

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Разработка метода детектирования анти сигма-гиперонов в данных Run 3  
эксперимента ALICE**

Научный руководитель

к.ф.-м.н.,

\_\_\_\_\_ Д.С. Блау

Студент

\_\_\_\_\_ П. А. Бахтин

Москва 2024

# Содержание

Введение	2
Свойства искомых частиц и описание метода детектирования	4
Устройство программного пакета O2	6
Отбор антинейтронов и процедура вычисления их энергии	12
МС моделирование	14
Распределения по параметрам отбора	18
Выводы	24
Список используемых источников	25

# Введение

Эксперимент ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — один из 4 экспериментов на Большом адронном коллайдере, создан для исследования свойств кварк-глюонной материи, возникающей при ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов, а также иных коллективных свойств столкновений при высоких энергиях. [4]

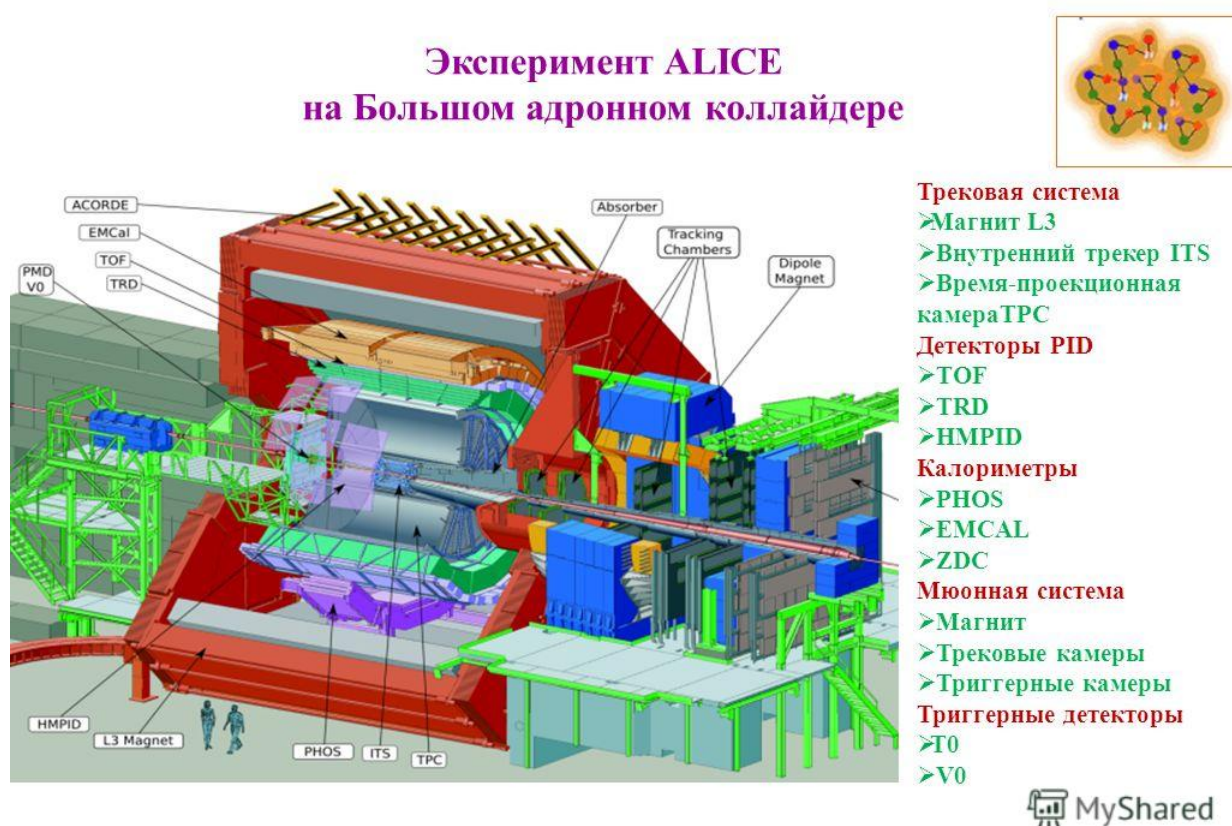


Рисунок 1 — Устройство эксперимента ALICE

Данная задача требует от устройств детектора одновременно регистрировать мягкое излучение, характеризующее поведение материи как целого, и жёсткие  $\gamma$ -кванты - в более узком диапазоне псевдобыстрот. В частности, одним из спектров, является электромагнитное излучение. Оно регистрируется системой калориметров:

1. Фотонный Спектрометр (PHOS) [1]

2. Электромагнитный калориметр (EmCal)[2] и Двухлучевой калориметр (Dcal)[3]

Соответственно, первый применяется для измерения спектров потока и корреляций тепловых и быстрых прямых фотонов, а также  $\pi^0$  и  $\eta$ -мезонов путём регистрации их распадов в фотонные пары. Требуется определение энергии и положения дочерней частицы с высокой точностью.

PHOS — электромагнитный калориметр высокого разрешения, регистрирующий фотоны и электроны с  $p_T$  от 100 MeV/c до 100 GeV/c. Его основные характеристики следующие:

Область покрытия по псевдобыстроте:  $-0.125 > \eta > 0.125$

Расстояние до точки взаимодействия: 460 см

Область покрытия по азимуту:  $\Delta\phi = 70^\circ$

Модульность: три модуля по 3584 и один в 1782 ячейки

Материал изготовления:  $\text{PbWO}_4$

Размеры кристаллов:  $22 \times 22 \times 180 \text{ mm}^3$

Глубина в единицах радиационных длин:  $20 X_0$

Число кристаллов: 12 544

Площадь:  $6.0 \text{ m}^2$

Рабочая температура:  $-25^\circ\text{C}$

Плотность кристаллов:  $8.2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

# Свойства искомых частиц и описание метода детектирования

Частицы, детектированию которых на основе данных RUN3 эксперимента ALICE посвящена эта работа - античастицы к сигма-барионам. Ранее, измерялись их массы по продуктам распадов в других экспериментах.

Предположим, что их моды распада ведут себя аналогично с точностью до замены всех частиц на античастицы, как в случае с Сигма-барионами.

Параметры частиц следующие:

Странность: -1

Масса: 1189 МэВ

Из спин: 1

Кварковый состав:  $\Sigma^+ = uus; \Sigma^- = dds$

Моды распада для  $\Sigma^+$ :

$\Gamma_1: p\pi^0$  (51.57 ± 0.30)%

$\Gamma_2: n\pi^+$  (48.31 ± 0.30)%

Основная мода распада для  $\Sigma^-$ :

$\Gamma_1: n\pi^-$  (99.48 ± 0.005)%

Несложно в данном случае отметить в таком случае, что при рассмотрении античастиц - становится критически важно уметь измерять спектр антинейтронов. Это как может дать дополнительный способ пронаблюдать эффект повышения выхода странных частиц в АА-столкновениях, и дать дополнительную проверку для античастиц.

Особенностью системы детекторов в эксперименте ALICE - отсутствие адронного калориметра, что является следствием необходимости подробно измерять мягкую физику. Следовательно, для детектирования нейтронов и антинейтронов нет специального детектора. И если детектировать нейтроны с помощью сцинтилляционного детектора и отличить от большого

фотонного спектра будет весьма затруднительно, то для антинейтронов - такая возможность присутствует.

Взаимодействие антинейтронов с веществом сцинтиллятора, в отличие от нейтрона, будет также включать аннигиляцию антинейтрона с нейтронами калориметра в  $\gamma$ -квант. Такое событие будет отличаться от обычного электромагнитного ливня с последующим высвечиванием этой энергии - ливень будет, сравнительно с аналогичными по выделению энергии от фотонов, более компактным при сравнимых энерговыведениях, предположительно.

Следовательно, получается, что для антибарионов, существует потенциально возможный алгоритм реконструкции. Однако, для того, необходимо не только провести расчет с помощью инструментов моделирования эксперимента, но также проверить с помощью настоящих данных полученные таким образом отборы кластеров аннигиляции.

Каким же образом будет возможно это сделать, если других детекторов, регистрирующих антинейтроны - нет.

В таком случае, очевидным способом разумеется могут стать антипротоны. С одной стороны, эти частицы - не распадаются, а следовательно, с помощью мюонных детекторов возможно проверить факт аннигиляции антипротона. С помощью системы трекеров - определить, является ли частица - антипротонов и восстановить трек. Сам же калориметр, соответственно, даст либо сигнал в результате сквозного прохода, либо - сигнал аннигиляции.

Предварительно, можно опираться на те критерии, которые были сформулированы в отборах кластеров на данных RUN2 - кардинальных изменений в калориметр не вносилось. Затем реализовать процедуру для построения инвариантной массы для антибарионов - в ее ходе, в любом случае, необходима работа с треками, и получить первое указание на корректность отбора в виде наличия или отсутствия пика. Наконец, с помощью более сложного использования трековых систем, можно будет на основании аннигиляционных кластеров антипротонов, улучшить отбор таковых, а также строить инвариантную массу трех частиц с двумя фотонами - чтобы сравнить, затем, выход анти $\Sigma^+$ -гиперонов.

# Устройство программного пакета O2

Программный пакет O2 создан в первую очередь для реализации на программном уровне параллельных вычислений, тем самым оптимизируя элементы Монте-Карло моделирования.

Для выполнения моделирования создан дополнительный пакет O2sim, расширяющий возможности O2.

Основной формат данных - сквозным образом связанные таблицы, ключевой элемент - AO2D файлы. Модель хранимых данных можно представить следующим образом:

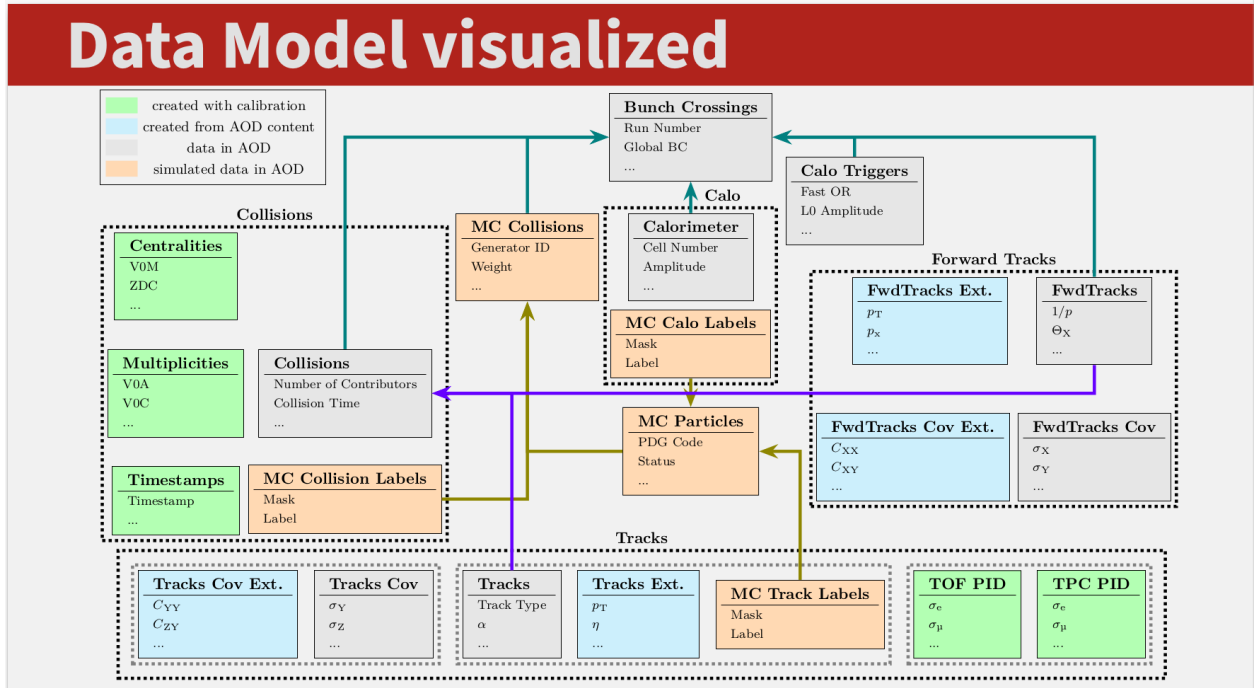


Рисунок 2 — Визуализация модели данных

Процесс создания AO2D файла при работе моделирования событий регистрации детектором события можно представить следующим образом:

1. Создание конфигурации работы генератора из заданного потока.
2. Подгрузка модели детектора (геометрия, магнитное поле).
3. Моделирование физического отклика детекторов (Hits).

4. Моделирование результата оцифровки сигнала (Digits) для детекторов. Отдельно проводится для каждого сегмента ТРС.
5. Процесс реконструкции данных до необходимых масштабов, чтобы сформировать AO2D файл (формирование Tracks из данных трековых систем - ITS, ТРС, Мюонной камеры; таблицы Cells и загрузка Calo Triggers - из данных калориметров, а также collisions через primary и secondary vertexing, результат объединения данных).
6. Сборка таблицы из своих составляющих в единый набор со сквозной нумерацией (за это отвечают Indexed tables - BCId, например).

Каждый из этих этапов реализован как рабочий поток [1] (workflow) - то есть выполнение последовательности исполняемых процессов, именуемых задачами (Tasks).

Сама по себе задача - структура, содержащая в себе функции init и некоторое количество разных функций process - то есть, исполняемых процедур. Непосредственно задачи описываются кодом на языке C++.

Важное правило работы всех task - получаемые на вход таблицы не могут быть изменены.

Все дальнейшие процедуры реализуются в другой части программного пакета - аналитические задачи хранятся и используются пакетом O2Physics.

Соответственно, для анализа данных, создаваемых калориметром, будет применяться процедура Кластеризации - создания кластеров из таблицы cells, содержащейся в AO2D-файле. Чтобы ее провести, предварительно, выполняется анализ o2-analysis-timestamp - временная разметка, заполняющая таблицу timestamps.

Он исполняется в следующей форме:

```
o2-analysis-timestamp -aod-file=AO2D.root
```

Он должен предшествовать кластеризации, поэтому для ее запуска будет нужно исполнять ее следующим образом:

```
o2-analysis-timestamp -aod-file=AO2D.root | o2-analysis-calor-clusters -b
```

Такой поток создаст таблицу, известную как clusters (и ambclusters) - то есть, размеченную таблицей триггеров и разграниченную пространственно группу сигналов с известными характеристиками (энергией и ко-



ординатой регистрации). ambclusters (ambiguous clusters) - таблица clusters, которой невозможно поставить в соответствие первичную вершину взаимодействия (то или иное столкновение - протонов или Pb-Pb) - таким образом, кластеры, например, от моделирования отклика запущенных из точки взаимодействия  $\gamma$ -квантов или  $\pi_0$ -мезонов будут храниться именно в этой таблице.

Составляющие части этих таблиц следующие:

Header file: [Common/DataModel/CaloClusters.h](#)

Is used in:

- o2::aod::CaloAMBCluster = o2::aod::CaloAmbiguousClusters::iterator

Name		Getter	Type	Comment
o2::soa::Index	GI	globalIndex	int64_t	
o2::aod::calocluster::BCId	I	bclId	int32	BC index
o2::aod::calocluster::Px		px	float	momenta components
o2::aod::calocluster::Py		py	float	
o2::aod::calocluster::Pz		pz	float	
o2::aod::calocluster::E		e	float	
o2::aod::calocluster::Module		mod	uint8_t	module/supermodule number
o2::aod::calocluster::Ncell		ncell	uint8_t	cluster multiplicity
o2::aod::calocluster::X		x	float	cluster local coordinates
o2::aod::calocluster::Z		z	float	
o2::aod::calocluster::GlobalX		globalx	float	cluster global coordinates
o2::aod::calocluster::GlobalY		globaly	float	cluster global coordinates
o2::aod::calocluster::GlobalZ		globalz	float	cluster global coordinates
o2::aod::calocluster::Time		time	float	cluster time (seconds)
o2::aod::calocluster::NLM		nlm	uint8_t	number of local maxima
o2::aod::calocluster::M02		m02	float	longer dispersion axis
o2::aod::calocluster::M20		m20	float	shorter dispersion axis
o2::aod::calocluster::TrackDist		trackdist	float	distance to closest track
o2::aod::calocluster::TrackIndex		trackIndex	uint8_t	index of closest track
o2::aod::calocluster::FiredTrigger		firedTrigger	uint8_t	Matched with trigger tile
o2::aod::calocluster::DistBad		distBad	float	distance to closest bad channel

Рисунок 3 — Содержание таблицы ambiguous cluster

Таблица в AO2D файле, содержащая Монте-карло информацию о частицах:

Is used in:

- o2::aod::McParticles = o2::aod::McParticles\_001

Name		Getter	Type	Comment
o2::soa::Index	GI	globalIndex	int64_t	
o2::aod::mcparticle::McCollisionId	I	mcCollisionId	int32	MC collision of this particle
o2::aod::mcparticle::PdgCode		pdgCode	int	PDG code
o2::aod::mcparticle::StatusCode		statusCode	int	Generators status code or physics process. Do not use directly. Use dynamic columns getGenStatusCode() or getProcess()
o2::aod::mcparticle::Flags		flags	uint8_t	ALICE specific flags, see MCParticleFlags. Do not use directly. Use the dynamic columns, e.g. producedByGenerator()
o2::aod::mcparticle::MothersIds	SAI	mothersIds		Mother tracks (possibly empty) array. Iterate over mcParticle.mothers_as<aod::McParticles>()
o2::aod::mcparticle::DaughtersIdSlice	SSLI	daughtersIds	int32_t	Daughter tracks (possibly empty) slice. Check for non-zero with mcParticle.has_daughters(). Iterate over mcParticle.daughters_as<aod::McParticles>()
o2::aod::mcparticle::Weight		weight	float	MC weight
o2::aod::mcparticle::Px		px	float	Momentum in x in GeV/c
o2::aod::mcparticle::Py		py	float	Momentum in y in GeV/c
o2::aod::mcparticle::Pz		pz	float	Momentum in z in GeV/c
o2::aod::mcparticle::E		e	float	Energy
o2::aod::mcparticle::Vx		vx	float	X production vertex in cm
o2::aod::mcparticle::Vy		vy	float	Y production vertex in cm
o2::aod::mcparticle::Vz		vz	float	Z production vertex in cm
o2::aod::mcparticle::Vt		vt	float	Production time
o2::aod::mcparticle::ProducedByGenerator	D	producedByGenerator	bool	True if particle produced by the generator (==TMCPProcess::kPrimary); False if by the transport code
o2::aod::mcparticle::FromBackgroundEvent	D	fromBackgroundEvent	bool	Particle from background event
o2::aod::mcparticle::GetGenStatusCode	D	getGenStatusCode	int	The native status code put by the generator, or -1 if a particle produced during transport
o2::aod::mcparticle::GetHepMCStatusCode	D	getHepMCStatusCode	int	The HepMC status code put by the generator, or -1 if a particle produced during transport
o2::aod::mcparticle::GetProcess	D	getProcess	int	The VMC physics code (as int) that generated this particle (see header TMCPProcess.h in ROOT)
o2::aod::mcparticle::IsPhysicalPrimary	D	isPhysicalPrimary	bool	True if particle is considered a physical primary according to the ALICE definition
o2::aod::mcparticle::Phi	E	phi	float	Phi in the range [0, 2pi)
o2::aod::mcparticle::Eta	E	eta	float	Pseudorapidity, conditionally defined to avoid FPEs
o2::aod::mcparticle::Pt	E	pt	float	Transverse momentum in GeV/c
o2::aod::mcparticle::P	E	p	float	Total momentum in GeV/c
o2::aod::mcparticle::Y	E	y	float	Particle rapidity, conditionally defined to avoid FPEs

Рисунок 4 — Содержание таблицы с монте-карло информацией о событии

Следует обратить особое внимание на локальную копию папки .ccdb - она содержит многочисленные параметры детектора, необходимые для анализа. Это можно сделать по следующей ссылке:

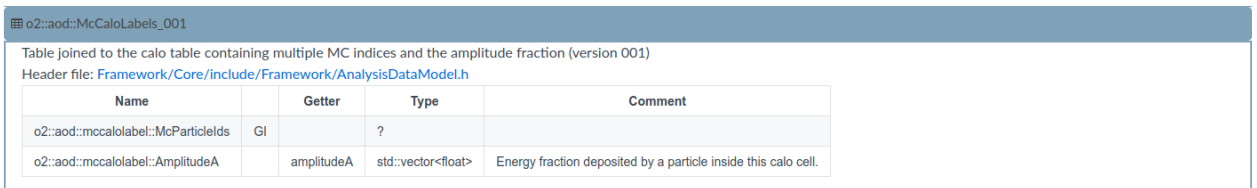
<http://alice-ccdb.cern.ch/browse>

Однако, следует отметить, что особого смысла такая процедура не имеет. Получаемые оттуда вручную файлы не являются теми материалами, которые содержат исчерпывающие сведения необходимые для анализа - можно пользоваться

Необходимо обратить внимание, чтобы использование необходимых данных окружений соответствовало используемому при реализации модели параметру, который задает timestamp - время когда "происходит" данное событие.

Далее следует отметить, что у таблицы кластеров - как тех, которые принадлежат к определенному столкновению, так и у тех, которые принадлежат к неизвестному столкновению банчей - есть специальная дополнительная таблица labels.

Она выглядит следующим образом:



o2::aod::McCaloLabels\_001

Table joined to the calo table containing multiple MC indices and the amplitude fraction (version 001)  
Header file: [Framework/Core/include/Framework/AnalysisDataModel.h](#)

Name	Getter	Type	Comment
o2::aod::mccalolabel::McParticleIds	GI	?	
o2::aod::mccalolabel::AmplitudeA	amplitudeA	std::vector<float>	Energy fraction deposited by a particle inside this calo cell.

Рисунок 5 — Содержание таблицы с монте-карло информацией о событии

Где, предварительно, первый элемент представляет номер в списке монте-карло частицы, а второй - соответствующую ей выделенную энергию.

Для работы с треками используются данные таблиц `Tracks`, `TrackExtra`, `pidTPCfullPi`, `pidTPCfullPr`, а для того, чтобы их использовать совместно, используется инструментарий `O2` в виде применимого к таблицам по сходным элементам (в данном случае - все таблицы содержат параметры треков, по аналогии, работает и с таблицей `Labels` - относящейся к кластерам) - метод `soa::Join`, позволяющий объединять для сквозной итерации однородные таблицы.

# Отбор антинейтронов и процедура вычисления их энергии

Для определения кластеров, которые появляются в результате аннигиляции антинейтронов, применяются следующие условия:

- 1) Расстояние до ближайшего трека должно быть велико (CPV)
- 2) В кластере должно быть не менее 3 (настраиваемое минимальное число) ячеек
- 3) Энергия кластера должна быть не меньше, чем 0.5 ГэВ (настраиваемое минимальное значение)
- 4) Дисперсия по более длинной оси распределения кластера должна быть не меньше  $0.2 \text{ cm}^2$  (настраиваемое минимальное значение)
- 5) Распределение между дисперсиями по большей (M02) и меньшей (M20) осям должно удовлетворять соотношению:

$$M02 > DispConst - M20$$

Где дисперсионная константа - настраиваемый параметр. Эффективно - это прямая линия на 2-мерном распределении, отсекающая область, в которой в соответствии с MC-моделирование предыдущего рана - было наибольшее соотношение между числом кластеров антинейтронов к фотонам. По умолчанию задается равной 4.

Следующим этапом следует применить таковой анализ, посмотреть на то, как будет работать такая процедура. Затем, в идеале, настроить параметры таким образом, чтобы выделить область максимального соотношения антинейтронов к фотонам, и оценить для такого отбора параметры эффективности (в данном случае - вероятности таким образом выбрать антинейтрон из числа тех, что достигли детектора) и чистоты (вероятности выбрать с помощью такого отбора другие частицы), и максимизируя оные получить желаемую величину. Для такого требуется глубокое изучение MC-данных, причем крайне желательно, чтобы их было достаточно большое количество - речь должна идти о сотнях тысяч кластеров - первый

этап настройки отборов.

Второй этап - подключить перебор треков заряженных пионов. Здесь будет работать традиционный для построения спектра при других двух-частичных распадах подход, с той лишь разницей, что параметры частиц будут определяться при помощи различных детекторов.

Наконец, третий этап - проверить отборы и реконструкцию с помощью другой частицы - антипротонов, чтобы с помощью данных дополнительно проверить гипотезу о классе отбираемых кластеров.

# МС моделирование

С помощью вторичного пакета программ O2sim были сгенерированы тестовые наборы данных. Они представляли собой 600 антинейтронов, направляемых в центр одного из модулей детектора, а также 1500 фотонов.

Направление для генерации было выбрано из соображений необходимости экономить вычислительные мощности, поскольку лишь локальная копия программного пакета содержала созданный дополнительный таск, а также позволяла контролировать актуальность различных частей.

Далее, были построены распределения для обеих выборок для параметров, по которым производятся отборы.

Когда будет создано большее количество данных - тогда будет возможность построить сравнение между ними, чтобы рассчитать оптимальные соотношения между параметрами.

Итак, исходные распределения антинейтронов и фотонов, восстановленные с помощью стандартного метода и созданного метода восстановления связи между незаряженными частицами, представляются следующим образом:

Energy spectrum of N bars according to the MC simulation

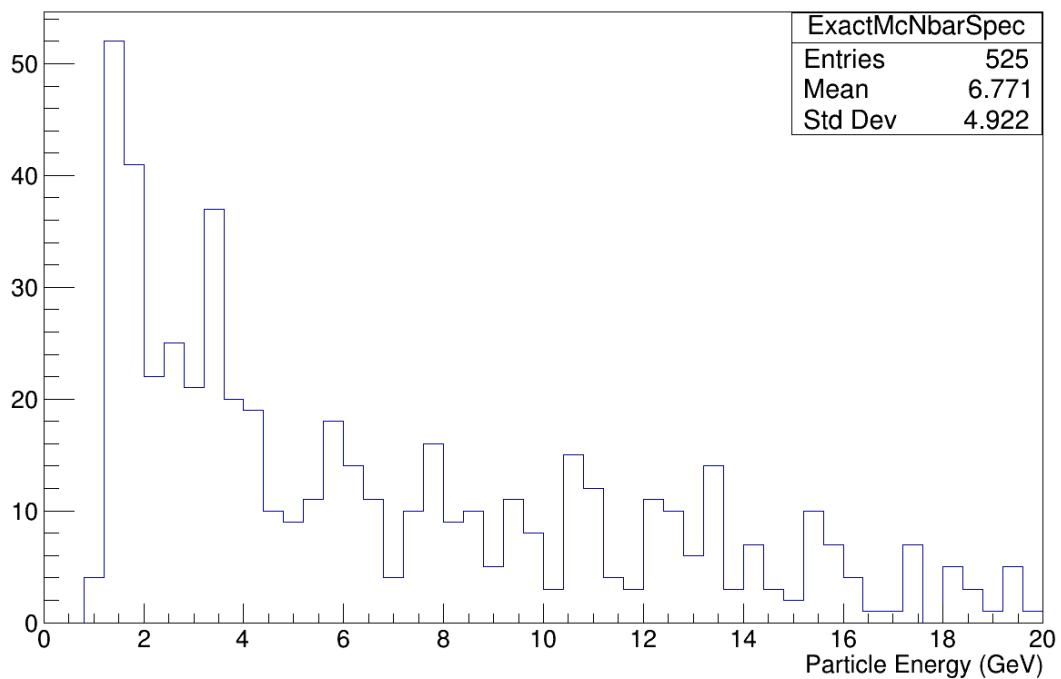


Рисунок 6 — Распределение по энергии монте-карло антинейтронов

Energy spectrum of Gamma according to the MC simulation

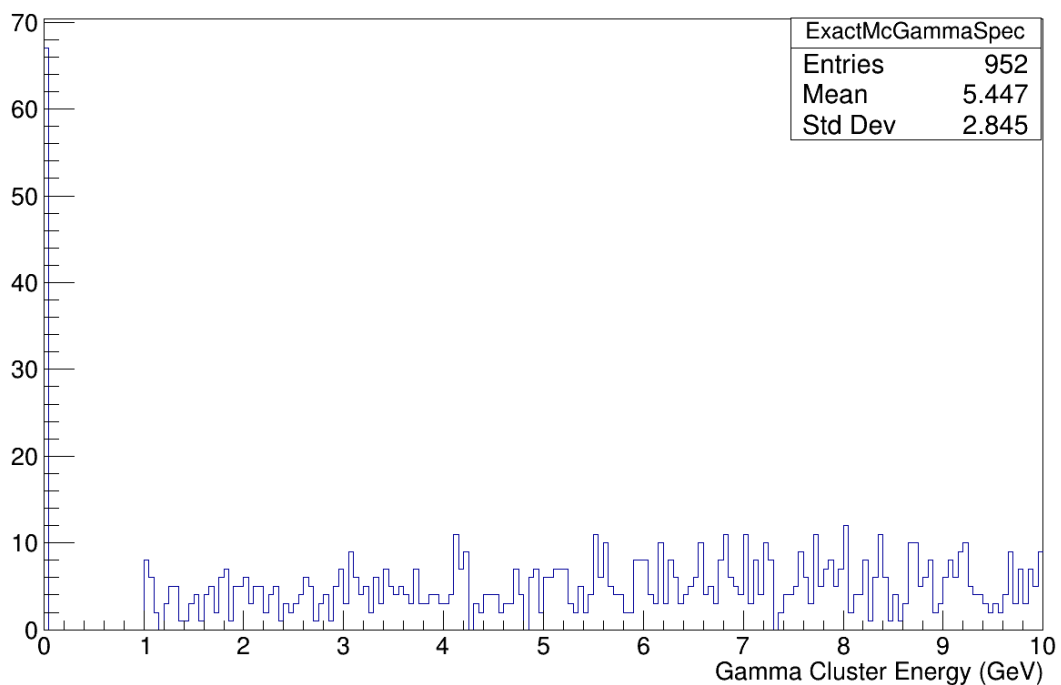


Рисунок 7 — Распределение по энергии монте-карло фотонов



Energy spectrum of N bars according to the MC simulation - using reconnection procedure

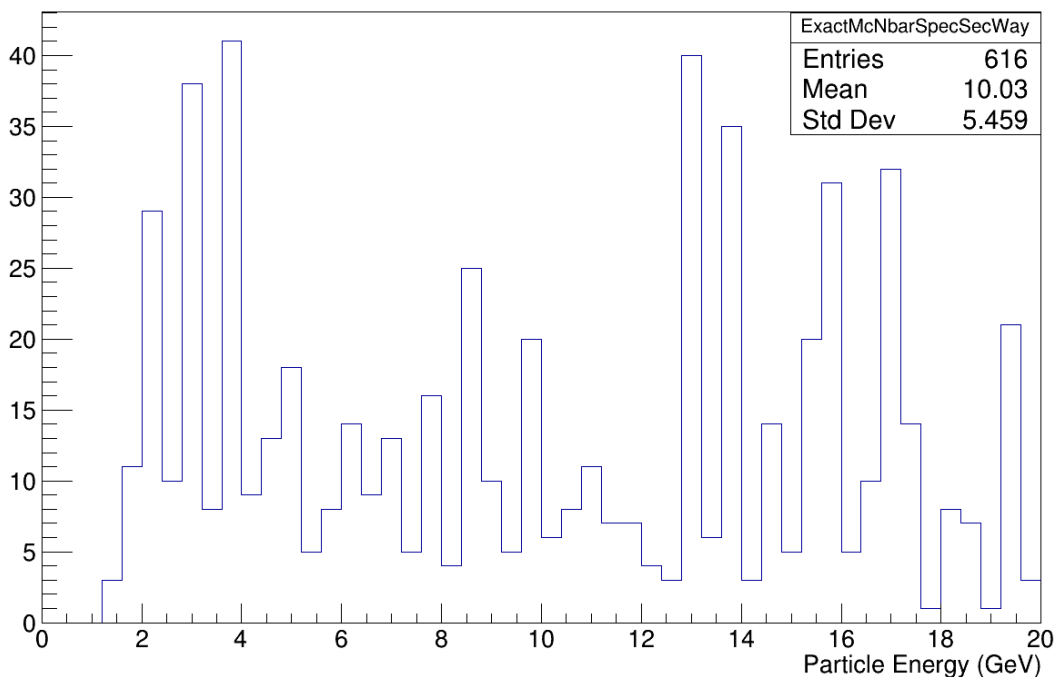


Рисунок 8 — Распределение по энергии монте-карло антинейтронов - при использовании альтернативной процедуры реконструкции

Energy deposited spectrum of Gamma according to the MC simulation - using reconnection procedure

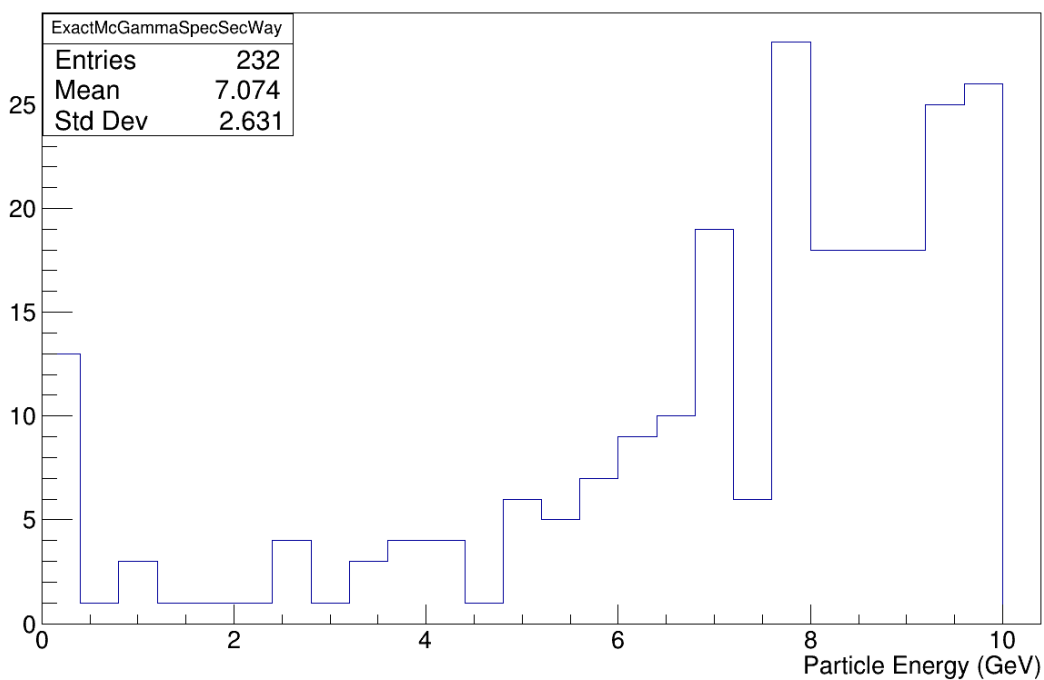


Рисунок 9 — Распределение по энергии монте-карло фотонов - при использовании альтернативной процедуры реконструкции

Тут следует отметить, что похоже, передача кластеров не в полной мере удалась: равномерность распределений не в полной мере сохранена, и если в случае фотонов - все на месте, а избыток в мягком бине - внутренние фотоны ливня, видимо, создающие паразитные кластеры, т.е. вполне может быть проблемой алгоритма кластеризации, то для антинейтронов, количество частиц в разных диапазонах совершенно не близко к заданному изначально равномерному распределению.

Что касается процедуры восстановления связи между кластером и изначальной частицы, то ее результат для антинейтронов выглядит относительно функциональным - впрочем, это лишь потому, что использован генератор `boxgen`, генерирующий одиночные частицы, и работает она скорее потому, что частицы почти не взаимодействуют до калориметра.

Для фотонов же установленная вероятность конверсии 25%, а вероятность в принципе поучаствовать во взаимодействии - еще выше. Из-за точек рождения за пределами центра, многочисленных вторичных частиц низкой энергии - примитивная процедура восстановления по импульсу МС-частиц и координатам кластера не работает.

Обе процедуры не совершенны, однако, качество работы стандартной процедуры существенно выросло - более нет ситуаций, когда энергия выделенная не зависит от спектра энергии кластеров. Последующие отборы будут настроены именно на такой процесс.

# Распределения по параметрам отбора

Первое распределение, которое следует посмотреть - это двумерное распределение по энергии кластеров и числу ячеек в кластерах. Очевидная модификация - это общий критерий в виде прямой для этого распределения, поскольку чем больше энергия, тем больше сечение рождения электрон-позитронных пар, и следовательно более широкий ливень и больше ячеек в кластере.

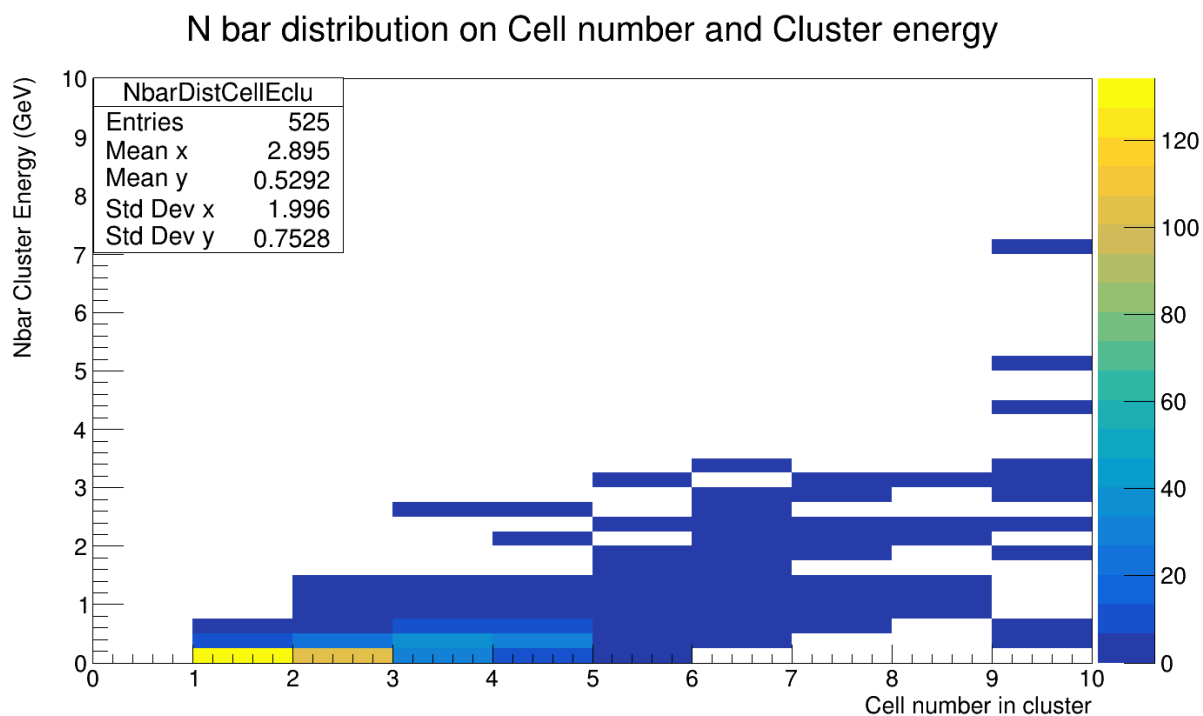


Рисунок 10 — Распределение по энергии и числу ячеек для антинейтронов

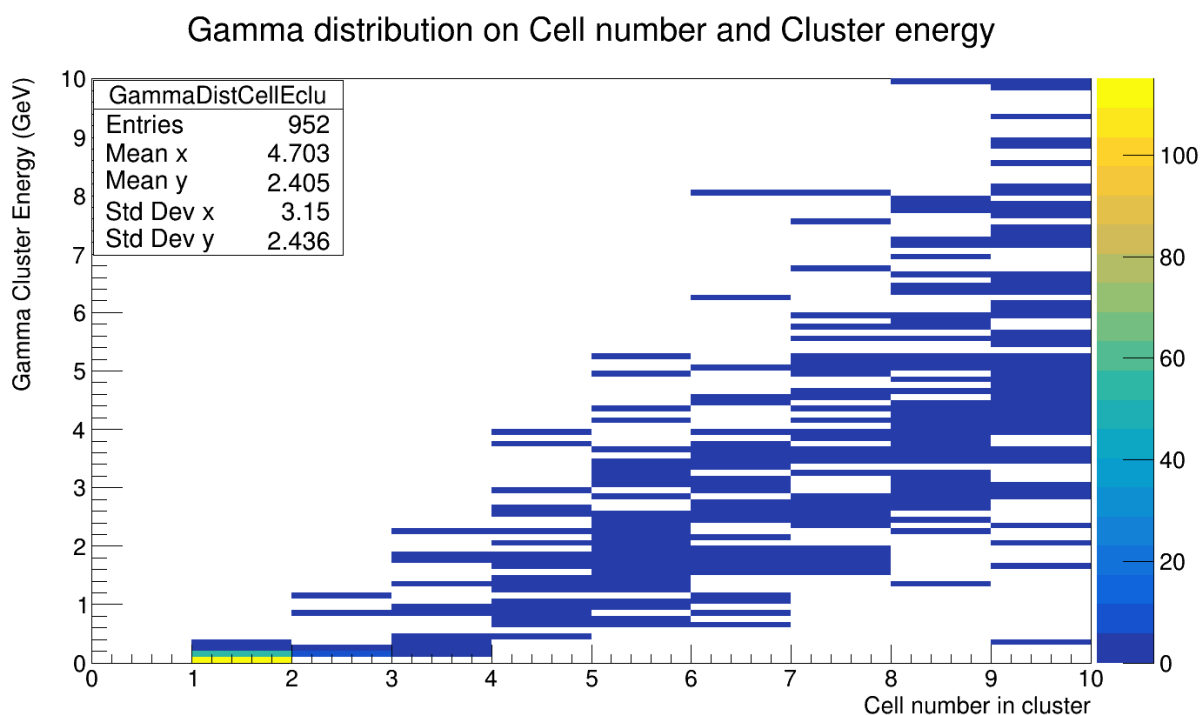


Рисунок 11 — Распределение по энергии и числу ячеек для  $\gamma$ -квантов

Несложно заметить, что распределение по этим двум параметрам для антинейтронов и вправду имеет иную форму - предположительно, следствие того, что кластеры высоких энергий для антинейтронов требуют аннигиляции, а ее вероятность равномерна на протяжении всего кристалла, следовательно, у ливня меньше пространства чтобы стать более "широким". Однако, для точного определения того, как можно провести условную линию отбора - необходима большая статистика.

Следующий важный элемент, который позволяет выбрать кластеры антинейтронов - дисперсионные характеристики. Распределение по ним представлено ниже:

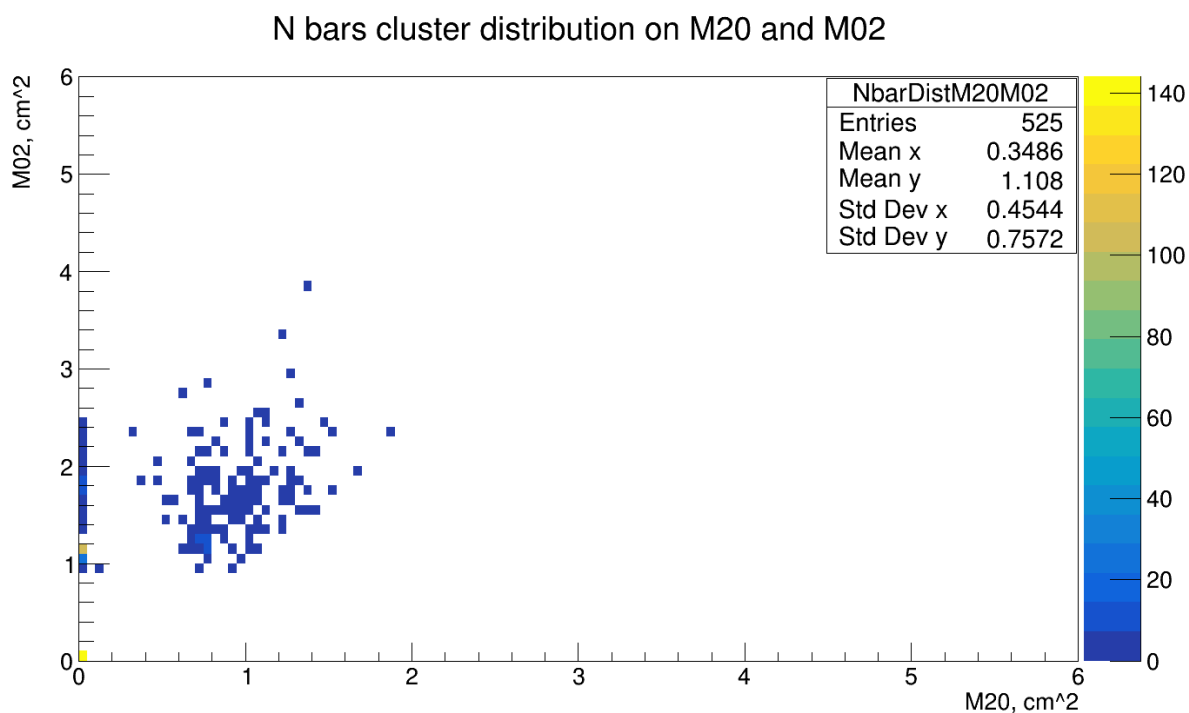


Рисунок 12 — Распределение антинейтронов по дисперсиям по двум осям кластера

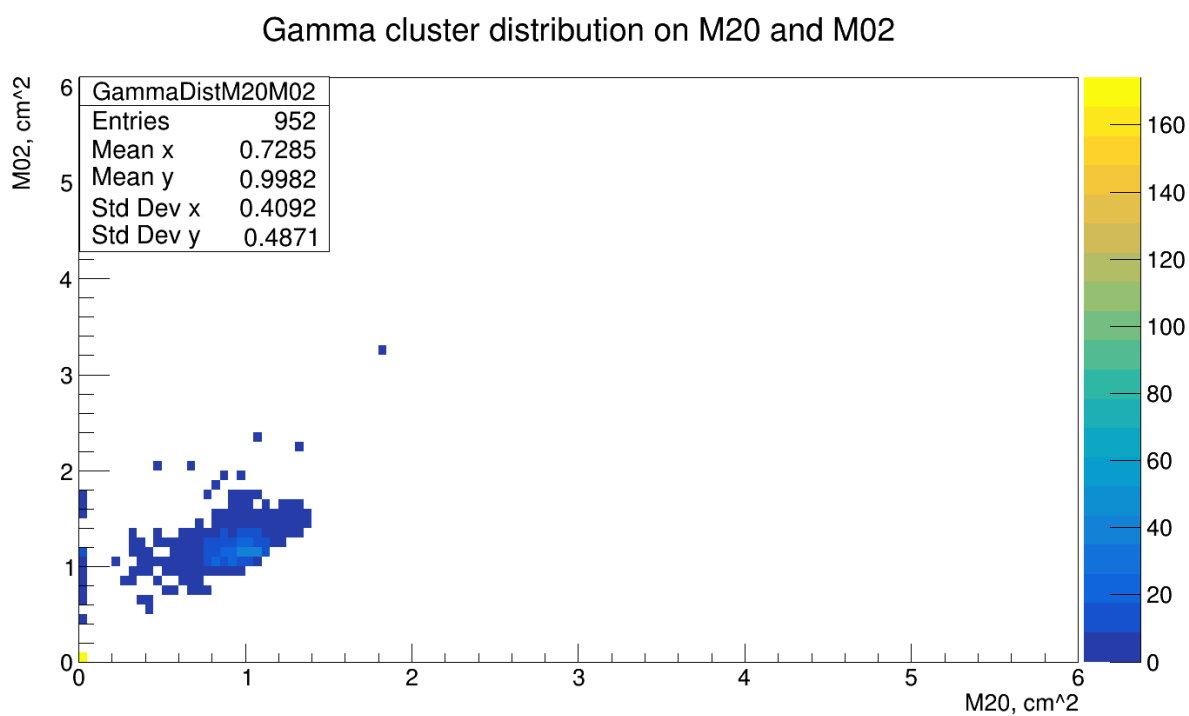


Рисунок 13 — Распределение  $\gamma$ -квантов по дисперсиям по двум осям кластера

Здесь можно заметить, что и вправду, кластеры для фотонов доста-

точно высоких энергий группируются в определенной области, тогда как распределение для антинейтронов, за пределами мягкой области, менее концентрировано, что соответствует отбору.

Однако, для того, чтобы уточнить отборы, и провести их вычисление, наиболее желательно чтобы ни один из 10 000 бинов этого двумерного распределения не был пуст. Для таких целей потребуется порядка 100 000 МС-частиц, запущенных аналогичным образом - статистика из 600 штук совершенно недостаточна. Это основная проблема.

Следовательно, теперь можно перейти к полученным результатам - спектру энергий всех кластеров, которые оставлены антинейтронами, спектру отобранных событий, и применить подобный поиск к данным, чтобы посмотреть на то, что за события в таком случае отбираются.

Energy spectrum of N bars according to the MC simulation, clu data

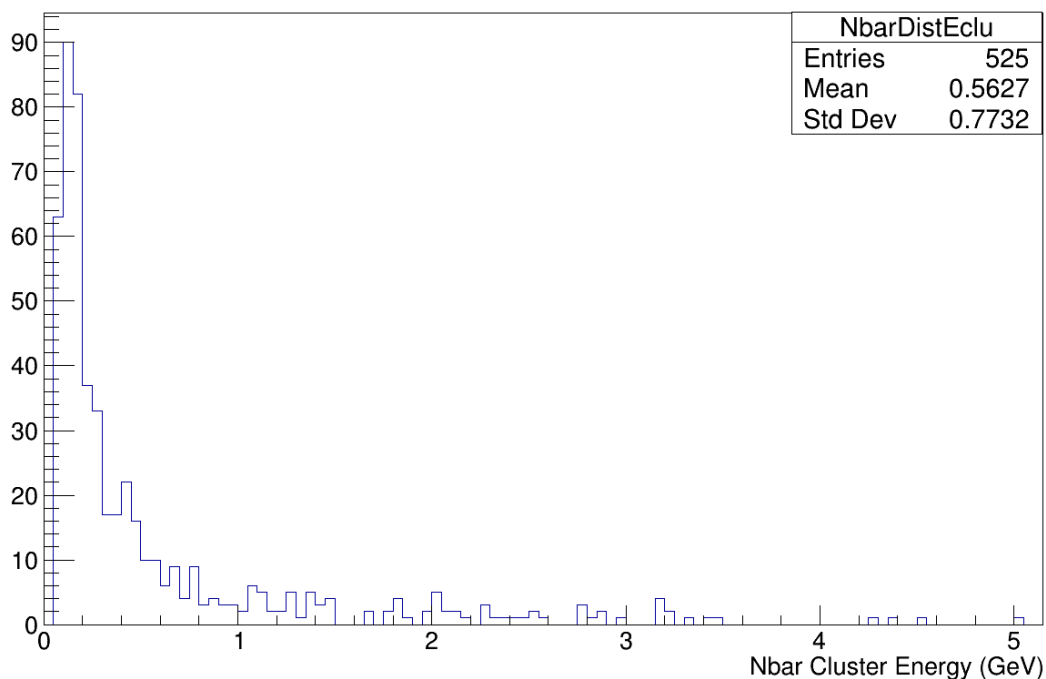


Рисунок 14 — Распределение по энергии кластеров антинейтронов

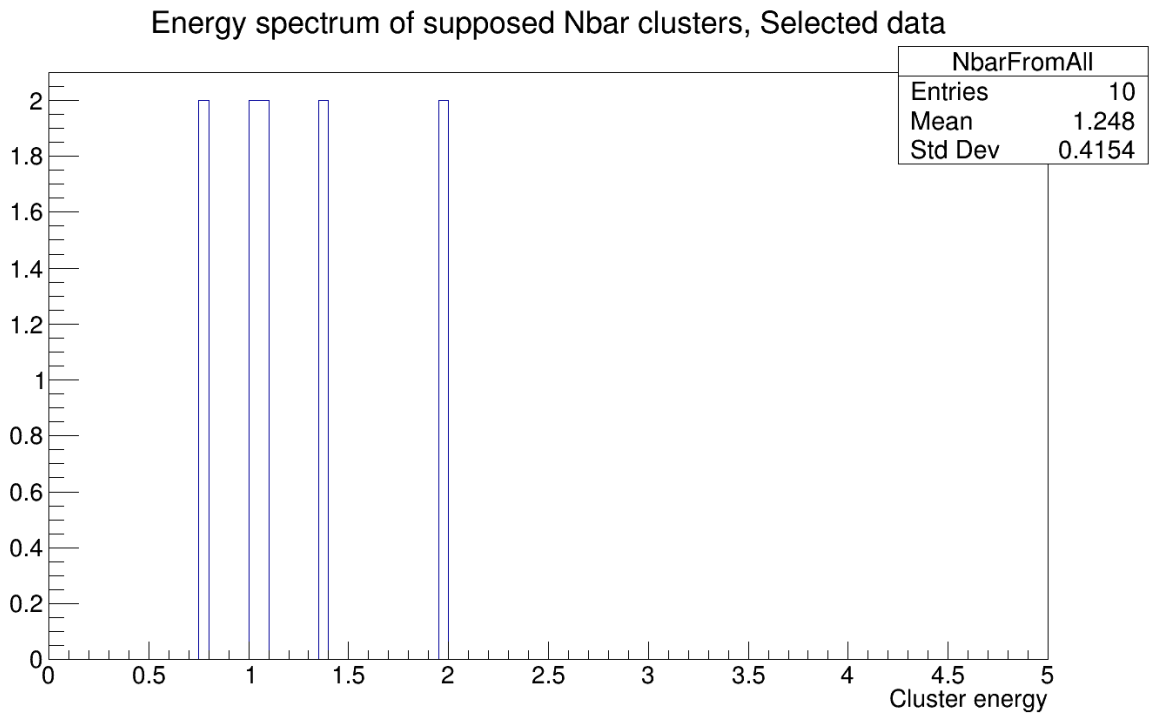


Рисунок 15 — Распределение по энергии отобранных кластеров

В данном случае, к сожалению, очевидно, что метод не отбирает с текущими способами отбора не то, что все кластеры антинейтронов, но даже их значительную часть. Эффективность не достигает не то, что 15%, а ближе к 2 - по порядку величины это, впрочем, соответствует оцениваемой с помощью ComNЕР вероятностью аннигиляции для 10 ГэВ антинейтрона, попадающего в материю. К сожалению, разрешить эту проблему могут лишь настройка отборов на большей выборке, а также использование антипротонных треков.

Наконец, следует привести то, как будет выглядеть спектр отобранных антинейтронных событий в реальных данных.

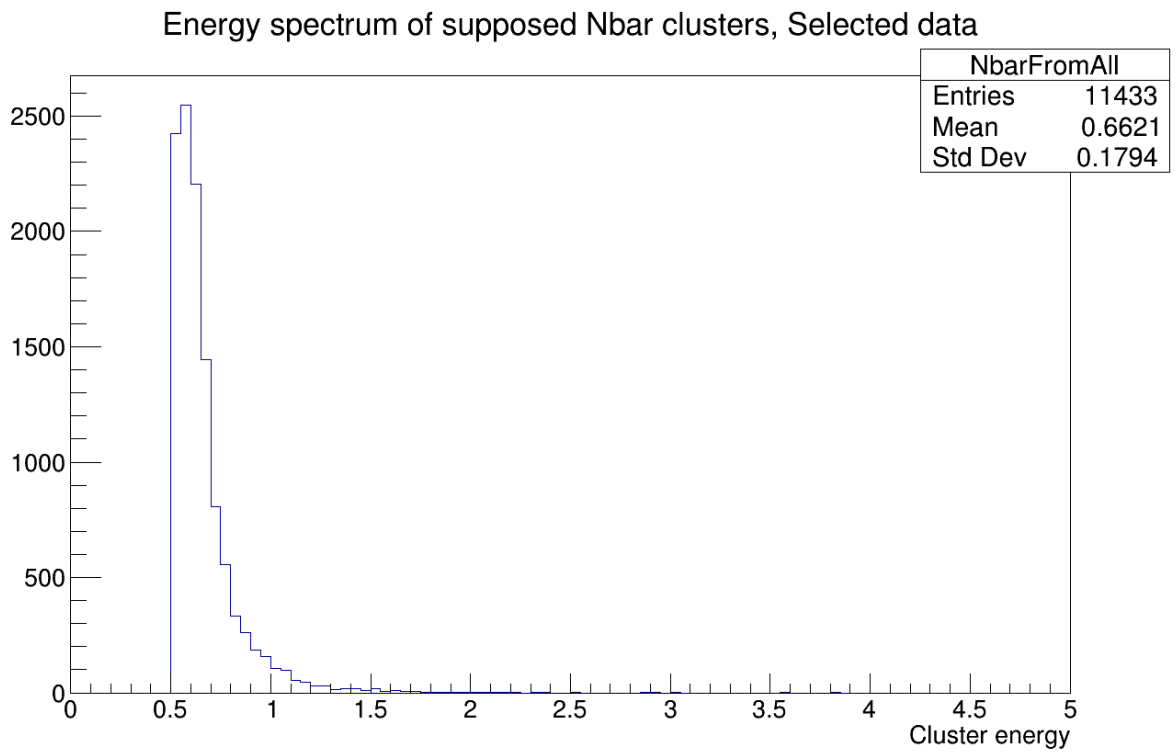


Рисунок 16 — Распределение по энергии отобранных кластеров - пример РР-столкновений при  $\sqrt{S}=14$  ТэВ



# Выводы

1. Исправленный алгоритм пропагации монте-карло параметров кластеров остается несовершенен. Возможная проблема - имплицитное подразумевание равенства индексов-номеров для таблицы McParticles и этими же номерами в GEANT4-модели.
2. Построена система отборов для поиска антинейтронов. Получено указание, как возможно будет усовершенствовать эту систему.
3. Реализована обработка данных, полученных путем монте-карло моделирования, для подбора более оптимальных отборов для частиц.
4. Реализован альтернативный геометрический способ связывать между собой кластер калориметра и Монте-карло частицы.
5. Необходимые ближайшие элементы: последовательный запуск серии генераций МС-частиц для увеличения статистики и улучшения отборов, добавление алгоритма обработки треков для восстановления родительских частиц и поиска кластеров аннигиляции антипртонов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Susmita Acharya и др. “Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment”. в: *Journal of Instrumentation* 14 (2019), P05025—P05025. DOI: [10.1088/1748-0221/14/05/P05025](https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/P05025).
- [2] Pietro Cortese и др. “ALICE electromagnetic calorimeter technical design report”. в: (2008).
- [3] Dariusz Czerwinski и др. “ALICE DCal: An Addendum to the EMCal Technical Design Report Di-Jet and Hadron-Jet correlation measurements in ALICE”. в: *CERN-LHCC-2010-011* (2010).
- [4] Dariusz Czerwinski и др. “Alice Technical Design Report of the Photon Spectrometer PHOS”. в: (1999).