размери $61.75 \times 61.75 \times 1100 \text{ mm}^3$ и съдържа 24×28 медни тръбички запълнени с полистиренови сцинтилационни влакна. Както тръбичките, така и влакната са добавени по начин, който максимално добре да послужи за описание в детайли на развитието на лавината и депозирането на енергия в различни материали, като се приема, че единствено средата на влакната е активна. Медните тръбички имат външен диаметър 2.5 mm и вътрешен диаметър 1.1 mm. Диаметърът на сцинтилационното влакно е 1.0 mm

Препоръката на *Guide For Physics Lists* от колаборацията GEANT [17] е използването на FTFP_BERT като списък за физични процеси при симулации, касаещи физиката при експерименти с колайдери, както и за калориметрия при високи енергии. Упоменато е, че списъкът по подразбиране QGSP_BERT е подменен именно с този след версия 10 на пакета GEANT. Въпреки това са извършени симулации и с двата физични списъка. За FoCal-E промяната на списъка не води до разлика в резултатите от симулациите, докато за FoCal-H списъкът с физични процеси QGSP_BERT показва резултати, описващи малко по-добре данните. Поради тази причина е избран този списък и представените резултати от симулациите са именно с него.

Изображения от симулация на лавини, породени от електрон и от пион, с базирания на



Фигура 4.2: Схема на платката CAEN DT5202 (горе) и чипа Citiroc-1A долу [21].



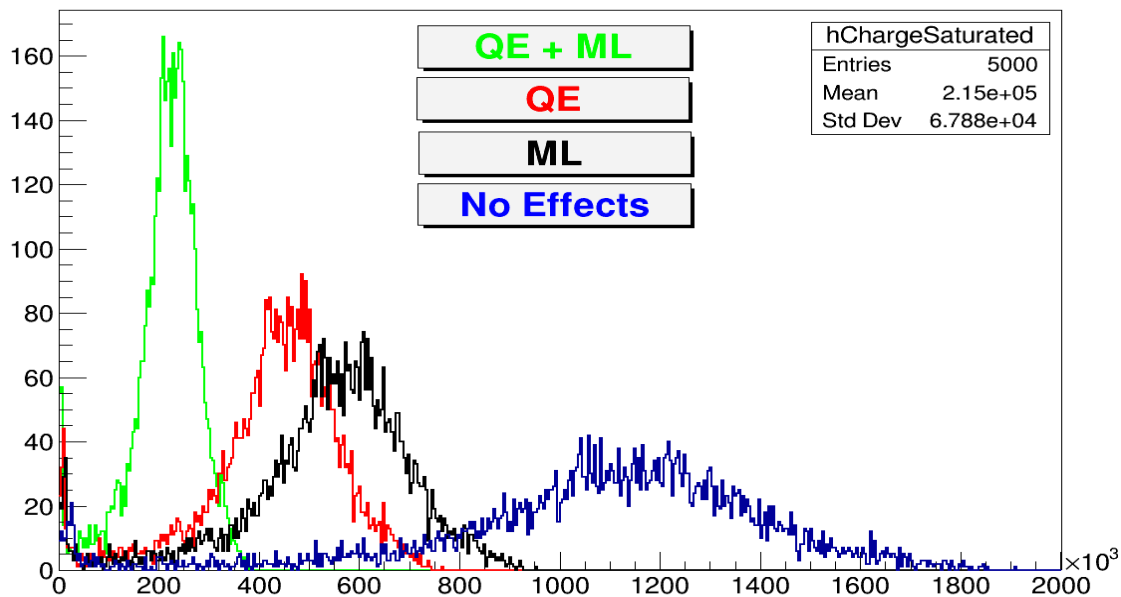
Фигура 4.3: Geant4 симулация на прототип на детектора FoCal. Показана е лавина стартирана от частица с енергия 100 GeV. Лавината в лявото изображение е предизвикана от електрон, докато дясната - от пион.

Geant4 софтуерен пакет са показани на Фиг. 4.3 . Използвани са последователно електрон и пион, всеки с енергия 100 GeV. Електронът развива своята лавина в обема на електромагнитния калориметър, като малка част от лавината достига и до адронния. Пионът преминава изцяло през обема на симулирания прототип на FoCal-E и стартира адронна лавина след навлизането в обема на прототипа на FoCal-H. Възможно е налитащ адрон да стартира своята лавина в обема на електромагнитния калориметър, която да продължи да се развива във FoCal-H.

За да бъде описанието на физичните процеси от симулациите максимално близко до реалния случай, в софтуера за симулации са въведени няколко корекции за FoCal-H. Депозиранията енергия в пластмасовите сцинтилатори е коригирана съгласно закона на Бъркс, описан в уравнение ?? . Ефектът от тази корекция се очаква да е малък поради високата енергия на налитащите частици и относително малкото dE/dx . Резултатът обаче показва спад с 5% на видимата енергия спрямо депозиранията такава. Допълнителен фактор от 8000 фотона на MeV е въведен, за да се симулира по-реалистично светлинният добив за влакната VCF-12. В добавка, за да бъде отчетено затихването на светлината, броят на фотоните от всяко събитие с депозирания енергия е коригиран с експоненциален фактор $\exp(-\Delta l/\lambda)$, където Δl е разстоянието от позицията на депозиранията енергията към SiPM-а, а $\lambda = 2.7$ m е стойността за влакната VCF-12 според Saint Gobben Datasheet. Константен фактор от 2.5% е използван, за да бъде отчетена ефективността за захващане на сцинтилационна светлина във влакното вследствие на настъпването на пълно вътрешно отражение и приема 100% загуби в края на влакното, към който няма изчитаща електроника. След тези корекции всяко попадение бива отнесено като брой фотони до края на влакното за по-нататъшни изследвания. Симулираните данни се запазват във файл в .root формат.

Софтуерът за анализ въвежда още няколко фактора, които да спомогнат за по-реалистичното сравнение между данни и симулации. Сигналът от индивидуалните влакна се групира по начин, който да доближи случая на групиране на влакната в канали от експерименталната установка. Отразяването на точното групиране на влакна е много трудоемко, тъй като методът на свързване на влакна в сноп не може да бъде описан с алгоритъм, а трябва да се въведе влакно по влакно. Поради тази причина е избран най-оптималният метод за групиране в програмния код.

Средната бройка влакна групирани в канал на детектора за външен модул е 27, докато за централния модул бройката варира между 13 и 14 в зависимост от позицията на канала. В софтуера за анализ на симулирани данни тази бройка е спазена за централния модул. За крайните модули е използвано групиране, при което се запазва по-висок брой влакна отведени към канал в близост до вътрешната част на детектора и по-малка бройка в край-



Фигура 4.4: Влияние на допълнителните корекции, добавени за по-добро описание на регистрирането на фотони от силициевите фотоумножители. С ML са означени загубите на фотони от въздушната среда между влакно и фотоумножител. С QE е означена квантова ефективност на SiPM. Представени са разпределения както от индивидуалното интерпретиране на тези ефекти, така и от тяхната комбинация. Комбинацията от тези ефекти очаквано допринася значително за отместването на позицията на пика на разпределението. По оста X е показан броят фотони.

ните канали. Това групиране е обусловено от очаквано по-голямо количество светлина от развитите лавини в близост до централната зона.

Допълнителен ефект, който е отчетен в анализа на симулираните данни, е загубите на фотони във въздушната среда, която се намира между края на сцинтилационното влакно и SiPM-а. В прототипите до момента не е използван оптичен силикон или лепило за закрепване на умножителите за края на влакната. Употребата на такъв слой би гарантирал среда с показател на пречупване сходен с този на средата на влакното. Поради тази причина е използван допълнителен фактор (ML) от 0.5, който да отчете тези загуби. Ефективността за регистрация (QE) на фотони на SiPM е приета за 40%.

На Фиг. 4.4 може да се проследи влиянието на тези ефекти върху разпределението на реконструирани фотони от софтуера за анализ на симулирани данни. На нея са представени разпределения по реконструиран брой фотони преди и след прилагане на ефектите на QE и ML. Забелязва се драстичен спад в бройката реконструирани фотони вследствие на прилагането и на двата ефекта.

Броят на получените фотоелектрони е симулиран с Поасоново разпределение, тъй като броят фотоелектрони, пристигащи до фотоумножител, е дискретна стойност. По този начин е получен броят на активирани пиксели за даден SiPM.

В симулационния пакет не са добавени корекции за нееднородностите в дизайна на прототипа. Различни дефекти от начина на отрязване на сцинтилационните влакна, изработката на медните тръбички и структурата на детекторен модул биха допринесли за непълното описание на физични данни от симулирани такива. В допълнение, усилването и ефективността за фоторегистрация са приети да бъдат еднакви за всички силициеви фотоумножители. Откликът на изчитащата електроника също е приет за линеен.

4.3 Валидиращ набор на данни на прототип на калориметъра FoCal

Основният тест за FoCal се извърши през месец май 2023 г. Всички те обхващат прототипи на детекторни компоненти на бъдещия калориметър. Сравнението на получените данни с резултати от MC симулации показва възможностите за подобрения в дизайна и електрониката до ниво на изграждане на финална тестова установка. За извършване на основния набор на данни бе избрана ускорителната линия H2, намираща се в North Area. Изборът е продиктуван от възможността да се изследват адронни лавини с енергия в интервала 60 - 350 GeV с $\Delta E/E \sim 2\%$.

4.3.1 Детекторна установка

Основният прототип на детектора FoCal е разположен на подвижна маса. Избраният прототип на FoCal-E, също както и този на FoCal-H е усъвършенстван в хода на предходните тестове. Тук е представен само финалният прототип на FoCal-E за посочения набор на данни. Той е поставен на специално изградена рамка, която поддържа различните слоеве на детектора. Разполага с два типа сегментирани Si детектора, които покриват обем от $9 \times 8 \times 17 \text{ cm}^3$. Това представлява 1/5 от един модулен елемент за бъдещия калориметър [1]. Използвани са 18 p-тип Si сензори, всеки състоящ се от 72 елемента с размер $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Предната част на сензора е залепена към контролната платка, подаваща обратното захранващо напрежение към сензорите. Сигналите се отвеждат към изчитащата електроника, която е от тип HGCROC - разработена от групата OMEGA за колаборацията CMS [22]. За контрол и мониторинг на HGCROC платките отговаря агрегатор. Цялата тригерна система, мониторинг и система за набор на данни на прототипа на FoCal-E са разработени да са съвместими със системата ALICE Online-Offline Computing System (O2) [23].

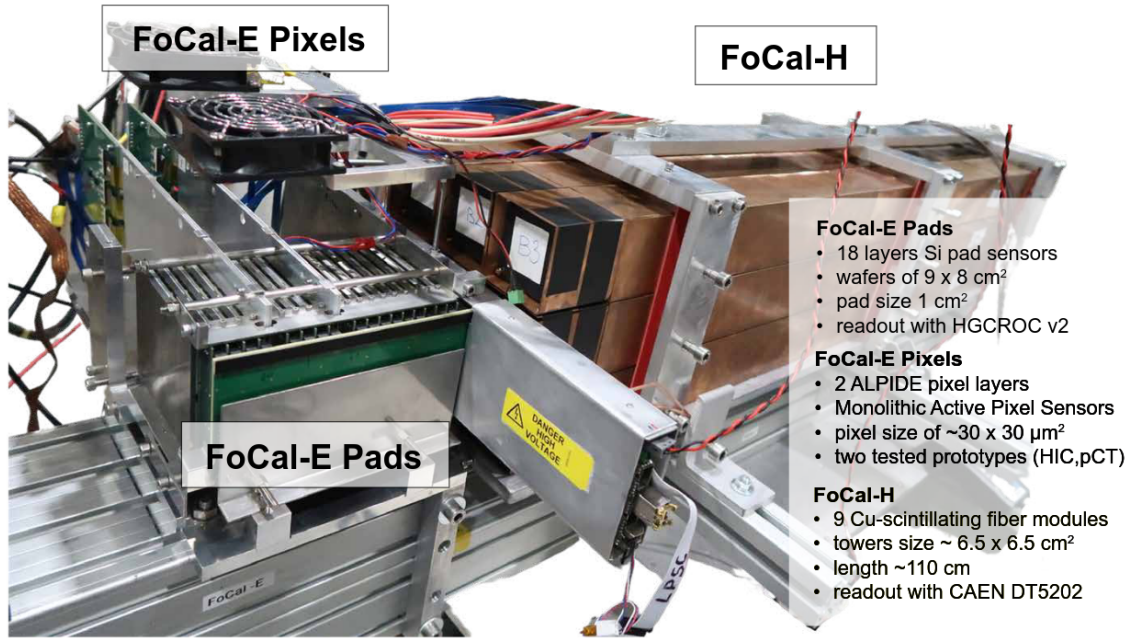
В допълнение са поставени и 2 пикселни слоя - Si MAPS. Те използват технологията на подобрения ITS [24]. Размерите на всеки пиксел са около $29 \times 27 \mu\text{m}^2$, след което следва епитаксиален слой за събиране на заряд с дебелина $25 \mu\text{m}$. В чиповете пикселите са подредени в матрица 1024×512 , което дава обща повърхност от $30 \times 15 \text{ mm}$ [25].

На минимално разстояние зад FoCal-E е поставен вече описаният в 4 прототип 2 на FoCal-H. Той е завъртян хоризонтално на 1° по отношение на оста на снопа, за да се предотврати възможността частици да попадат директно в сцинтилационното влакно. Това завъртане от 1° отговаря на $\eta \approx 5.3$ за частици, идващи от точката на взаимодействие на ALICE. Подробно изображение на конфигурацията, използвана по време на теста през месец май 2023 г., е дадено на Фиг. 4.5.

За да се изследва откликът на FoCal-H при високоенергетични адрони, бяха направени тестове в конфигурация единствено с адронния калориметър. По този начин се изследва само поведението на FoCal-H и се отстраняват ефектите от частици, стартирали лавини в обема на FoCal-E. Първоначалните резултати, въпреки прецизния избор на пробивно напрежение за всеки SiPMs, както и подбраните стойности за HG и LG усилване, показаха насищане в стойностите на HG веригата за централните канали. Това наложи разработването на метод, който да отчете насищането на HG и те да послужат за качествен анализ и определяне на разделителната способност по енергия на Прототип 2 на FoCal-H. В следващите части е описан подробно методът за анализ.

4.3.2 Определяне на позицията на пиедестала

Стойността на пиедестала се задава софтуерно и е равна на 25 ADC единици за всеки канал. За дадено събитие откликът за всеки канал, който има сигнал под тази стойност, се



Фигура 4.5: Изображение на конфигурацията на прототип на детектора FoCal използвана през месец май 2023 г [25].

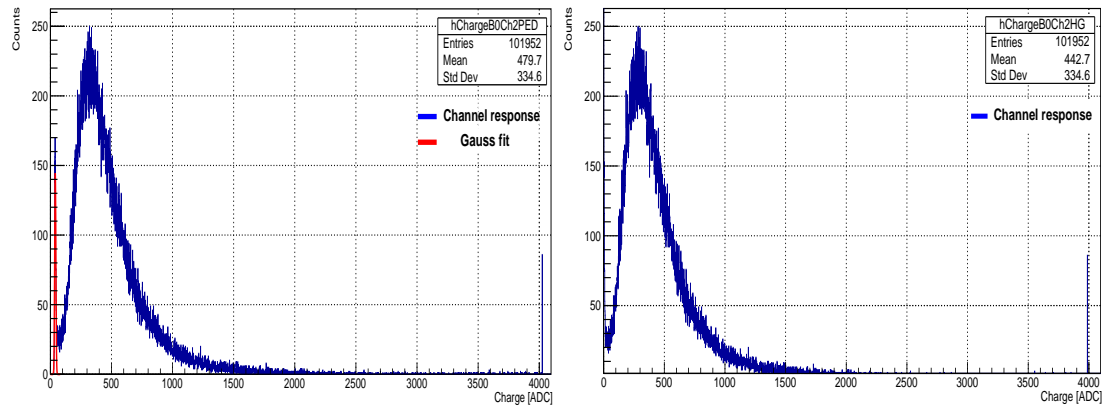
нутира. В действителност това не е реалната стойност на пиедестала. Тя бе определена от пълното разпределение на заряда за даден канал. За всеки канал индивидуално бе изучено пълното разпределение на заряда. Пиедесталът се изразява като остър пик, намиращ се в лявата част на разпределението по заряд, и отразява събития, при които няма постъпил сигнал от SiPMs. Този пик бе фитиран с гаусова функция в двустъпков алгоритъм. Пример за разпределението по заряд за даден канал и фитирането на пиедестала за съответния е показано на Фиг. 4.6. Първоначално бяха избрани по-широки граници (10 - 70) за фитиране, за да е сигурно, че пикът на пиедестала ще попадне в границите на гаусовата функция за всички канали. От получените стойности от фита бяха взети средната стойност (μ) и стандартното отклонение (σ). Тези величини бяха използвани като начални за втора стъпка. Тя се състои отново в прилагане на гаусов фит, но в по-тесен, а следователно и прецизен, диапазон - $\mu \pm 2\sigma$. Получената средна стойност μ от това фитиране бе използвана като крайна стойност за стойността на пиедестала. Така за всеки канал, зарядовата стойност (Q_i) за дадено събитие се определя от

$$Q_i = Q_i^{raw} - P_i, \quad (4.1)$$

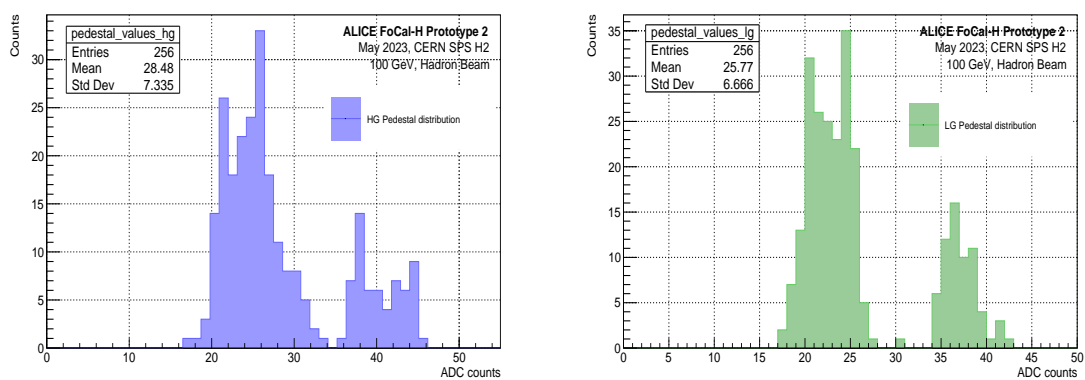
където Q_i^{raw} е първоначалната зарядова стойност, а P_i е получената стойност за пиедестала в дадения канал.

Пиедесталната стойност бе определена за всички 249 активни канала, както за HG, така и за LG, а алгоритъмът бе приложен върху целия набор от данни. Разпределението на получените стойности е показано на Фиг. 4.7. Всяка от получените стойности бе индивидуално извадена от записаната ADC зарядова стойност за всеки канал и за всяко събитие.

Забелязва се хомогенно поведение на сигналите от HG и LG веригите, както и стойности предимно около 25 ADC единици. Това, което прави впечатление, е наличието на втори, по-малък пик със значително завишени стойности. Той съдържа стойности от точно 64 канала, които са получени от една от платките. Това говори за по-различното ѝ поведение при набора на данни. По време на анализа на данни не бе открита друга разлика в работния ѝ режим. Последващият анализ е извършен върху данни с извадени пиедестални стойности.



Фигура 4.6: Разпределение по заряд за даден канал преди (ляво) и след (дясно) отстраняването на определената за него пиедестална стойност.



Фигура 4.7: Разпределение на определените стойности на пиедесталите за всеки канал, получени от HG (ляво) и LG (дясно).

4.3.3 Софтуер за апроксимиране

След преминаване през софтуера за анализ обработените данни преминават през специално написан софтуер за апроксимиране. Той отново е написан на C++ и използва ROOT библиотеки. Неговата основна цел е да фитира получените от анализа разпределения по заряд. Разработен е трисъпков алгоритъм, подобен на този за определяне на позицията на пиедесталния пик. Първоначално с гаусова функция се фитира даденото разпределение по пълния спектър. Тъй като данните са с извадени пиедестали, доминиращият пик е този от сигнали, дължащи се на развити в калориметъра лавини. Фитирането се извършва в автоматичен режим и параметрите на функцията не са с висока точност. Опашките на пика също влошават описанието на такова разпределение. Поради тази причина са необходими последващи стъпки. Средната стойност на гаусовия фит (μ) и стандартното отклонение (σ), се записват и се подават като отправни точки в стъпка две. При нея апроксимирането (отново с гаусова функция) се извършва в по-тесен интервал, определен именно от $\mu \pm n\sigma$, където стойността на $n = 1, 2, 3, \dots$ се определя в зависимост от желаната точност. Като финална стъпка, алгоритъмът извършва още едно фитиране, определено от $\mu \pm n\sigma$, но този път потребителят може да избере дали апроксимиращата функция да бъде Гаус или Crystal Ball [26]. Crystal Ball функцията се дава от:

$$f(x) = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{за } \frac{x-\mu}{\sigma} > -\alpha \\ A \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) \left(\frac{n}{|\alpha|} - |\alpha| - \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-n}, & \text{за } \frac{x-\mu}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases} \quad (4.2)$$

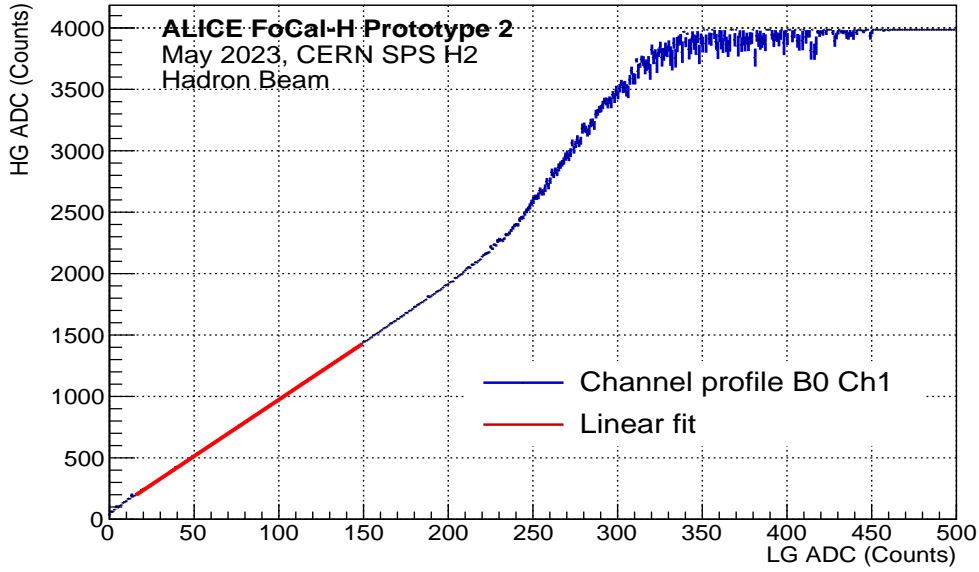
, където

$$A = \frac{n}{|\alpha|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{\frac{n}{|\alpha|-\alpha} + \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right)} \quad (4.3)$$

е нормировъчна константа, μ е средната стойност на разпределението, σ е стандартното отклонение на гаусовата част, α определя позицията, където се случва преходът между гаусовата и показателната опашка, n определя степента на затихването на показателната част на функцията. Тя бе избрана за имплементиране в софтуера, именно заради възможността за използване на несиметрично апроксимиране. Такава функция е използвана и от колаборацията CALICE при реконструкция на адронни лавини от тестове, извършени отново в експериментални зали на PS и SPS посредством адронен калориметър [27]. Бе извършен подробен анализ, използвайки и двете функции, а породените разлики от употребата на различни стойности на n и избора на вида на функцията внасят принос в определянето на систематичната грешка.

4.3.4 Редуциране на ефект на насищане

Едно от основните препятствия за разбирането на работата на прототипа на детектора FoCal-H при излагането му на високоенергитично лъчение е насищането на отделните канали. Този ефект е видим и в събраните през май 2023 данни. Ясно изразен е на Фиг. 4.6, където в края на разпределението се наблюдава шип на около 4096 ADC единици - последната клетка на 12-битовия режим на работа на ADC. Този ефект влошава качеството на калибровката на детектора и определянето на неговата разделителна способност по енергия. Поради тази причина е разработен метод за редуциране на ефекта на насищане за даден канал. За всеки канал е изследвано разпределението по заряд, записано за всяка от веригите - HG и LG. Ефектът на насищане е наблюдаван във веригата, записваща зарядовата амплитуда обработена от HG предусилвателя. Във веригата LG предусилвател не са открити канали с насищане. На Фиг. 4.8 е показана корелацията на HG и LG.



Фигура 4.8: Профил на канал 1, от платка 0. По оста X са показани стойностите в ADC единици по веригата на LG, а по оста Y - тези по HG. За определяне на зависимостта $Q^{HG} = f(Q^{LG})$ е използван е линеен фит в граници от 15 до 150 ADC единици по LG. Загубата на линейност започва да бъде ясно изразена при стойности на HG над 2000 ADC единици.

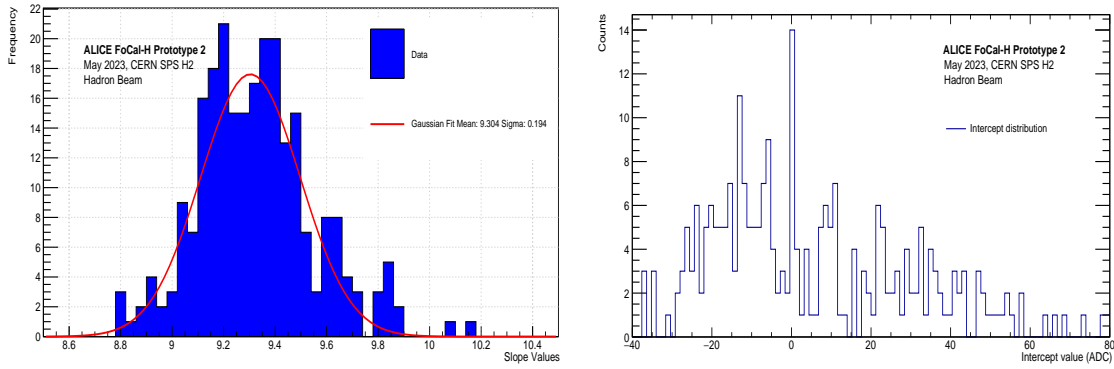
Всяка от получените 246 корелации е апроксимирана с линейна функция. За границите на функцията са използвани следните съображения:

- в лявата част е избрана такава граница, че да се изключи нееднородното поведение породено от дясната опашка на нулирания пиедестал
- за дясна граница са изследвани различни стойности, като основният праг е точката, след която корелационната крива губи линейност

Определените стойности за граници на фита са от 15 до 150 ADC единици по оста на LG.

Разпределение на параметрите на линейния фит, получени за 246-те активни канала е показано на Фиг. 4.9. Разпределението на параметъра даващ наклона на правата показва, че този параметър е хомогенен за всички канали и е със средна стойност 9.3 с отклонение 0.2 при използване на гаусова апроксимация. Свободният член от друга страна варира в по-широки граници, но неговият принос е значително по-малък. Методът на редуциране на ефекта на насищане, даден в уравн. 4.4, се състои при достигане на определен праг на заряда по HG за даден канал (Q_{thresh}^{HG}), да се използват зарядовите стойности записани от LG за същия канал (Q^{LG}). Това се случва посредством използване на получените параметри a и b от фита на профила на въпросния канал. Зарядовата стойност на LG бива умножена по получения коефициент и към произведението се прибавя полученият свободен член.

$$Q^{HG} = \begin{cases} Q^{HG}, & \text{ако стойността на } Q^{HG} < Q_{thresh}^{HG} \\ f(Q^{LG}), & \text{ако стойността на } Q^{HG} > Q_{thresh}^{HG}, \text{ където } f(Q^{LG}) = aQ^{LG} + b. \end{cases} \quad (4.4)$$



Фигура 4.9: Разпределение на параметрите, получени от фитирането на корелационните плотове за всеки канал. **Вляво** е показано разпределението на коефициента, а **вдясно** е дадено разпределението на свободния член на линейната функция. Наклонът на правата е хомогенен за всички канали има средна стойност 9.3 и отклонение 0.2. Свободният член от своя страна не се описва от конкретно статистическо разпределение, но той от своя страна има малък принос към използвания метод.

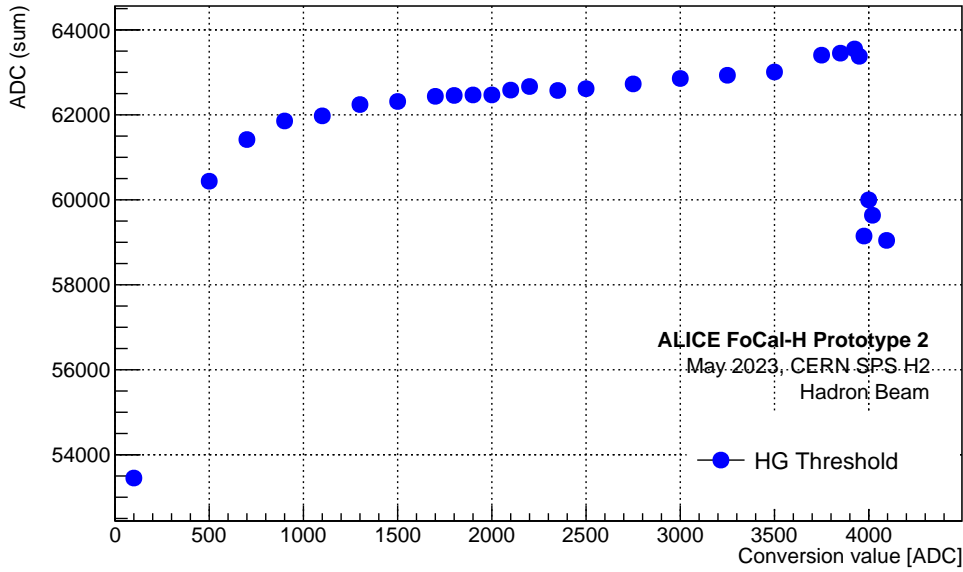
Изследване на прага на конверсия

За да се определи прагът (праг на конверсия Q_{thresh}), при който дадена зарядова стойност от HG бива заменена с такава от LG посредством гореописания метод, са изследвани различни Q_{thresh} стойности от 100 до 4096 ADC единици. За всички събития при дадена енергия е приложен методът, за да се получи т.нар смесен (mixed) (Q^{mix}) заряд. Този заряд се получава, като за всеки канал се извърши сравнение със стойността на HG заряда спрямо избрания праг.

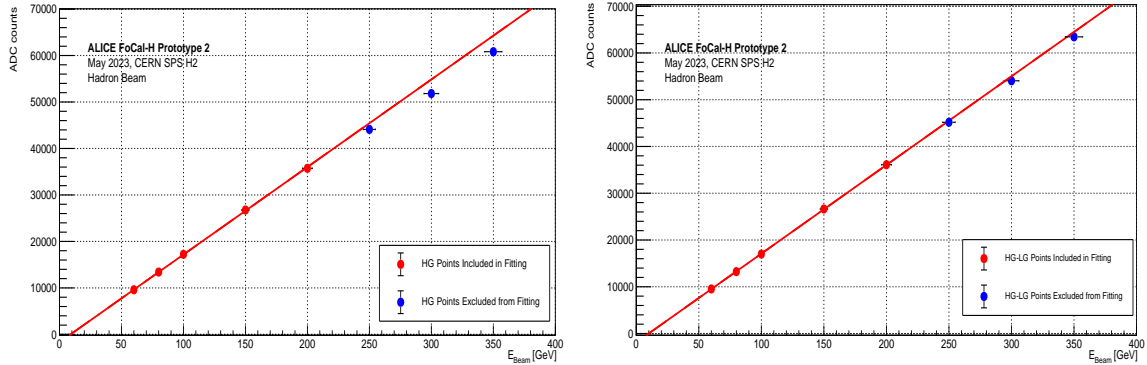
След задаването на конверсионна стойност, софтуерът за анализ бива стартиран отново. По този начин се получават разпределения на суми на реконструиран смесен заряд за всички канали. Тези разпределения преминават през софтуера за апроксимиране и се описват чрез използване на споменатия тристъпков алгоритъм с гаусова функция. От получените параметри от това фитиране е взета средната стойност μ . Тя е използвана, за да се построи зависимостта на получения смесен заряд от стойността на прага на конверсия ($Q_{tot}^{mix} = Q_{tot}^{mix}(Q_{thresh})$) и е дадена на Фиг. 4.10.

Получената зависимост показва наличие на плато в интервала 1500 - 2000 ADC единици. Под 1000 ADC единици се наблюдава драстичен спад поради прекалено ниската стойност на конверсия, а при стойности над 3900 ADC единици се губи полезният сигнал поради променения диапазон в следствие на извадените пиедестали, както и на индивидуалните характеристики на всеки канал. За праг на конверсия бе избрана стойността 1500 ADC единици, а интервалът от стойности $Q_{thresh} \in [1500 - 2000]$ ADC единици бяха използвани за изучаване на систематика, описана в 4.5. Стойността от $Q_{thresh} = 1500$ ADC единици е избрана, за да гарантира със сигурност редуцията на насищане за всеки канал, както и същевременно избягване на зоната на загуба на линейност, съобразени и от Фиг. 4.8.

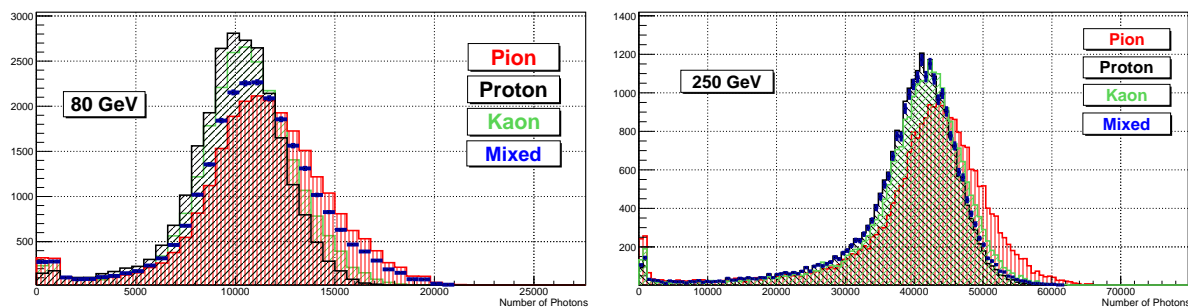
За валидация на метода на конверсия е извършен допълнителен анализ. За целта, се построява зависимостта на сумирания реконструиран HG заряд (Q_{tot}^{HG}) от енергията на снопа, при която са записани въпросните данни, дадена на Фиг. 4.11 (**ляво**). За точките при енергия на снопа в интервала 60 - 200 GeV е използван линеен фит. Той бива илюстративно продължен до 400 GeV, за да се проследи какво е отклонението на точките от 250 до 350 GeV спрямо него. Именно това отклонение от линейната апроксимация показва ясно насищането на електрониката при данни, използващи единствено HG. Тази зависимост е сравнена със случая, в който вместо Q_{tot}^{HG} се използва Q_{tot}^{mix} за всички енергии на снопа,



Фигура 4.10: Зависимост на сумата на реконструиран и смесен заряд (Q_{tot}^{mix}) от стойността на прага на конверсия Q_{thresh} при еднаква енергия на снопа. Наблюдава се плато за прагови стойности $Q_{thresh} \in [1500 - 2000]$ ADC единици.



Фигура 4.11: Сравнение на зависимостите на сумиран реконструиран заряд от енергията на снопа. **Вляво** е показана зависимост при употреба единствено на реконструиран HG заряд Q_{tot}^{HG} , а **вдясно** е дадена зависимостта при използване на смесен заряд Q_{tot}^{mix} . И на двете графики е използван линеен фит, построен само по точките в интервала 60 - 200 GeV, след което е илюстративно продължен до 400 GeV. Отклонението на точките от фита при употреба на Q_{tot}^{HG} е указание за насищане при високите енергии. Достигането на точките до фита при употреба на смесен заряд Q_{tot}^{mix} е валидация за употребата на метод, позволяващ преминаването към употреба на конвертиран LG заряд в случай на насищане на HG веригата. Неопределеността по X е $\Delta E/E = 5\%$.



Фигура 4.12: Разпределения на реконструиран брой фотони в калориметъра FoCal-H получени от симулации с частици с енергия 80 GeV (ляво) и 250 GeV (дясно). Симулациите са извършени с равен брой събития. В различен цвят са показани симулациите извършени с различни частици, а в синьо са показани разпределенията, получени след сумиране с тегла, определени от параметризацията на Атертън.

показана на Фиг. 4.11 (дясно). Линейният фит отново е построен за точките от 60 до 200 GeV и е илюстративно продължен до 400 GeV. Това, което се наблюдава е, че точките от 250 до 350 GeV вече лежат на него. Това е указание за ефективността на прилагането на метода.

4.4 Калибровка

Получените резултати показани в 4.11 (дясно) са използвани за калибровка на данните. Точките в интервала 60 - 350 GeV се апроксимират с линейна функция. Параметрите на тази функция дават зависимостта между ADC единици и енергия на снопа посредством формулата:

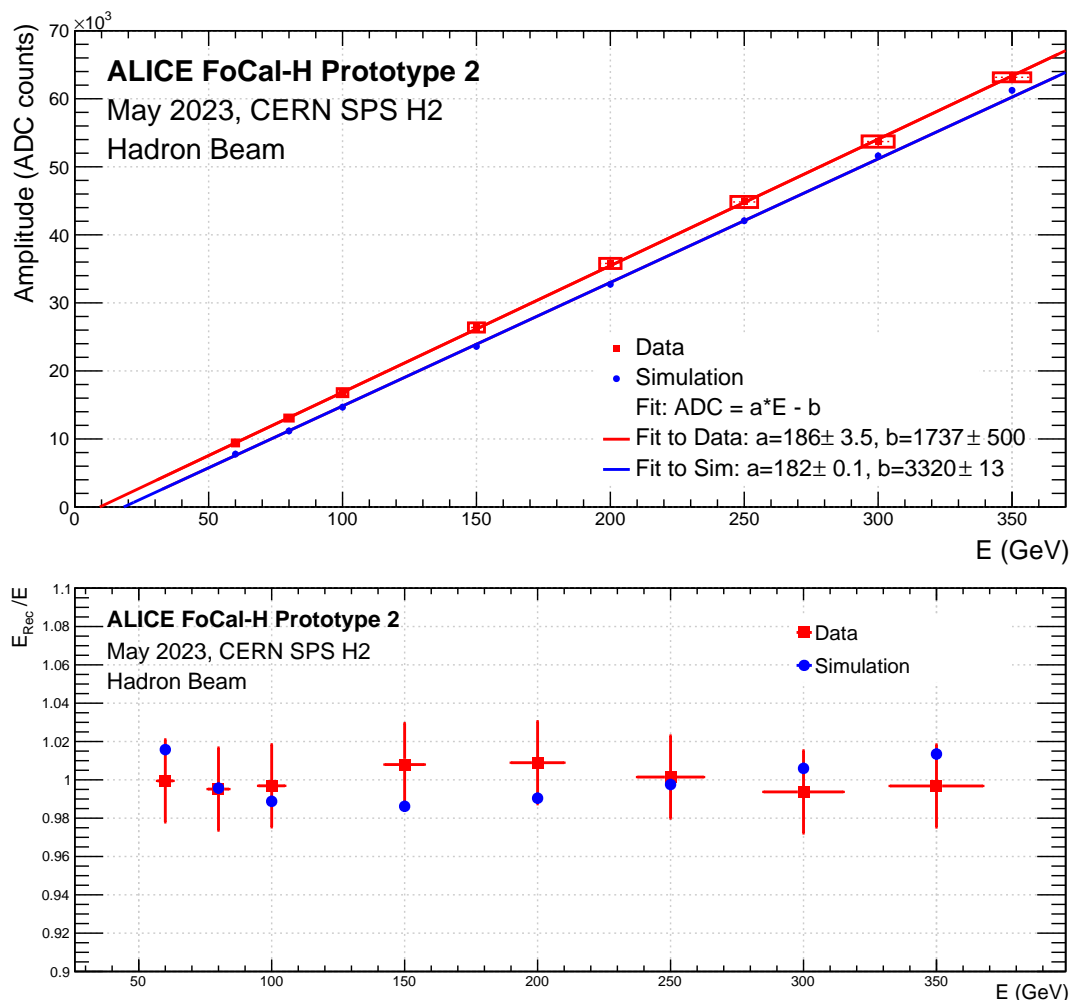
$$ADC = a \times E - b. \quad (4.5)$$

Калибровка бе извършена и върху симулираните данни, за да се сравни откликът на детектора. В софтуера за симулации, описан в 4.2, частиците могат да бъдат симулирани по един тип за виртуален експеримент. Това, както беше обяснено в ??, се различава от реалния случай, при който адронният сноп има многокомпонентна композиция. Това налага за всяка енергия на снопа да се извършат по 3 индивидуални набора симулации - по един с всяка от частици π^+ , K^+ и протон p . Това е обусловено и от стремежа към по-точно на описание на влиянието на сноп от заредени частици върху адронния калориметър, описано в ???. За всяка енергия на снопа са получени разпределения на реконструиран брой фотони. Тези разпределения са сумирани с тегла, използвайки параметризацията на Атертън и получените във Фиг ?? стойности.

Сумираните разпределения са фитирани посредством софтуера за апроксимация. Използваните граници на фита са $\mu \pm 2\sigma$. От получените средни стойности е построена зависимостта на реконструиран брой фотони за различна енергия на снопа. На Фиг. 4.12 са показани типични разпределения на реконструиран брой фотони от налитащи пиони, протони и каони. Ясно се вижда как изглежда и смесеното разпределение след употребата на параметризацията на Атертън, което впоследствие се използва за анализ.

На Фиг. 4.13 е показано сравнение между получените калибровъчни прави за данни и симулации. При симулациите е използван допълнителен скалиращ коефициент от 0.3, за да се премине от брой фотони към ADC единици. Този коефициент е определен единствено с цел сравнение на разпределения. За разлика от ??, където коефициентът бе определен на

база два независими ефекта, тук директна калибровка за преминаване от ADC единици от данните в единици депозирана енергия или в брой фотони от симулациите не бе определена. За такава конверсия са използвани единствено калибровъчните прави.



Фигура 4.13: **Горе** е показана реконструираната сума на заряд като функция на енергията на снопа в интервала 60 - 350 GeV. Реконструираната ADC сума от данните е сравнена със същата получена от проведените MC симулации. Получените зависимости са фитирани с линейни функции. **Долу** са показани съответстващите отношения между реконструираната енергия в прототип 2 на FoCal-H и енергията на снопа.

За всяка от точките от данните е изчислена систематична неопределеност от следните 3 фактора:

- Употреба на гаусова апроксимация
- Употреба на Crystal Ball апроксимация
- Различна стойност на праг на конверсия

Първите две неопределености са аналогични една на друга и се определят от границите на използвания фит. Както беше описано в 4.3.3, софтуерът за апроксимиране работи в многостъпков режим, на който могат да бъдат задавани различни граници на фита (гаусов

или Crystal Ball). Тези граници се задават от $\mu \pm n\sigma$, където за n са изследвани стойностите $n = 1, 2, 3$, а μ е получената средна стойност от гаусов фит в предходна стъпка. За всяка от тези стойности на n е взета резултатната средна стойност μ от апроксимирането в последната стъпка на софтуера, за всяка една от енергиите на адронния сноп. Тъй като на тази стъпка може да се използва различна апроксимация, то в резултат се получават общо по 6 стойности на μ за данните за всяка енергия за снопа - 3 от гаусовия фит и 3 от Crystal Ball фита. За всяка от двете тройки отговарящи на дадена енергия е взета разликата по абсолютна стойност на най-голямата и най-малката стойност на μ . Третата неопределеност зависи от избора на стойност на прага на конверсия. В 4.3.4 бе споменато, че за прагова стойност бе избрана 1500 ADC единици. Извършени са изследвания още с прагове 1250 и 1750 ADC единици. След въвеждането на тези стойности в софтуера за анализ, биват получени нови разпределения на реконструиран смесен заряд. Всяко от тези разпределения бива отново фитирано чрез софтуера за апроксимация, като за краен параметър се взема средната стойност μ , получена от третата стъпка на гаусов фит с граници $\mu \pm 2\sigma$. Тук отново е взета разликата по абсолютна стойност на μ от данните, получени от всяка енергия на адронния сноп за различните стойности на конверсия. Накрая получените разлики по абсолютна стойност за всяка от трите систематични неопределености се сумират квадратично и полученият резултат се добавя към статистическата неопределеност, пресметната от софтуера ROOT. Илюстративно неопределеностите са нанесени като кутийки около точките, показани на Фиг. 4.13. За неопределеност по оста X е взета стойност $\Delta E/E = 5\%$. Получените точки са апроксимирани с функцията 4.5. В резултат за наклона на правата от данни се получава $a = 186 \pm 3.5$, а за свободния параметър $b = 1737 \pm 500$. За симулации $a = 182 \pm 0.1$ и $b = 3320 \pm 13$. Параметрите на наклона на правата от апроксимациите в данните и симулациите показват близки резултати, докато свободните параметри се различават с фактор ~ 2 . Съотношението между реконструираната енергия и енергията на снопа, приета за енергия на падащите частици, за данни и симулации е показано в долния панел на Фиг. 4.13. Неопределеността на параметрите на апроксимацията е взета предвид. Членът, определящ наклона на правата при апроксимацията, доминира и дава 2% неопределеност. Неопределеността на енергията на снопа от 5%, която влиза като член в знаменателя, не е включена в представените неопределености. Нелинейността е в рамките на 2% за целия интервал на енергията на адроните от 60 GeV до 350 GeV.

Паралелно и независимо, такава калибровка бе направена и за симулациите. Отношението на реконструираната енергия спрямо енергията на адронния сноп е показано на Фиг. 4.13 (долу). Неопределеностите по оста Y са изчислени, като е използвана функцията за конвертиране на ADC единици в GeV. Тъй като софтуерът за анализ използва като стартов параметър реконструирания заряд в термини на ADC единици, то използваната функция има вида:

$$ADC = aE + b, \quad (4.6)$$

от където:

$$E = \frac{Q_{tot}^{mix} - b}{a}, \quad (4.7)$$

$$f(x) = \frac{x - b}{a}, \quad (4.8)$$

където с Q_{tot}^{mix} е означен именно зарядът, а параметерите a и b са получените от линейната апроксимация параметри. Неопределеностите на E са пресметнати като:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\delta b\right)^2}, \quad (4.9)$$

предполагайки независими a и b . Сравнение между самите разпределения за данни и Монте Карло след прилагане на калибровката е показано на Фиг. 4.14. При сумирането с тегла при ниските енергии на снопа (60 - 100 GeV), в състава му доминират π^+ , а при енергии над 250 GeV, той се състои предимно от протони (Фиг. ??, Фиг. 4.12). Наблюдава се, че дясната опашка в данните не може да бъде описана от симулациите. От друга страна левият пик в данните е добре описан. Той се появява на една съща позиция, независимо от енергията на снопа. Поради тази причина се счита, че се дължи на Минимално-йонизираща частица (Minimum Ionizing Particle) (MIP). Въпреки това, поради записаните пиедестали при набора на данни и впоследствие тяхното премахване, този пик не беше използван за допълнителна калибровка поради възможната неопределеност на позицията му.

4.5 Разделителна способност

Всяко от разпределенията на Фиг. 4.14 е апроксимирано както с Гаусова функция, така и с Crystal Ball функция. Тези апроксимиращи функции са използвани независимо, за да се изчисли разделителната способност по енергия σ_E/E по вече описания в 4.3.3 тристъпков алгоритъм. Разликите от използваните като крайна стъпка функции, както и ширината на интервала на фитиране $n\sigma$, са отчетени в систематичните неопределености на фита. За всяка енергия е взета стойността на Пълната ширина на половината височина (Full Width Half Maximum) (FWHM) от фитиращата функция и разделена на 2.355 за да се определи σ_E/E , където с E е означена средната стойност, получена от последната стъпка на алгоритъма при използване на Гаусова функция:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{FWHM/2.355}{\mu}. \quad (4.10)$$

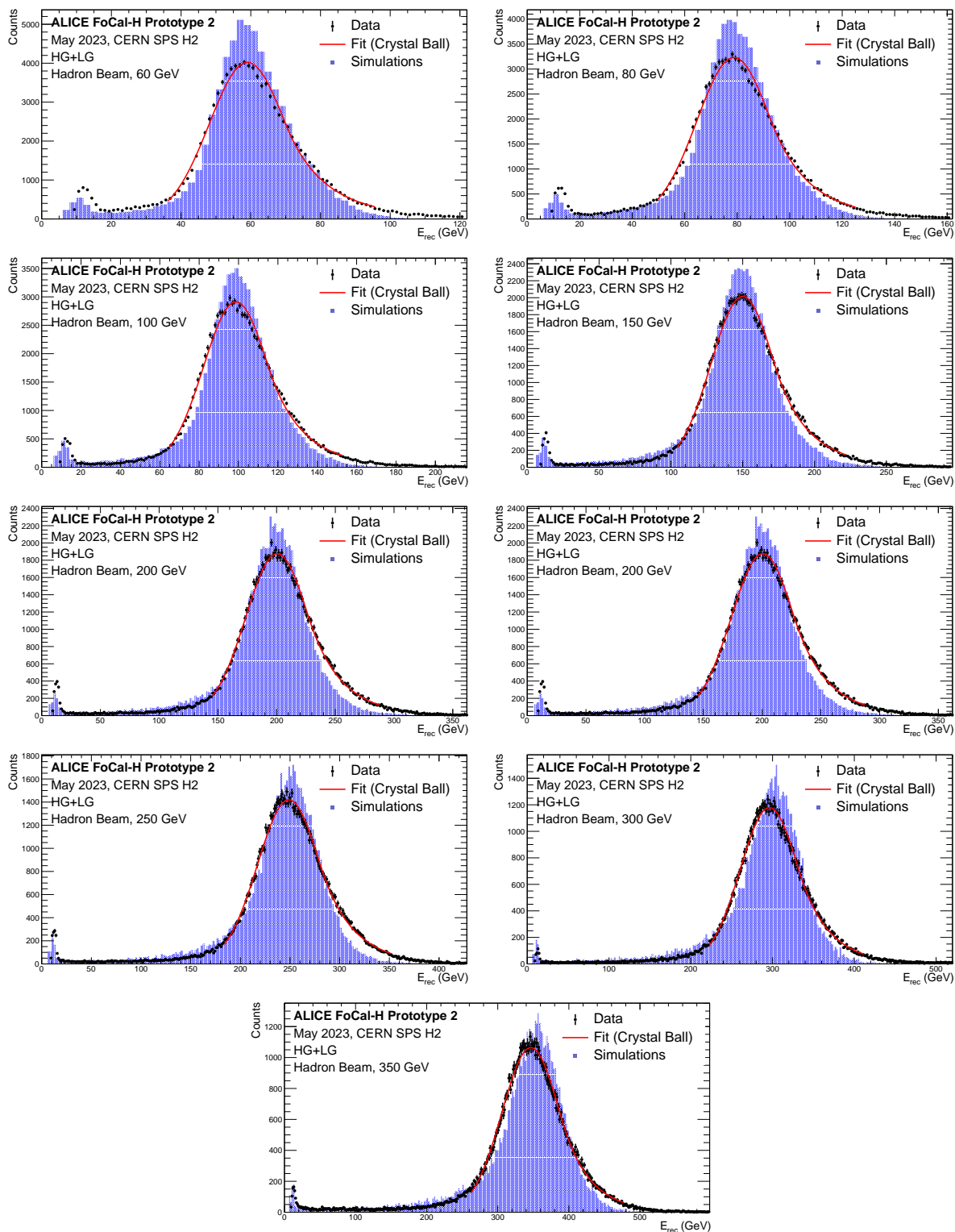
Същата процедура е използвана и за да се пресметне разделителната способност на прототипа от симулации. Получената разделителна способност като функция на енергията на налитащата частица е показана на Фиг. 4.15.

В посочената зависимост се наблюдава разлика между получените резултати от данни и симулации. Изследвани са различни ефекти, които редуцираха тази разлика. Бяха предложени две хипотези, при които се наблюдава съществена промяна и доближаване на симулациите до данните не отговориха на реалния физичен случай и са отхвърлени от разглежданията. Първата предполагаше, че в съдържанието на медните тръбички има различни примеси. Изследвани са част от най-популярните сплави, използвани от индустрията при произвеждане на медни тръбички, но в хода на това проучване е извършен и рентгенов анализ на тръбичка от прототипа, който показва, че към медта няма примеси. Другата хипотеза предполага намаляване на броя достигнали фотони до SiPM с повече от фактор 100, което също е неприложимо твърдение. Несъответствието между данни и симулации е все още отворен въпрос.

Разделителната способност по енергия е апроксимирана със следното уравнение:

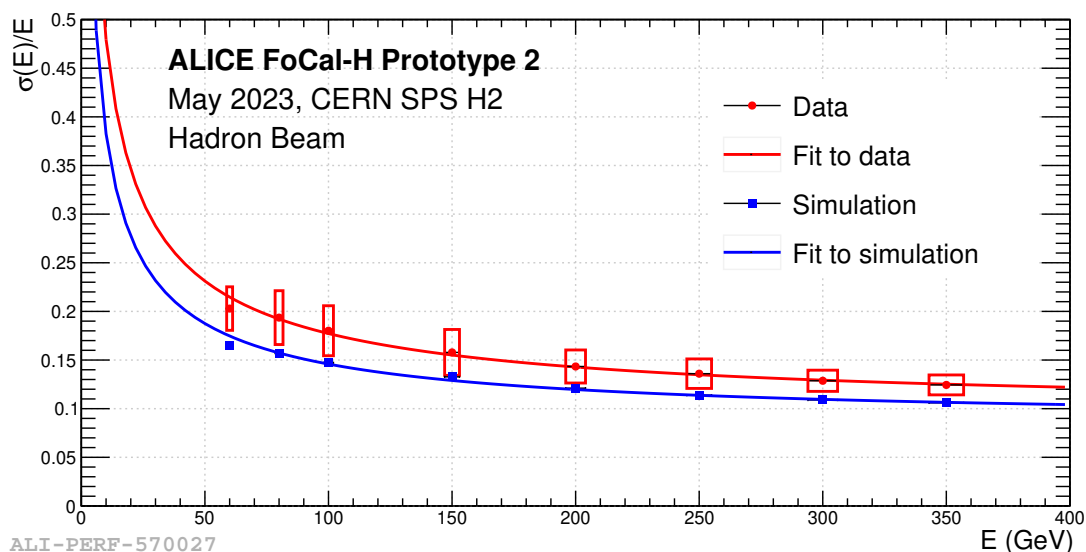
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\sigma_{\text{stoch.}}}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus \sigma_{\text{const.}} \oplus \frac{\sigma_{\text{noise}}}{E/\text{GeV}}, \quad (4.11)$$

където са въведени означенията $\sigma_{\text{stoch.}}$ за стохастичен член, σ_{noise} за шумов член и $\sigma_{\text{const.}}$ за константен член. За определяне на систематичните неопределености са изследвани няколко ефекта. Първият ефект, се дължи на избраните граници на фитиране $n\sigma$ на



Фигура 4.14: Разпределения на реконструираната енергия на FoCal-H Прототип 2 получени от данни и симулации при енергии на адроните 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 GeV. Разпределенията са нормирани към еднакъв брой събития.

разпределението на сумирания заряд (видимата енергия) след калибровка. Той е опреде-



Фигура 4.15: Разделителна способност по енергия (получена от $\text{FWHM}/2.355$) на FoCal-H Прототип 2 като функция на енергията на адронния сноп. Зависимостта е апроксимирана използвайки уравнението 4.11. Получените стойности за фита са: $\sigma_{\text{stoch.}} = 1.48$, $\sigma_{\text{noise}} = 0$, $\sigma_{\text{const.}} = 0.10$ за данни, и $\sigma_{\text{stoch.}} = 1.18$, $\sigma_{\text{noise.}} = 0$, $\sigma_{\text{const.}} = 0.09$ от симулации.

лен след вариация на границата на дясната опашка на Crystal Ball фита за стойности на $n = 1, 1.5, 2, 2.5$. Максималната получена разлика е взета за систематична неопределеност и се равнява на $\Delta\sigma_{\text{stoch.}} = 0.02$, $\Delta\sigma_{\text{const.}} = 0.001$. Разликите от описанието на формата на разпределението, идваща от възможността за използване на различни фитове в стъпка 3 от софтуера за апроксимация, са следващият изучен ефект. За да се пресметне, са използвани еднакви параметри на фитиране, но са изчислени резултатните разлики в параметрите на разделителната способност от употребата на гаусова функция или Crystall Ball функция в алгоритъма на софтуера. Техният принос се равнява на $\Delta\sigma_{\text{stoch.}} = 0.10$, $\Delta\sigma_{\text{const.}} = 0.005$. Ефектът от избор на конверсионна стойност за преминаване от HG заряд към LG посредством описания в 4.3.4 метод също допринася към систематичната неопределеност. Тази стойност е варирана от 500 до 4000 ADC единици и за систематичната неопределеност е взета отново максималната разлика. Получените неопределености са $\Delta\sigma_{\text{stoch.}} = 0.046$, $\Delta\sigma_{\text{const.}} = 0.003$. Изследван е и ефектът от избор на усилване. Този принос е определен, като са взети разликите по абсолютна стойност на параметрите при изчисление на разделителната способност по енергия посредством употребата единствено на LG заряд спрямо употребата на смесения LG – HG. Получената неопределеност е $\Delta\sigma_{\text{stoch.}} = 0.20$, $\Delta\sigma_{\text{const.}} = 0.002$. Последният фактор идва от максималното отклонение $\Delta p/p$ на снопа по линията на H2 SPS, което е 2% [28].

Допълнителни систематични ефекти като мястото на позицията на пиедестала и състава на снопа показваха пренебрежимо влияние върху $\sigma_{\text{stoch.}}$ и $\sigma_{\text{const.}}$. Окончателните резултати за параметрите на разделителната способност на Прототип 2 на FoCal-H са:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{stoch.}} &= (148 \pm 2_{\text{stat}} \pm 22_{\text{syst}})\% \\ \sigma_{\text{const.}} &= (10.0 \pm 0.13_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{syst}})\%,\end{aligned}$$

с шумов член, равен на 0. Неопределеността е доминирана от систематични ефекти. Разделителната способност по енергия на FoCal-H при високи енергии е доминирана от кон-

Таблица 4.1: Стойности на доминиращите систематични неопределености за стохастичния и константния членове в параметризацията на разделителната способност по енергия на прототип 2 на FoCal-H.

Систематичен ефект	$\Delta\sigma_{\text{stoch.}}$	$\Delta\sigma_{\text{const.}}$
Граници на фита	0.02	0.001
Форма на разпределение	0.10	0.005
HG-LG конверсия	0.05	0.003
Избор на усилване	0.20	0.002
Global energy scale	0.04	0.003
Квадратична сума	0.22	0.007

стантния член и е от порядъка на 10%. Тази стойност отговаря на очакваното поведение на детектора при високи енергии и покрива изискванията. Получените резултати валидират технологията на детектора FoCal-H, в резултат на което се даде официален старт за конструирането на детектора FoCal!

Научни приноси

Научните и научно-приложните приноси в представения дисертационен труд са както следва:

- Оценена е работоспособността на адронен калориметър изграден от медни тръбички със сцинтилационни влакна. Това е извършено посредством излагането му на сноп от заредени частици достигащи енергия до 350 GeV
- Предложена е методология за изследвания на сигнали от прототип 1 на адронния калориметър FoCal-H. При нея са разработени два независими метода за калибровка
- Предложена е методология за изследвания на сигнали от прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H. Показана е зависимостта на разделителната способност по енергия на калориметъра от състава на снопа частици
- Предложен е метод за възстановяване на заряд от канали, при които е наблюдавано насищане на прилежащата електроника
- Получените резултати в настоящата дисертация верифицират технологията на адронния калориметър FoCal-H и доведоха до официалния старт на конструирането му

Публикации в списания

Съществен принос

1. *Design and Test-Beam Results of the FoCal-H Demonstrator Prototype*
ALICE Collaboration • **Radoslav Simeonov** (Sofiya U.) for the collaboration.
e-Print: 2211.14791 [physics.ins-det]
DOI: 10.3390/instruments6040070
Published in: Instruments 6 (2022) 4, 70, Instruments 6 (2022), 70
2. *The forward calorimeter of the ALICE experiment at CERN LHC*
ALICE Collaboration • **Radoslav Simeonov** (Sofiya U.) for the collaboration.
DOI: 10.1088/1742-6596/2668/1/012007
Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2668 (2023) 1, 012007
3. *Performance of the electromagnetic and hadronic prototype segments of the ALICE Forward Calorimeter* M. Aehle (Kaiserslautern U.), J. Alme (Bergen U.), C. Arata (LPSC, Grenoble), I. Arsene (Oslo U.), I. Bearden (Copenhagen U.), **R. Simeonov** (Sofia U.) et al.
e-Print: 2311.07413 [physics.ins-det]
DOI: 10.1088/1748-0221/19/07/P07006
Published in: JINST 19 (2024) 07, P07006

4. *Influence of beam content composition on testbeam studies of hadron calorimeters*

R. Simeonov (Sofia U. (main)), V. Kozhuharov (Sofia U. (main))

DOI: 10.1088/1742-6596/2794/1/012002

Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2794 (2024) 1, 012002

Библиография

- [1] ALICE Collaboration. Letter of intent: A forward calorimeter (focal) in the alice experiment. 2020.
- [2] S. Acharya and ALICE Collaboration. The alice experiment: a journey through qcd. *Eur. Phys. J. C*, 84(8):813, 2024.
- [3] G. Aad et al. The atlas experiment at the cern large hadron collider. *JINST*, 3:S08003, 2008.
- [4] S. Chatrchyan et al. The cms experiment at the cern lhc. *JINST*, 3:S08004, 2008.
- [5] Jr. et al. A. A. Alves. The lhcb detector at the lhc. *JINST*, 3:S08005, 2008.
- [6] E. O. f. N. Research. Cern's accelerator complex. [Online]. Available: <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex> [Accessed 02 03 2024].
- [7] B. Abelev et al. Upgrade of the alice experiment: Letter of intent. *J. Phys. G*, 41:087001, 2014.
- [8] Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC. 11 2022.
- [9] Technical Design Report of the ALICE Forward Calorimeter (FoCal). 2 2024.
- [10] Domenico Colella. Upgrade of the alice experiment beyond lhc run 3. *International Journal of Modern Physics E*, 31(08), July 2022.
- [11] A. Giaz et al. Test beam results of the fiber-sampling dual-readout calorimeter. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1048:167964, 2023.
- [12] Plastic scintillating fibers datasheet. Technical report, Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc., 2021.
- [13] Onsemi c-series sipm sensors. Online resource, 2022. Достъпно на: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>.
- [14] User manual um5833 a1702/dt5702 32 channel sipm readout board for cosmic rays veto. Online resource, 2021. Достъпно на: <https://www.caen.it/products/a1702/>.
- [15] Lpc4370 rm cortex-m4 based microcontroller. Online resource, 2022. Достъпно на: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/LPC4370.pdf>.
- [16] M. Auger, A. Ereditato, D. Goeldi, I. Kreslo, D. Lorca, M. Luethi, C.R. von Rohr, J. Sinclair, and M.S. Weber. Multi-channel front-end board for sipm readout. *J. Instrum.*, 11:P10005, 2016.

- [17] S. Agostinelli *et al.* [GEANT4]. Geant4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506:250–303, 2003.
- [18] H. W. Atherton *et al.* Precise measurements of particle production by 400-gev/ c protons on beryllium targets. Technical report, CERN, 1980.
- [19] Plastic fiber scintillating and light transmitting. Online resource. Достъпно на: <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/fibers>.
- [20] Hamamatsu mppcs for precision measurement s13360. Достъпно на: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf.
- [21] Dt5202 new desktop 64 channel citiroc unit for fers-5200. Достъпно на: <https://www.caen.it/products/dt5202/>.
- [22] D. et al. [CMS] Thienpont. Performance study of hgroc-v2: the front-end electronics for the cms high granularity calorimeter. *JINST*, 15(04):C04055, 2020.
- [23] P. Buncic, M. Krzewicki, and P. Vande Vyvre. Technical design report for the upgrade of the online-offline computing system. Technical Report CERN-LHCC-2015-006, CERN, 2015.
- [24] B. Abelev et al. Technical design report for the upgrade of the alice inner tracking system. *J. Phys. G*, 41:087002, 2014.
- [25] M. et al. Aehle. Performance of the electromagnetic and hadronic prototype segments of the alice forward calorimeter. *JINST*, 19(07):P07006, 2024.
- [26] ALICE Collaboration. Quarkonium signal extraction in alice. Technical Report ALICE-PUBLIC-2015-006, 2015.
- [27] D. et al. [CALICE] Boumediene. Energy reconstruction of hadronic showers at the cern ps and sps using the semi-digital hadronic calorimeter. *JINST*, 17(07):P07017, 2022.
- [28] J. B. Bernhard et al. Chapter 3: Design of the east area facility after renovation. *CERN Yellow Rep. Monogr.*, 4:17–42, 2021.

Acronyms

ADC Аналогово-цифров преобразувател (Analog-to-Digital Converter).

ALICE Голям експеримент на сблъскващи се йони (A Large Ion Collider Experiment).

B1 Централна платка от Прототип 1 (Board 1).

B2 Външна платка от Прототип 2 (Board 2).

CERN Европейска организация за ядрени изследвания (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire).

FoCal Калориметър за малки ъгли (Forward Calorimeter).

FoCal-E Електромагнитен калориметър за малки ъгли (Electromagnetic Forward Calorimeter).

FoCal-H Адронен калориметър за малки ъгли (Hadronic Forward Calorimeter).

FTFP FriTioF parton model and Precompound model.

FWHM Пълната ширина на половината височина (Full Width Half Maximum).

HG Високо усилване (High Gain).

HL-LHC High-Luminosity Large Hadron Collider.

ITS Inner Tracking System.

LG Ниско усилване (Low Gain).

LHC Large Hadron Collider.

LS1 Първото дълго спиране (The First Long Shutdown).

LS2 Второто дълго спиране (The Second Long Shutdown).

LS3 Третото дълго спиране (The Third Long Shutdown).

MAPS Монолитен активен пикселен сензор (Monolithic Active Pixel Sensor).

MC Монте Карло (Monte Carlo).

MIP Минимално-йонизираща частица (Minimum Ionizing Particle).

O2 ALICE Online–Offline Computing System.

p-p Протон-протонен сблъсък.

PDF Партон дистрибутивни функции (Parton Distribution Functions).

PS Протонен Синхротрон (Proton Synchrotron).

QCD Квантова Хромодинамика (Quantum Chromodynamics).

QGP Кварк-глюонна плазма (Quark Gluon Plasma).

QGSP Quark-Gluon String model and Precompound model.

RHIC Релативистки колайдер на тежки йони (Relativistic Heavy-Ion Collider).

ROOT ROOT — Обектно-ориентирана среда за анализ на данни.

SiPM Силициев фотоумножител (Silicon Photomultiplier).

SPS Супер протонен синхротрон (Super Proton Synchrotron).