

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ОТДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

В.И. Галкин

Практикум

«Моделирование основных явлений
и эксперимента в физике космоса
и физике высоких энергий»

Часть I

«Моделирование основных явлений
в физике космоса и
физике высоких энергий»

Москва
2016

УДК 539
ББК 22.38я73

В.И. Галкин

Практикум

**«Моделирование основных явлений и эксперимента
в физике космоса и физике высоких энергий»**

Часть I

«Моделирование основных явлений в физике космоса и физике высоких энергий»

Учебное пособие

В пособии изложена первая часть практического курса по моделированию явлений и процесса регистрации частиц детекторами в физике космоса и высоких энергий. Рассматриваются базовые явления: каскады в однородной среде, слоистом детекторе, блуждания нейтрона и движение заряженных частиц в дипольном магнитном поле. Практикум предназначен прежде всего для магистрантов кафедры физики космоса физического факультета МГУ, он также может быть использован в учебных и научных целях студентами, аспирантами и исследователями, специализирующимися в области физики космических лучей, космоса и высоких энергий.

©НИИЯФ МГУ

©МГУ имени М.В. Ломоносова

©В.И. Галкин

Оглавление

Предисловие автора курса	6
1 Электромагнитный каскад в однородной среде	9
1.1 Физическое введение	10
1.2 Упражнения задачи	12
1.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования	20
1.4 Формат выводных файлов	22
1.5 Сеанс моделирования	24
1.6 Представление результатов	28
1.7 Упражнения	28
1.7.1 Форма каскадной кривой	28
1.7.2 Энергетические спектры вторич- ных частиц каскада	29
1.7.3 Баланс энергии каскада на раз- ных глубинах	29
2 Электромагнитный каскад в слоистом детекторе (свинцовая РЭК)	31
2.1 Физическое введение	32
2.2 Упражнения задачи	35

2.3	Матобеспечение задачи и особенности его использования	38
2.4	Формат выводных файлов	39
2.5	Сеанс моделирования	40
2.6	Представление результатов	44
2.7	Упражнения	44
2.7.1	Форма каскадной кривой в слое детекторе	44
2.7.2	Поперечные характеристики ЭФК в РЭК	46
3	Распространение нейтрона в однородной среде (случайные блуждания)	49
3.1	Физическое введение	50
3.2	Упражнения задачи	53
3.3	Матобеспечение задачи и особенности его использования	54
3.4	Формат выводных файлов	55
3.5	Сеанс моделирования	57
3.6	Представление результатов	61
3.7	Упражнения	61
3.7.1	Характеристики блужданий нейтронов с естественным набором физических процессов	61
3.7.2	Характеристики блужданий нейтронов без захвата и распада (броуновское движение)	62
4	Движение заряженных частиц в дипольном	

магнитном поле	65
4.1 Физическое введение	65
4.2 Упражнения задачи	71
4.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования	72
4.4 Формат выводных файлов	74
4.5 Сеанс моделирования	75
4.6 Представление результатов	78
4.7 Упражнения	79
4.7.1 Проверка соотношения для пе- риода колебаний между зеркаль- ными точками	79
4.7.2 Проверка соотношения для пе- риода азимутального дрейфа . .	79
5 Приложения	81
5.1 Приложение А: некоторые команды ОС LINUX	82
5.2 Приложение Б: примеры скриптов ROOT с соответствую- щими графиками	85
5.2.1 Одномерная гистограмма	86
5.2.2 Двумерная гистограмма	88
Литература	93

Предисловие автора курса

Цель практического курса — познакомить студента с некоторыми базовыми физическими явлениями в области космической физики и смежной области физики высоких энергий, наглядно продемонстрировать процессы регистрации излучения различными детекторами, научить основам расчета характеристик космических детекторов.

Первая часть практикума рассматривает характерные для физики космоса явления: электромагнитный каскад частиц в плотной однородной и слоистой среде, распространение нейтронов в поглотителе, движение заряженных частиц в неоднородном магнитном поле. Для воспроизведения явлений используется моделирующий пакет GEANT4 [1], позволяющий увидеть детали процессов. Упражнения построены таким образом, чтобы выполняющий их студент мог продвигаться от начального (наблюдательного) уровня через промежуточный (предполагающий управление моделированием явления путем изменения его параметров) к профессиональному (требующему осознанной модификации данного моделирующего приложения и даже создания нового на его основе). Сложные упражнения первой части (задач 2 и 4) могут составить основу курсовых и дипломных работ.

Тексты моделирующих программ, соответствующих задачам, так же как и все установленное программное обеспече-

ние, доступны студентам, что позволяет им не только выполнять упражнения практикума, но и использовать готовые приложения как основу для решения их собственных физических задач.

Вторая часть практикума ориентирована на моделирование процессов взаимодействия космических явлений с детекторами и расчеты характеристик космических детекторов. Упражнения этой части используют приложения GEANT4 и CORSIKA [2], они так же различаются по уровню сложности и времени выполнения, как и упражнения первой части. Сложные упражнения второй части (сбор света в сцинтилляторе, регистрация заряженных частиц и черенковского света ШАЛ и т.п.) также могут быть взяты за основу курсовых и дипломных работ студентов кафедры физики космоса.

Каждая задача рассчитана как минимум на 12 академических часов аудиторных занятий при уровне подготовки бакалавра кафедры физики космоса физического факультета МГУ.

Поскольку реализация данного практического курса существенно зависит от состояния вычислительной техники и установленного на ней матобеспечения, это должно учитываться при записи студентов на задачи.

Задачи практикума периодически модифицируются, к ним регулярно добавляются новые упражнения. Количество доступных задач также растет. Поэтому данное печатное руководство может не вполне отражать текущее состояние прак-

тикума. Для получения свежей электронной версии данного руководства рекомендуется зайти на сайт кафедры физики космоса физического факультета МГУ (<http://andra.sinp.msu.ru/~kfk/>).

Автор благодарен рецензентам А.К. Манагадзе и Б.Ю. Юшкову за внимательное прочтение текстов обеих частей курса, что помогло сделать его лучше.

В.И. Галкин

Глава 1

Электромагнитный каскад в однородной среде

Цель — изучение характеристик электромагнитного каскада:

- каскадных кривых $N_{e,\gamma}(> E, t)$ от первичных электронов и гамма-квантов, в частности, выполнения скэйлинга в приближении А по E_0/E и универсальности каскадных кривых при измерении глубины слоя вещества в радиационных единицах;
- энергетических спектров вторичных частиц вдоль каскадной кривой;
- баланса энергии (суммы энергий гамма-квантов, электронов и позитронов и энергии, поглощенной средой);
- всех упомянутых выше величин при полном наборе элементарных процессов и при выключении некоторых из них (ионизационных потерь, комптон-эффекта, фотоэффекта, многократного/кратного рассеяния).

Возможно также расширение задачи на многомерные характеристики (пространственные, угловые, временные).

1.1 Физическое введение

Проходящие через вещество частицы взаимодействуют с атомами этого вещества. Тип взаимодействия и конкретные процессы зависят как от свойств частиц (их типа, энергии, поляризации), так и от свойств среды (массового числа A , заряда ядра Z , плотности). При разных энергиях для одних и тех же частиц актуальны разные процессы взаимодействия, что проявляется в зависимостях соответствующих сечений от энергии.

В данной задаче мы ограничимся рассмотрением электромагнитного взаимодействия двух типов частиц — гамма-квантов и электронов/позитронов (будем обозначать электроны и позитроны общим именем "электроны") в рамках очень распространенного явления электронно-фотонного (электромагнитного) каскада (ЭФК).

В широком диапазоне энергий $1 \text{ кэВ} - 1 \text{ ТэВ}$ можно считать, что никаких других частиц, кроме γ , e^- и e^+ , не возникает, энергия гамма-квантов переходит в энергию электронов, а энергия электронов — в энергию гамма-, рентгеновских и оптических квантов и внутреннюю энергию среды. Поэтому ЭФК удобен для первоначального знакомства с более сложными каскадами энергичных частиц — ядерно-электромагнитными каскадами, частями которых обязательно являются ЭФК.

При энергиях выше 1 ГэВ в первом приближении можно считать, что для электронов единственным действующим процессом является тормозное излучение (радиационные по-

тери, обусловленные столкновениями электронов с атомами среды), а для гамма-квантов — рождение e^-e^+ -пар в поле ядер среды. Первый процесс приводит к рождению гамма-квантов, с большой вероятностью имеющих энергию, сравнимую с энергией электронов-родителей. Второй процесс уничтожает гамма-квант, но дает два энергичных электрона.

В этой простой модели с распространением каскада вглубь среды число вторичных частиц лавинообразно нарастает, а их средняя энергия снижается, причем среда почти не получает энергии от каскада. В какой-то момент развития в каскаде все вторичные частицы будут иметь энергии, при которых необходимо ввести в рассмотрение другие процессы, оказывающие существенное влияние на судьбу каскада.

Для электронов это будут:

- кулоновское рассеяние,
- ионизационные потери энергии,
- аннигиляция позитронов;

для гамма-квантов:

- комптон-рассеяние,
- фотоэффект.

В первую очередь судьбу каскада определяют ионизационные потери электронов, поскольку без них каскад практически не отдает энергии среде, а только преобразует энергию электронов в энергию гамма-квантов и наоборот. Процессы рассеяния важны прежде всего для описания каскада в 3-х измерениях, но они также влияют на одномерные характеристики каскада (каскадные кривые), особенно при малых энергиях, когда значительное количество вторичных частиц

за счет рассеяния могут двигаться «назад», т.е. в сторону, противоположную направлению движения первичной частицы.

Основной одномерной характеристикой ЭФК можно считать функцию $P_i^j(E_0, E, t)$, представляющую дифференциальный энергетический спектр вторичных частиц типа $i(=\gamma, e)$ от первичных типа $j(=\gamma, e)$ с энергией E_0 в зависимости от глубины слоя вещества, пройденного каскадом. Практически чаще всего используют каскадную кривую $N_i^j(E_0, > E_{\text{пор}}, t)$, выражающуюся через $P_i^j(E_0, E, t)$ как интеграл:

$$N_i^j(E_0, > E_{\text{пор}}, t) = \int_{E_{\text{пор}}}^{E_0} P_i^j(E_0, E', t) dE',$$

где $E_{\text{пор}}$ — энергетический порог, начиная с которого мы рассматриваем вторичные частицы каскада, что чаще всего обусловлено видом функции чувствительности детекторов частиц.

Каскадную кривую можно интерпретировать как число вторичных частиц данного типа в зависимости от глубины t слоя вещества, пройденного каскадом от точки входа в вещество первичной частицы данного типа и энергии.

1.2 Упражнения задачи

Задача содержит три упражнения:

1. Форма каскадной кривой.
2. Энергетические спектры вторичных частиц каскада.
3. Баланс энергии каскада на разных глубинах.

Данные для всех упражнений обеспечиваются одним и тем же приложением GEANT4 [1], носящим имя EPC. По умолчанию приложение учитывает все процессы, существенные для развития каскада в диапазоне энергий 1 кэВ – 1 ТэВ. При необходимости (в случае углубленного изучения свойств ЭФК) набор действующих процессов можно изменить стандартными командами пользовательского интерфейса GEANT4. Базовые упражнения предполагают розыгрыш каскадов, максимально приближенный к реальности.

В упражнении 1 изучается характерное поведение каскадных кривых в области энергий, где актуально приближение А каскадной теории:

- можно ограничиться рассмотрением только процессов тормозного излучения и образования пар,
- сечения этих процессов могут быть взяты в приближении полного экранирования [3].

В реальности это означает рассмотрение каскада в ограниченном диапазоне вторичных энергий 1 ГэВ – 1 ТэВ. С одной стороны, при энергиях выше 1 ТэВ в тяжелых веществах (например, в свинце) сечение тормозного излучения и образования пар перестают зависеть только от отношения (E/E') энергий первичной и вторичной частиц из-за эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ-эффекта). С другой стороны, при энергиях ниже 1 ГэВ частицы каскадов в легких веществах (например, в углероде) приближаются к *кри-*

тической энергии¹, при которой существенную роль играют ионизационные потери электронов.

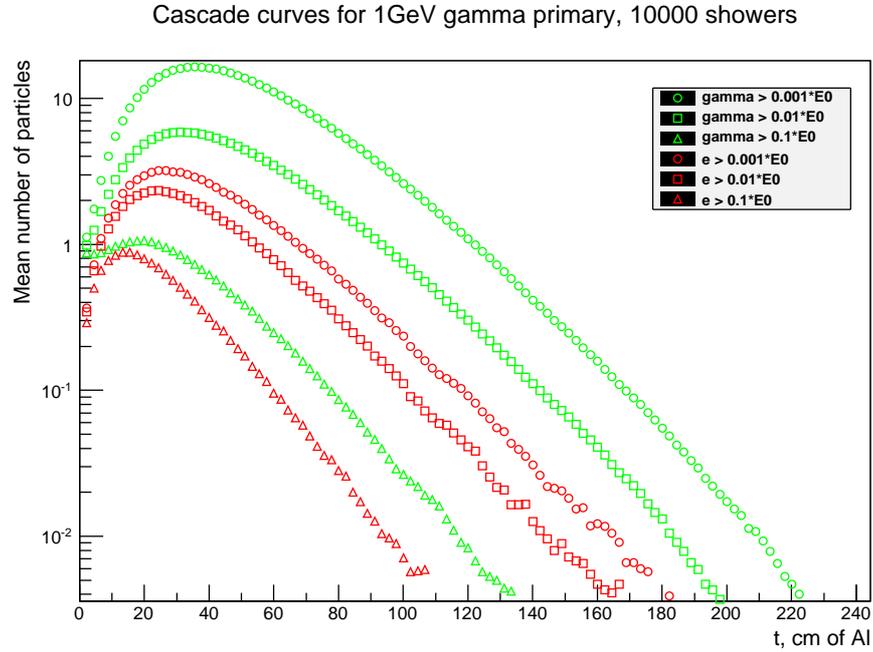


Рис. 1.1: Каскадные кривые от первичного гамма-кванта с энергией 1 ГэВ

Рисунки 1-4 показывают характерные каскадные кривые из файлов `ss`, получаемых в данной задаче.

В диапазоне 1 ГэВ – 1 ТэВ можно наблюдать скейлинговое поведение каскадных кривых по глубине развития каскада и по отношению (E_0/E) . Первый скейлинг означает, что, если глубину t в среде измерять в так называемых каскадных (радиационных) единицах, то одноименные кривые в разных веществах будут совпадать. Обусловлен такой скейлинг простотой сечений в приближении полного экранирования: в

¹Критической энергией $E_{кр}$ в данном веществе называют энергию заряженной частицы, при которой её энергетические потери на ионизацию и на излучение (радиационные потери) равны. В данном случае речь идет о критической энергии для электронов.

них можно выделить фактор, имеющий размерность длины (или толщины), который трактуется как характерный масштаб развития каскада — *каскадная единица* t_0 .

Второй скейлинг (по (E_0/E)) означает независимость формы каскадной кривой по отдельности от E_0 и порога E , форма кривой управляется (E_0/E) вследствие однородности сечений по энергии.

В первом упражнении сопоставляются каскадные кривые от одной и той же первичной частицы, с одними и теми же вторичными, для одинаковых отношений (E_0/E) и в разных веществах-поглотителях. Проверяется гипотеза существования двух видов скейлинга в диапазоне $1 \text{ ГэВ} \leq E_0, E \leq 1 \text{ ТэВ}$. При этом отношение (E_0/E) должно быть не меньше 10.

Во втором упражнении сравниваются энергетические спек-

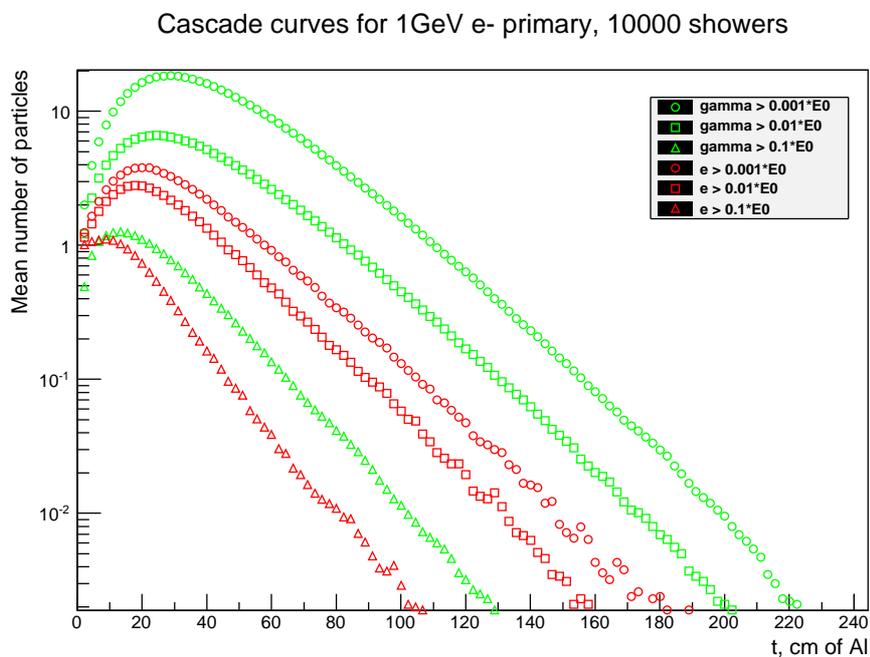


Рис. 1.2: Каскадные кривые от первичного электрона с энергией 1 ГэВ

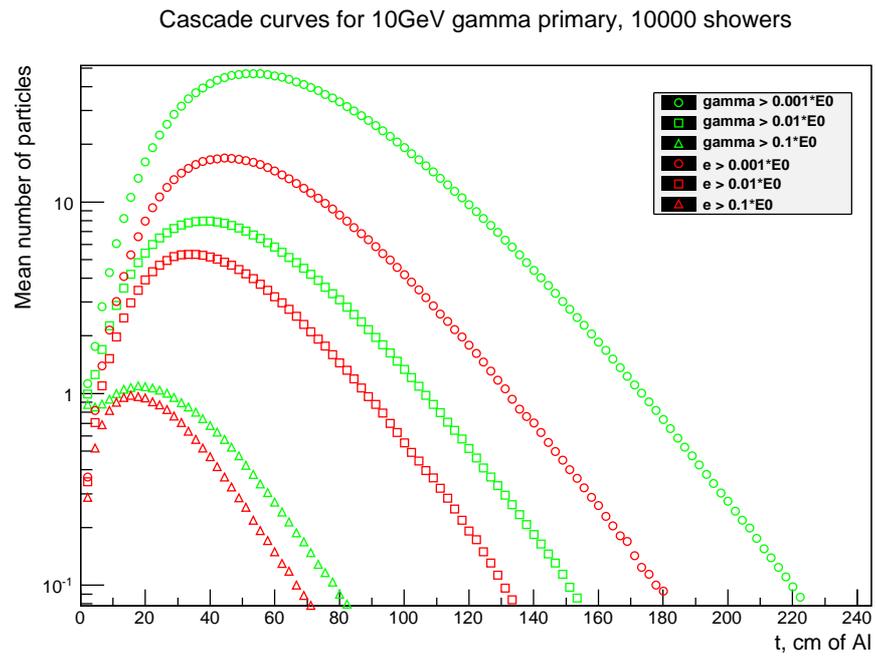


Рис. 1.3: Каскадные кривые от первичного гамма-кванта с энергией 10 ГэВ

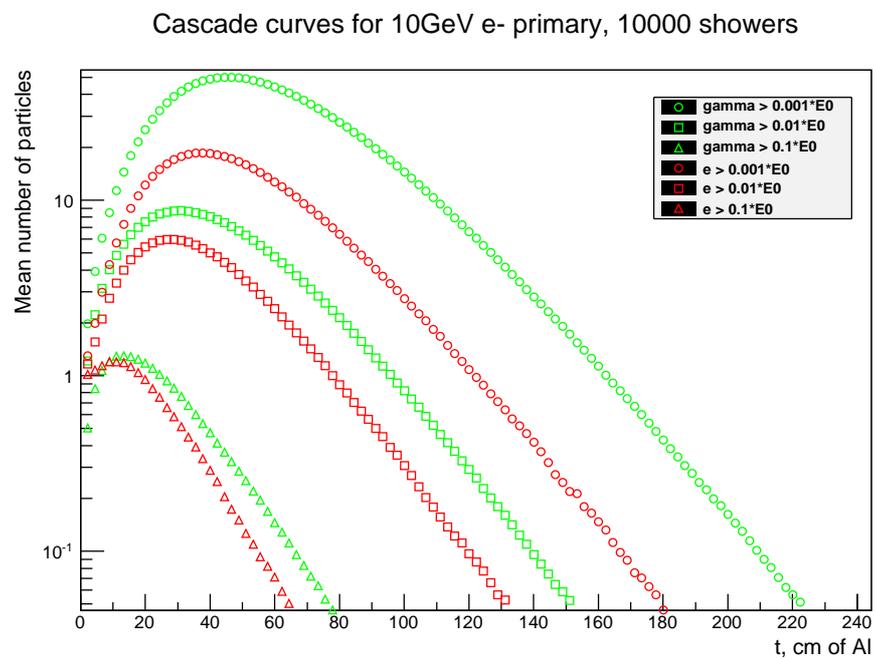


Рис. 1.4: Каскадные кривые от первичного электрона с энергией 10 ГэВ

тры вторичных частиц на разных глубинах в веществе. Первичные энергии не рекомендуется делать выше 1 ТэВ, чтобы за обозримое время порядка 1 часа можно было смоделировать достаточное количество каскадов для хорошего усреднения спектров (рис.5-6). Энергетические спектры вторичных частиц с энергиями выше критической будут иметь степенной вид $\sim E^{-s}$, причем показатель степени s будет увеличиваться (смягчение спектра) от долей единицы (на начальных стадиях развития ливня) через единицу (максимум развития ливня — максимум каскадной кривой) почти до двойки (спад каскадной кривой).

Поведение спектров вторичных при $E \lesssim E_{\text{кр}}$ обусловлено эффективной передачей энергии каскада среде с помощью механизма ионизационных потерь электронов/позитронов. Происходит вымирание электронов с энергиями $E < E_{\text{кр}}$ на масштабе одной радиационной единицы. Спектры вторичных гамма-квантов также "выедаются" на малых энергиях, т.к. низкоэнергичные электроны почти не производят гамма-квантов, а гамма-кванты низких энергий передают энергию электронам, при этом либо поглощаются (фотоэффект), либо теряют заметную долю энергии (комpton-эффект).

В третьем упражнении прослеживается энергетический баланс на разных стадиях развития каскада. В расчет на данной глубине в поглотителе принимаются:

- полная энергия всех электронов,
- полная энергия всех гамма-квантов,
- все ионпотери заряженных частиц на ионизацию за все время развития каскада вплоть до рассматриваемой глубины.

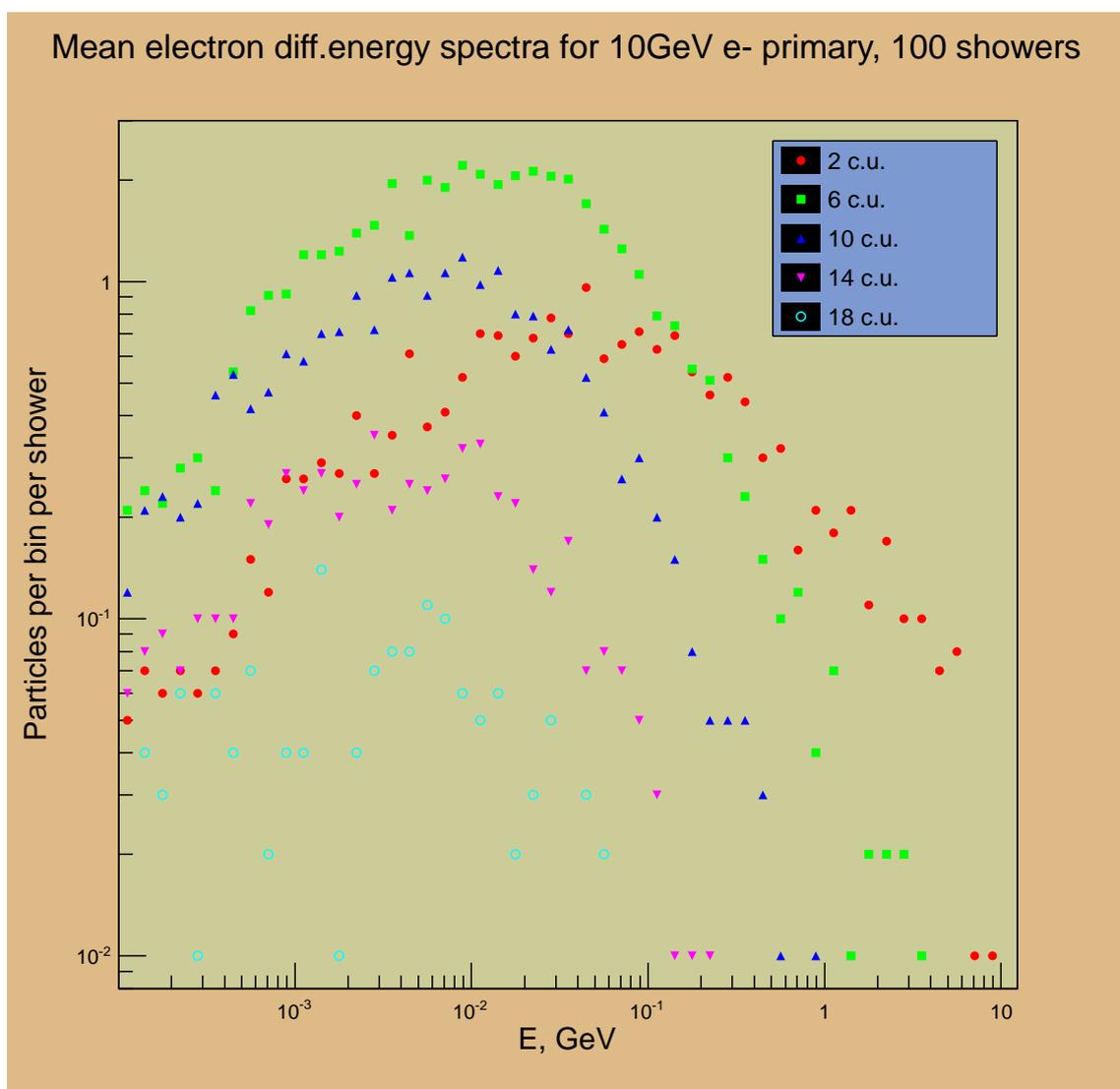


Рис. 1.5: Дифференциальные спектры электронов от первичного электрона с энергией 10 ГэВ

Сумма этих трех компонент должна равняться энергии первичной частицы с точностью до суммы масс e^-e^+ -пар, рожденных энергичными гамма-квантами в процессе развития каскада.

Каждая из этих трех компонент вычисляется на 100 глубинах в среде с шагом 0,25 р.е. (полная толщина поглотителя равна 25 р.е. для любого вещества среды). Отображение этих

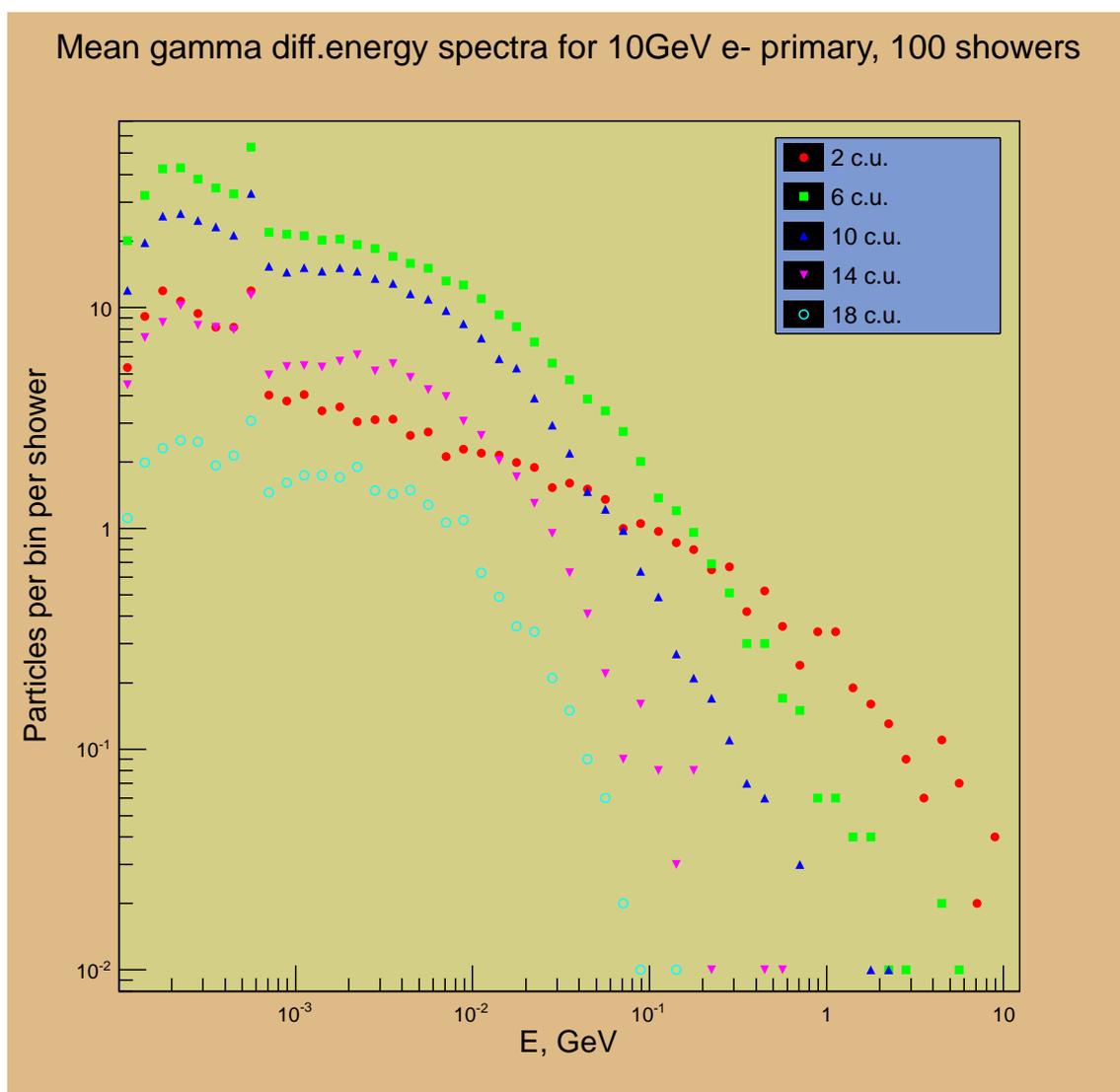


Рис. 1.6: Дифференциальные спектры гамма-квантов от первичного электрона с энергией 10 ГэВ

величин и их суммы на одном графике в зависимости от глубины (рис.7) позволяет сделать выводы как об особенностях самого явления каскада, так и о возможностях его детектирования.

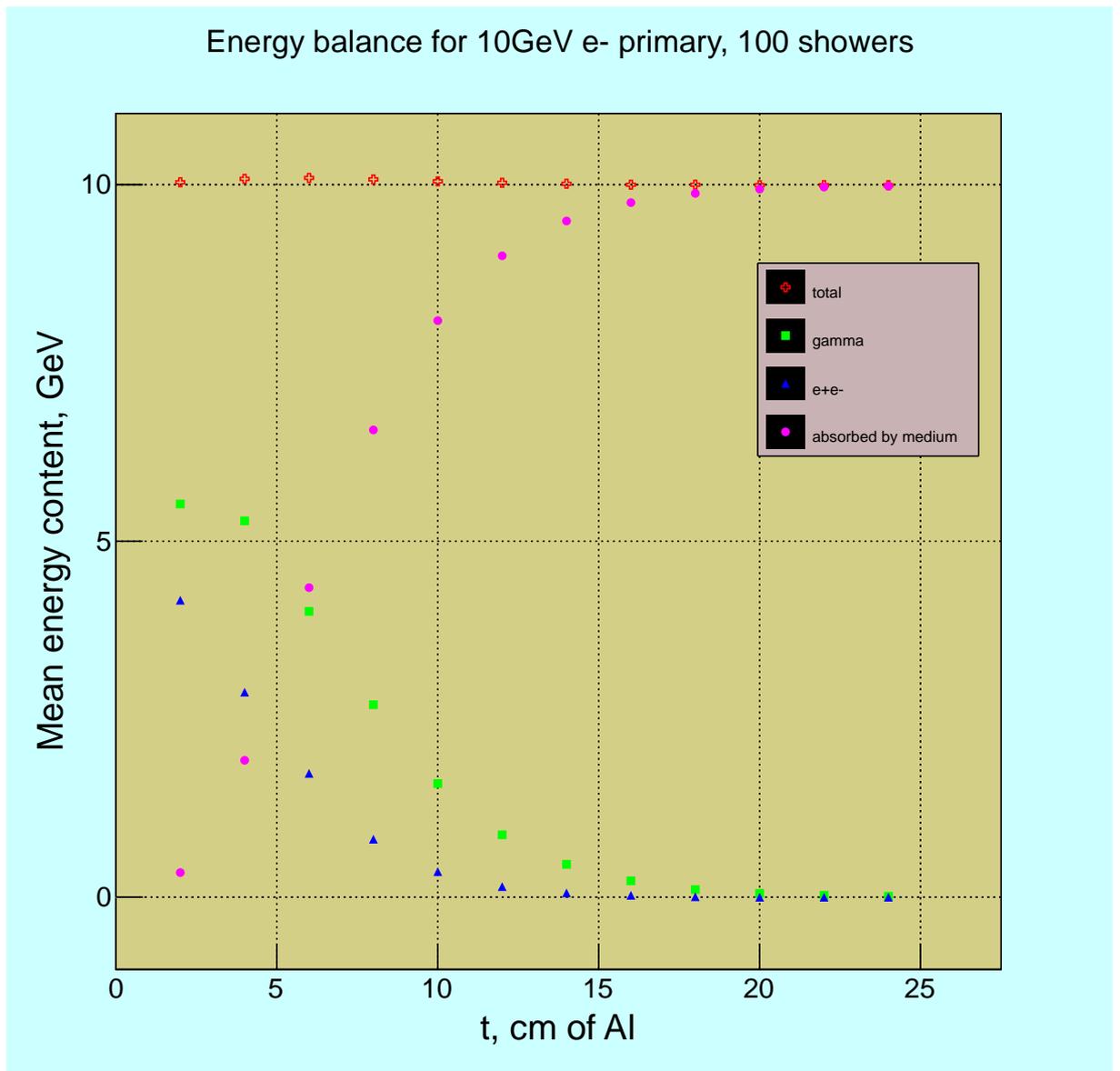


Рис. 1.7: Энергетический баланс в ливнях от первичного электрона с энергией 10 ГэВ

1.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования

Для моделирования электронно-фотонных каскадов в задаче используется специально разработанное приложение, основанное на библиотеках пакета GEANT4 [1], созданного и под-

держиваемого CERN. Для анализа и визуализации данных применяется пакет ROOT[4], также разработанный в CERN.

Эти программы работают под управлением ОС LINUX Fedora. Базовые упражнения задачи не предполагают владения студентами ни ОС LINUX, ни пакетами GEANT4 и ROOT. Для успешного их выполнения надо следовать данным ниже подробным инструкциям. Кроме того, доступны описания некоторых команд LINUX (смотрите Приложение А в конце книги), примеры командных файлов ROOT (Приложение Б) и пользовательские описания GEANT4 и ROOT.

Работа обычно сводится к запуску командных файлов, воспринимаемых LINUX как команды. При обработке данных моделирования не удастся полностью обойтись без изучения ROOT: работа предполагает модификацию образцовых командных файлов (скриптов) ROOT в соответствии с поставленной задачей. Обработка происходит в среде ROOT и требует все же некоторого понимания происходящего: какие объекты создаются, откуда поступают данные, каковы действующие опции рисования. Кроме того, внутри скриптов иногда требуется произвести некоторые преобразования исходных данных, например, перейти к другой системе координат.

Для достижения целей любого из упражнений необходимы данные одного или нескольких сеансов моделирования (run) каскадов по GEANT4. Могут быть использованы данные ранее проведенных сеансов, хранящиеся в архиве общего доступа. При отсутствии нужных данных студент должен самостоятельно провести соответствующий сеанс моделирования. В процессе сеанса происходит прослеживание развития за-

данного числа каскадов от первичных частиц заданных типа (e^- , e^+ , γ) и энергии в заданной однородной среде. В результате генерируются данные для всех упражнений задачи. По окончании сеанса выводные файлы данных должны быть переименованы так, чтобы имена включали первичную информацию. Для этого используется соответствующий командный файл с четырьмя параметрами (число каскадов, тип и энергия первичной частицы, тип среды), что минимизирует количество ошибок при переименовании.

При формировании графиков в упражнениях задачи нужно использовать имена выводных файлов, соответствующих упражнению. Например, при выполнении первого упражнения используются файлы, содержащие каскадные кривые (префикс `scurves`), во втором упражнении — файлы с энергетическими спектрами (префиксы `elspec` и `gaspec`), в третьем — файлы энергетического баланса (префикс `enbal`).

1.4 Формат выводных файлов

1. Файлы `scurves*` содержат данные по средним каскадным кривым электронов и гамма-квантов с разными порогами. Данные пишутся в 9 столбцов:

- столбец 1 — глубина в веществе в см;

столбцы 2-5 содержат электронные каскадные кривые с разными порогами, столбцы 6-9 — каскадные кривые для гамма-квантов с теми же порогами;

- столбец 2(6) — каскадная кривая с абсолютным порогом 10

МэВ;

- столбец 3(7) — каскадная кривая с порогом $0,1E_0$;
- столбец 4(8) — каскадная кривая с порогом $0,01E_0$;
- столбец 5(9) — каскадная кривая с порогом $0,001E_0$.

Файлы содержат по 100 строк по числу глубин, на которых фиксируются числа частиц.

2. Файлы `elspec*` и `gaspec*` содержат данные по средним дифференциальным энергетическим спектрам электронов и гамма-квантов, соответственно. Формат их одинаков. Данные пишутся в 13 столбцов:

- столбец 1 — центр тяжести ячейки по энергии в ГэВ;
- столбцы 2-13 — средние числа частиц в ячейке на глубинах 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 р.е.

Файлы содержат по 70 строк по числу энергетических ячеек гистограммы (логарифмический масштаб).

3. Файлы `enbal*` содержат данные о средних составляющих энергетического баланса ливня на разных глубинах. Данные пишутся в 5 столбцов:

- столбец 1 — глубина в р.е., на которой фиксируется баланс (от 2 до 24 через 2);
- столбец 2 — среднее энергетическое содержание гамма-квантов, ГэВ;
- столбец 3 — среднее энергетическое содержание электронов, ГэВ;
- столбец 4 — средняя энергия, отданная каскадом среде, ГэВ;
- столбец 5 — сумма столбцов 2, 3 и 4.

Файлы содержат по 12 строк по числу глубин, на которых фиксируется баланс.

1.5 Сеанс моделирования

Для проведения моделирования используются командные файлы `run*.mac`, задающие все необходимые для сеанса исходные данные: число событий (т.е. бросаемых первичных частиц), тип первичной частицы (e^- , e^+ , γ), энергию первичной частицы (1 ГэВ – 10 ТэВ) и вещество среды (Al, Fe, Pb, C). В качестве образца доступны несколько `mac`-файлов с разными значениями параметров, студент должен сам сделать из них нужный ему `mac`-файл. Рассмотрим пример переделки `run1000.mac` в новый файл `run1000_e-_10GeV_C.mac` (рис.1.8).

```
#
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/gun/particle gamma
/gun/energy 100.0 GeV
/run/beamOn 1000
```

Рис.1.8

Пример `mac`-файла для сеанса моделирования в пакетном режиме: `run1000.mac`

Команды `verbose` задают уровень детальности информации, посылаемой в выводной поток на разных уровнях рассмотрения (`control` — команды управления, `run` — сеанс, `event` — событие, `tracking` — трек). Объем информации нарастает при изменении значения параметра от 0 до 2 и выше. `#` означает строку-комментарий. `gun` означает ружье, стреляющее первичными частицами. Команда `/gun/particle` задает тип первичной, `/gun/energy` — кинетическую энергию первичной. `/run/beamOn` указывает число моделируемых событий. Пределаем `run1000.mac` в новый `mac`-файл для моделирования 1000 событий от первичных электронов с энергией 10 ГэВ в углероде. Команду `/run/beamOn 1000`, задающую объем выборки, равный 1000 ливней, оставим без изменения. Команду `/gun/particle gamma` заменим на `/gun/particle e-`, а `/gun/energy 100.0 GeV` — на `/gun/energy 10.0 GeV`. Перед `/run/beamOn 1000` добавим команду `/EPS/det/setmedpars 4`, задающую среду C (4), и команду `/EPS/det/update`, заставляющую принять обновление среды. Результат сохраним в файл `run1000_e-_10GeV_C.mac` (рис.1.9).

```
#  
/control/verbose 2  
/control/saveHistory  
#  
/run/verbose 2  
/event/verbose 0  
/tracking/verbose 0
```

```
#  
/EPC/det/setmedpars 4  
/EPC/det/update  
/gun/particle e-  
/gun/energy 10.0 GeV  
/run/beamOn 1000
```

Рис.1.9

Результирующий mac-файл: run1000_e-_10GeV_C.mac

По возможности объём выборки надо задавать не менее 100, иначе получаемые в упражнениях распределения (гистограммы) будут иметь сложную форму из-за недостаточного усреднения. Однако, при фиксированном абсолютном энергетическом пороге усреднение улучшается с ростом первичной энергии, поскольку растёт число вторичных частиц. Это значит, что для первичных энергий 1 ТэВ и выше мы можем позволить себе объём выборки порядка 100. Правда, при рассмотрении каскадной кривой с фиксированным отношением (E_0/E) это соображение не действует.

Время розыгрыша одного ливня растёт примерно линейно с первичной энергией, что ограничивает объёмы выборок при $E_0 \gtrsim 1$ ТэВ. Здравый смысл подсказывает, что полученные в сеансах выводные файлы надо сохранять в архивном каталоге, чтобы не моделировать одни и те же ливни много раз.

Запуск моделирования в пакетном режиме (без диалога) производится командой

```
> EPC <имя1.mac> > <имя2.out> &
```

Здесь первый знак ">" — приглашение ОС LINUX, ЕРС — имя приложения (заглавными буквами, LINUX различает строчные и прописные), <имя1.mas> — имя командного файла, задающего сеанс, второй знак ">" — признак переадресации стандартного выводного потока в файл <имя2.out>, знак "&" — признак отсоединения приложения от окна терминала, в котором оно было запущено. Последний знак не является принципиально важным, но позволяет пользоваться окном терминала для выполнения других команд LINUX во время выполнения приложения.

Так как время моделирования линейно растет с ростом первичной энергии и числа разыгрываемых каскадов, надо тщательно выбирать эти параметры. E_0 выше 10 ТэВ не стоит использовать совсем, при $E_0=1-10$ ТэВ можно обойтись выборками объемом ~ 100 ливней.

По окончании расчета надо убедиться в том, что файлы `ss`, `ea` и `eq` появились в текущем каталоге наряду с файлом <имя2.out>. Если они НЕ появились — сеанс моделирования не состоялся. При положительном исходе надо воспользоваться скриптом `srcs`, имеющим следующий формат:

```
srcs <Nc> <E0> <PT> <M>
```

Здесь <Nc> — число моделируемых каскадов, целое число без знака, <E0> — первичная энергия, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью: GeV или TeV, <PT> — тип первичной: gm, e1 или po, <M> — материал среды: Al, Fe, Pb или C. Все значения параметров должны соответствовать использованному в мас-файле, с помощью которого был осуществлен сеанс моделирования (<имя1.mas>).

Выполнение команды `cpac` с правильно указанными указанными параметрами приведет к переименованию выводных файлов `ccurves`, `elspec`, `gaspec` и `enbal` и копированию их в архивный каталог.

1.6 Представление результатов

Результаты необходимо представить в графическом виде. При сравнении для качественного анализа сопоставляемые данные должны быть изображены в одинаковых масштабах на одной паре осей. Для количественного анализа нужно использовать графики отношений или разностей сопоставляемых данных. Для анализа и визуализации данных желательно использовать пакет ROOT, установленный на компьютерах практикума.

1.7 Упражнения

1.7.1 Форма каскадной кривой

а) Рассчитать или взять из архива несколько файлов данных по каскадным кривым от одной и той же первичной частицы (γ , e^- или e^+), но с разными первичными энергиями (100 ГэВ – 1ТэВ) и для разных веществ-поглотителей.

Проверить на этих данных скейлинговое поведение каскадных кривых по глубине t и отношению $E_0/E_{\text{пор}}$.

б) Сделать то же самое на данных для другого типа первичной частицы.

в) Интерпретировать результаты.

1.7.2 Энергетические спектры вторичных частиц каскада

а) Рассчитать или взять из архива несколько файлов данных по энергетическим спектрам вторичных частиц от первичных частиц разных типов, но одинаковой энергии, для каскадов в одной и той же среде.

Сравнить поведение спектров одноименных вторичных частиц для разных первичных. Оценить доли вторичных частиц каждого типа, имеющих энергии выше и ниже критической энергии для разных глубин. Оценить доли энергии каскада, содержащиеся во вторичных частицах каждого типа, лежащих выше и ниже критической энергии для разных глубин.

б) То же самое выполнить для другой среды поглотителя.

в) То же самое выполнить для другой первичной энергии.

г) Интерпретировать результаты.

1.7.3 Баланс энергии каскада на разных глубинах

а) Рассчитать или взять из архива несколько файлов с данными по энергетическому содержанию различных вторичных (γ , $e^- + e^+$) и энергии, поглощенной средой, для разных типов первичных частиц, одной и той же первичной энергии и

одной и той же среды-поглотителя. Сопоставить глубинные профили одноименных компонент.

б) Сделать то же самое для другой среды, но той же первичной энергии.

в) Повторить пункты а) и б) для другой первичной энергии.

г) Интерпретировать результаты.

Глава 2

Электромагнитный каскад в слоистом детекторе (свинцовая РЭК)

Цель — изучение характеристик электромагнитного каскада в неоднородной (слоистой) среде и некоторых возможностей рентгеноэмульсионной камеры (РЭК).

Рассматриваются продольные и поперечные характеристики электронно-фотонного в глубокой свинцовой РЭК:

- каскадные кривые от первичных частиц разного типа (e^- , e^+ , γ) и разных энергий;
- поперечные распределения электронов.

В рамках специальных упражнений возможно рассмотрение распределений потемнений в отдельных чувствительных слоях, воспроизводящее в общих чертах методику обработки событий в реальных РЭК.

Геометрия РЭК (толщина чувствительных слоев и размер зазоров между слоями поглотителя и чувствительными слоями) может быть изменена специальными командами, что позволяет анализировать не только работу РЭК, но и ионизационного калориметра с электронным съемом данных, например, сцинтилляционного.

2.1 Физическое введение

Развитие каскада частиц в неоднородной среде имеет свои особенности по сравнению с аналогичным каскадом в однородной среде (глава 1). В данной задаче рассматривается важный частный случай неоднородной среды — слоистый поглотитель. Такого рода неоднородные структуры характерны для многих детекторов физики космических лучей и высоких энергий. Типичными примерами являются эмульсионные камеры, в которых плоские слои поглотителя проложены листами рентгеновских или ядерных пленок, и ионизационные калориметры, где вместо пленок используются сцинтилляторы, черенковские радиаторы, полупроводниковые пластины и другие детекторы ионизации (рис.1).

Возможны и более сложные структуры плоско-параллельной геометрии. Развитие каскадов в детектирующих конструкциях такого типа обнаруживает общие черты, которые можно наблюдать и количественно исследовать на сравнительно простой модели электронно-фотонного каскада. Различие радиационных единиц и критических энергий разных слоев поглотителя и чувствительных слоев приводит к заметным различиям кривых в двух средах, что может привести к систематическим ошибкам, если эти различия игнорировать.

Например, если поглотителем является свинец ($E_{кр}=7,43$ МэВ), зазор заполнен воздухом ($E_{кр}=88$ МэВ), а чувствительный слой состоит из легкого вещества ($E_{кр}=40-100$ МэВ), то выход частиц из свинца должен понижать каскадную кривую за счет ионизационных потерь электронов, которые в свинце

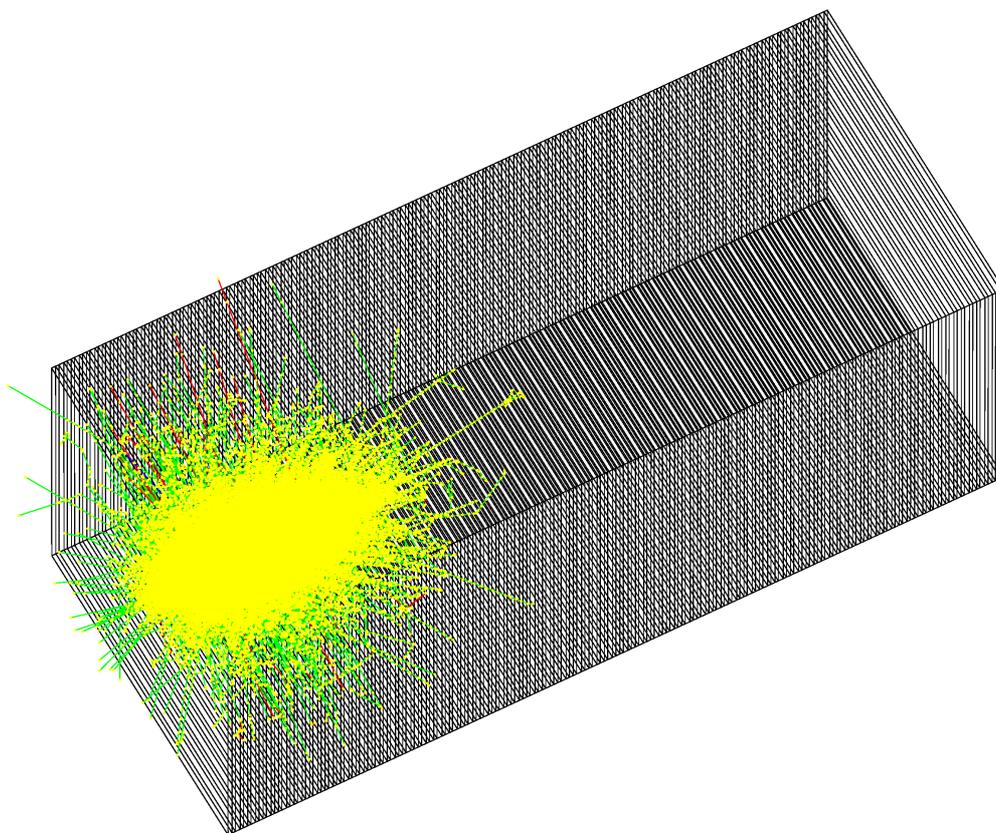


Рис. 2.1: Общий вид слоистого детектора, в котором развивается каскад от первичного электрона с энергией 100 ГэВ.

имели энергии выше критической, а в зазоре и чувствительном слое будут иметь энергии ниже критической (ионизационные потери у них будут преобладать над потерями радиационными).

Эффект понижения каскадной кривой в зазоре/чувствительном слое (рис.2) будет тем сильнее, чем больше зазор и/или чувствительный слой. Если не учитывать этот эффект при обработке данных РЭК или калориметра, это может сказаться на оценке энергии каскада, поскольку энергия обычно оценивается по точкам каскадной кривой, измеренной в чув-

ствительных слоях, путем их аппроксимации средней каскадной кривой для некоторой E_0 в основном поглотителе (т.е. в свинце). Это приведет к систематической недооценке E_0 , т.к. реальная каскадная кривая в свинце будет идти в среднем выше.

Чтобы учесть эффект, достаточно смоделировать прохождение каскадов с характерными E_0 через РЭК/калориметр с реальной геометрией эксперимента, сравнить каскадные кривые в свинце и чувствительных слоях и вычислить поправки к E_0 ¹.

РЭК обладают пространственным (поперечным) разрешением ~ 1 мм, что делает их удобным инструментом для изучения ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Методика таких исследований очень сложна из-за огромного числа факторов, влияющих на эксперимент. Данная задача позволяет прикоснуться к основам этой методики — получить поперечные характеристики электронно-фотонного каскада. Возможна постановка и более сложной задачи распознавания и обработки отдельных пятен потемнения (высокой плотности частиц) на фоне друг друга и на собственном фоне эмульсии.

¹Более разумное решение: обработка данных любого сложного детектора должна основываться на детальном моделировании всех существенных явлений, а не на средних характеристиках для простого однородного случая.

2.2 Упражнения задачи

Задача включает два базовых упражнения:

1. Форма каскадной кривой в слоистом детекторе.
2. Поперечные характеристики ЭФК в РЭК.

Mean electron c.s. in Pb XREC for 100 GeV e- primary, 30 showers

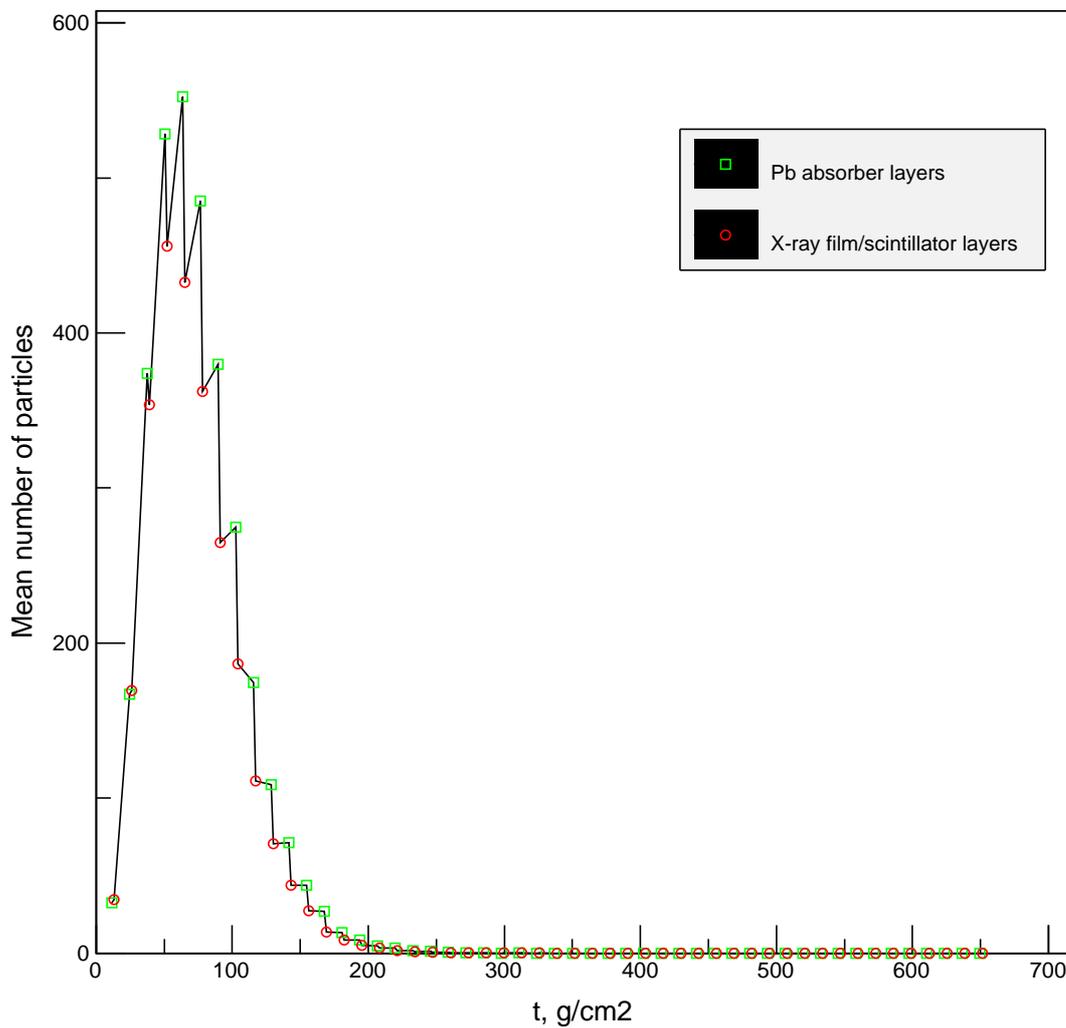


Рис. 2.2: Средние каскадные кривые электронов от первичного электрона с энергией 100 ГэВ в слоистом детекторе. Зеленые квадратики представляют число вторичных электронов в слоях свинца, а красные кружочки — в чувствительных слоях.

В первом упражнении анализируются особенности формы каскадной кривой в среде, образованной плоско-параллельными слоями трех различных веществ (свинец + воздух + пластик), перпендикулярными оси каскада. Слои имеют существенно различные радиационные единицы и критические энергии, что при больших размерах зазора/толщинах чувствительных слоев детектора, состоящих из легкого вещества, приводит к локальным немонотонностям каскадной кривой (рис.2).

Количественное исследование немонотонностей (локальных спадов и подъемов, обусловленных неоднородностями среды, а вовсе не флуктуациями каскадов) предполагает проведение моделирования каскадов в слоистом детекторе с одним и тем же сочетанием веществ поглотителя и сенсора (чувствительного слоя), но с разными геометриями. Логично рассматривать всегда одни и те же размеры слоев поглотителя и разные размеры зазоров между поглотителем и сенсором. Можно также варьировать толщину чувствительных слоев. В качестве величины эффекта можно использовать отношение числа вторичных частиц в некотором слое сенсора к числу частиц в предыдущем слое поглотителя при разном размере зазора или это же отношение, усредненное по группе пар "слой поглотителя – слой сенсора".

Во втором упражнении рассматриваются послойные карты событий в слоистом детекторе. Если анализировать поперечные плотности вторичных частиц на масштабах десятков микрометров, а затем сшивать следы одних и тех же каскадов в различных слоях, получится некое подобие рентгеноэмulsionной методики, используемой для исследования сильного

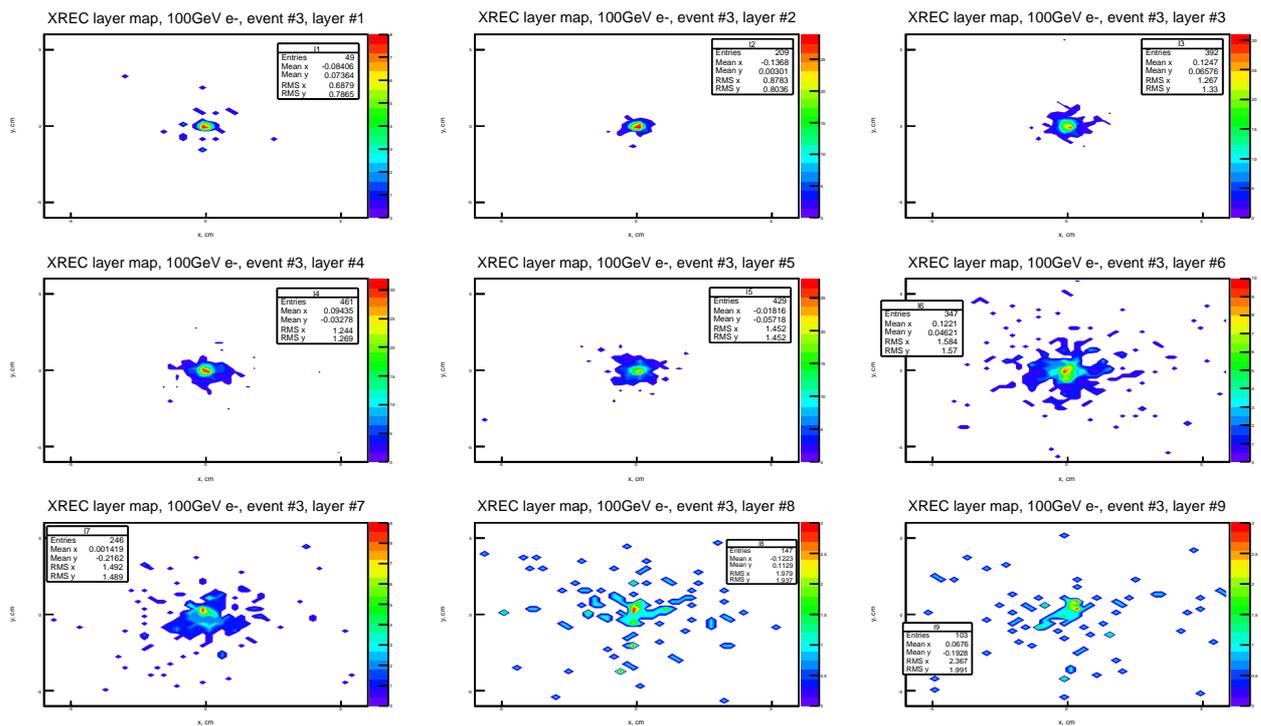


Рис. 2.3: Послойные карты плотности вторичных электронов в одном каскаде от первичного электрона с энергией 100 ГэВ в слоистом детекторе.

взаимодействия при сверхвысоких энергиях. Реальная методика учитывает огромное количество физических и технических факторов и не может быть воспроизведена в учебных упражнениях. Здесь мы ограничиваемся некоторыми простыми оценками пространственного (поперечного) распределения вторичных частиц ЭФК в целом и отдельных его подкаскадов.

Мерой поперечного распределения частиц ЭФК является *мольеровская единица* r_m , характеризующая среднеквадратический радиус поперечной плотности частиц:

$$r_m = t_0 E_s / E_{кр} ,$$

где t_0 — радиационная единица, $E_s = 21$ МэВ, $E_{кр}$ — критическая энергия.

Студенту предлагается оценить r_m в свинце (поскольку именно в свинце преимущественно развивается каскад) по поперечным распределениям вторичных электронов в чувствительных слоях вблизи максимума средней каскадной кривой.

В качестве более трудной задачи предлагается поиск отдельных подкаскадов в нескольких чувствительных слоях и определение направлений их осей. Первичные частицы всех искусственных событий падают в центр детектора параллельно его оси.

2.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования

Программа для моделирования ЭФК в слоистом детекторе XREC является приложением GEANT4 и выполняется под ОС LINUX Fedora. Стандартное использование приложения не требует знания GEANT4 и ОС LINUX, нужно лишь выполнять приведенные ниже инструкции. В базовых упражнениях обработка данных моделирования ведется с помощью аналитического пакета ROOT. Студент должен самостоятельно написать командные файлы ROOT (на языке C++) на основании образцовых C-файлов, приведенных в приложении Б.

При выполнении продвинутых упражнений наряду с использованием ROOT студенту может потребоваться создать отдельную обрабатывающую программу, выводные файлы которой могут быть в итоге визуализированы с помощью ROOT.

Для выполнений упражнений задачи необходимы данные как минимум одного сеанса моделирования каскадов в слоистом детекторе с помощью приложения XRES. Один сеанс моделирования обеспечивает получение выборки каскадов заданного объема от первичных частиц одного типа и энергии в детекторе заданной геометрии, при этом генерируются выводные файлы данных, используемые в обоих базовых упражнениях задачи. В каждом сеансе создаются два выводных файла (не считая протокола): `xres_ccurves`-файл с информацией о каскадной кривой и `xres_maps`-файл с данными о точках пересечения заряженными частицами чувствительных слоев. По окончании сеанса эти файлы должны быть скопированы в архив специальной командой.

Возможно выполнение упражнений и без проведения моделирования при наличии всех необходимых данных в архиве общего пользования.

2.4 Формат выводных файлов

1. Файлы `xres_ccurves*` содержат данные по средним каскадным кривым электронов как в слоях поглотителя (Pb), так и в чувствительных слоях. Данные пишутся в 5 столбцов:

- столбец 1 — номер блока "поглотитель/сенсор";
- столбец 2 — глубина в г/см^2 , на которой число частиц фиксируется в свинце;
- столбец 3 — среднее число электронов в свинце;

- столбец 4 — глубина в г/см^2 , на которой число частиц фиксируется в чувствительном слое;
- столбец 5 — среднее число электронов в чувствительном слое.

Файлы содержат по 50 строк по числу блоков "поглотитель/сенсор" в слоистом детекторе.

2. Файлы `xrec_maps*` содержат данные об отдельных частицах во всех чувствительных слоях в каждом событии. Данные пишутся в 6 столбцов:

- столбец 1 — номер события;
- столбец 2 — номер чувствительного слоя;
- столбец 3 — координата x в см относительно оси ливня (=оси детектора);
- столбец 4 — координата y в см относительно оси ливня (=оси детектора);
- столбец 5 — координата z в см относительно центра детектора;
- столбец 6 — кинетическая энергия электрона в МэВ.

Число строк в файлах переменное, оно зависит от типа и энергии первичной частицы и числа событий.

2.5 Сеанс моделирования

Для моделирования используются заранее подготовленные командные файлы `run*.mac`, задающие все необходимые исходные данные: число событий (число бросаемых первичных частиц), тип первичной частицы (e^- , e^+ , γ), кинетическая энер-

гия первичной частицы, толщина зазора между поглотителем и чувствительным слоем, толщина чувствительного слоя. Ответственность за подготовку mac-файлов лежит на студенте: требуется переделать образцовый mac-файл, изменив/убрав/добавив в него несколько команд.

На рис.4 показан командный файл `run100.mac`.

```
#
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/XREC/det/setGapSize 4 mm
/XREC/det/update
#
/gun/particle e-
/gun/energy 10.0 GeV
/run/beamOn 100
#
```

Рис.2.4

Пример mac-файла для сеанса моделирования в пакетном режиме: `run100.mac`

Переделаем его в файл `run100_gamma_100GeV_gap1mm_s100um.mac`, задающий моде-

лирование 100 ливней от γ -квантов с энергией 100 ГэВ в в РЭК с толщиной сенсоров 100 мкм и шириной зазоров 1 мм. Толщина слоёв поглотителя (свинца) задана явно в коде приложения и составляет 1 см. Число пар слоев поглотителя и сенсора равно 50, оно также задано внутри кода.

Для установки нужного размера зазора изменим параметр 4 mm команды `/XREC/det/setGapSize` на 1 mm. Чтобы установить требуемую толщину чувствительного слоя, напишем новую команду `/XREC/det/setSensorSize 0.1 mm` перед командой `/XREC/det/updateset`. Изменим параметр `e-` команды `/gun/particle` на `gamma`, что установит нужный тип первичной частицы. Замена параметра 10.0 GeV команды `/gun/energy` на 100.0 GeV установит требуемую первичную кинетическую энергию. Команду `/run/beamOn 100`, задающую число моделируемых каскадов, равное 100, оставим без изменения. В результате получаем искомый командный файл (рис.5).

```
#
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/XREC/det/setGapSize 1 mm
/XREC/det/setSensorSize 0.1 mm
/XREC/det/update
```

```
#  
/gun/particle gamma  
/gun/energy 100.0 GeV  
/run/beamOn 100  
#
```

Рис.2.5

Результирующий mac-файл:

```
run100_gamma_100GeV_gap1mm_s100um.mac
```

Объем выборки N_c и первичная энергия E_0 определяют время моделирования: оно растет примерно пропорционально этим параметрам. Моделирование одного каскада с энергией 1 ТэВ составляет 10-20 секунд. Надо выбирать N_c и E_0 таким образом, чтобы время сеанса не превышало 2-3 часов. Не имеет смысла повторять моделирование для наборов параметров, для которых уже имеются выборки в архиве общего пользования.

Запуск сеанса моделирования в пакетном режиме производится командой:

```
> XREC <имя1.mac> > <имя2.out> &
```

Здесь первый знак ">" есть приглашение системы, XREC — имя приложения (прописными буквами), <имя1.mac> — имя командного файла, второй знак ">" — признак переадресации стандартного выводного потока в файл <имя2.out>, знак "&" — признак отсоединения приложения от окна терминала.

По окончании расчета надо убедиться в том, появились ли файлы `xrec_ss` и `xrec_map` в текущем каталоге наряду с файлом <имя2.out>. Если их нет, сеанс не состоялся. Если они есть, их надо переименовать и сохранить в архиве с помощью

команды `srarx` следующего формата:

```
srarx <Nc> <E0> <PT> <gap> <sens>
```

Здесь `<Nc>` — число моделируемых каскадов, целое число без знака, `<E0>` — первичная энергия, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью: `GeV` или `TeV` (без пробела между значением и единицами), `<PT>` — тип первичной: `gm`, `e1` или `po`, `<gap>` — толщина зазоров, положительное число (возможна десятичная точка) с размерностью: `mm` или `cm`, `<sens>` — толщина чувствительного слоя, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью: `mm` или `cm`.

Все значения параметров должны соответствовать использованному в `mac`-файле, с помощью которого был осуществлен сеанс моделирования (`<имя1.mac>`).

2.6 Представление результатов

Смотрите 1.6.

2.7 Упражнения

2.7.1 Форма каскадной кривой в слоистом детекторе

а) Смоделировать или взять из архива несколько файлов данных по каскадным кривым от одной и той же первичной ча-

стицы (γ , e^- или e^+) и для одинаковых геометрий детектора, но для разных первичных энергий ($E_0 \geq 1$ ТэВ, с небольшим объемом выборок). Оценить по средним каскадным кривым предельную первичную энергию, при которой каскад заканчивается в пределах свинцового поглотителя толщиной 15, 20, 30 см. Критерием окончания каскада считать спад средней каскадной кривой в 100 раз по отношению к максимуму.

Проанализировать, зависит ли полученный результат от типа первичной частицы.

б) Смоделировать или взять из архива несколько файлов данных по каскадным кривым от одной и той же первичной частицы (γ , e^- или e^+) с одинаковой первичной энергией ($10 \text{ ТэВ} \leq E_0 \leq 10 \text{ ПэВ}$, объем моделируемых выборок задавать с учетом предельного времени моделирования 2-3 часа), но для разных геометрий детектора (3-4 различных толщин зазоров и 2-3 заметно различающихся толщин чувствительных слоев). Оценить влияние геометрии на точность измерения каскадной кривой. Ввести количественные критерии ϵ_{gap} и ϵ_{sens} , характеризующие влияние размера зазора δ_{gap} и толщины чувствительного слоя δ_{sens} , и нарисовать зависимости $\epsilon_{gap}(\delta_{gap})$ и $\epsilon_{sens}(\delta_{sens})$.

в) Для некоторой выборки с $E_0 \geq 10$ ТэВ для детектора с большими зазорами ($\delta_{gap} \geq 1$ см) построить аппроксимации каскадных кривых в слоях свинца и чувствительных слоях и сравнить интегралы под каскадными кривыми, которые пропорциональны первичной энергии. Сделать вывод о точности оценки E_0 по сигналам в чувствительных слоях при данном зазоре.

Сделать то же самое для другой выборки, отличающейся от предыдущей только размерами зазоров.

2.7.2 Поперечные характеристики ЭФК в РЭК

Базовые упражнения

а) Используя файлы данных по поперечному распределению электронов в различных слоях детектора, получить зависимости среднеквадратического радиуса ливня от номера слоя (глубины чувствительного слоя детектора) для разных типов и энергий первичных частиц.

б) Оценить мольеровскую единицу r_m в свинце по значениям среднеквадратического радиуса ливня в слоях, соответствующих максимуму каскадной кривой. Сравнить оценки для разных типов и энергий первичных частиц.

Сложные упражнения

в) Написать прикладную программу, вычисляющую карты плотности заряженных частиц в слоях детектора для отдельных событий на задаваемом поперечном масштабе 0,01-10,0 мм. Визуализировать образцы карт.

г) Написать прикладную программу для поиска отдельных подкаскадов (областей с высокой плотностью частиц) на картах, создаваемых приложением из пункта в). Обработать с помощью этой программы несколько отдельных событий с $E_0 \geq 10$ ТэВ, выделив в каждом из них подкаскады в нескольких последовательных слоях.

д) Написать прикладную программу для объединения (сшивки) следов подкаскадов в последовательных слоях. Результатом обработки программой каждого подкаскада должна быть аппроксимация оси подкаскада прямой по центрам тяжести следов в нескольких слоях.

Глава 3

Распространение нейтрона в однородной среде (случайные блуждания)

Цель — изучение явления случайных блужданий на примере распространения нейтрона в однородной среде.

Оцениваются следующие характеристики случайного процесса:

- длина траектории (средняя и индивидуальная) как функция времени;
- расстояние от точки старта (среднее и индивидуальное) как функция времени;
- кинетическая энергия (средняя и индивидуальная) как функция времени;
- скорость потери энергии (средняя и индивидуальная) как функция времени;
- распределение пробегов до захвата (распада);
- распределение количества ядер отдачи до захвата нейтрона;
- распределение кинетических энергий ядер отдачи;
- эти же характеристики, но при выключенных процессах

захвата и распада нейтрона.

3.1 Физическое введение

Распространение нейтронов с кинетической энергией менее 1 МэВ в однородной среде является достаточно простым примером случайного процесса с независимыми приращениями, называемого *случайным блужданием*. При энергиях ~ 1 МэВ чаще всего происходят упругие рассеяния нейтронов на ядрах атомов среды, что обуславливает изменение направления движения нейтронов и потери ими энергии небольшими порциями. В результате многих актов рассеяния нейтрон может замедлиться до тепловых скоростей и долгое время двигаться в равновесии со средой. Такое движение обычно завершается захватом нейтрона ядром среды, причем сечение этого процесса сильно зависит от среды и кинетической энергии нейтрона (рис.1).

Блуждание нейтрона в данной задаче моделируется специально созданным приложением GEANT4, носящим имя `walk` и использующим стандартный набор процессов. Он включает упругое рассеяние, неупругие взаимодействия (в том числе — захват) и распад.

Диапазон первичных энергий нейтрона для наблюдения простых (без размножения) блужданий логично ограничить интервалом 1 кэВ – 1 МэВ. Бóльшие энергии чреваты расщеплением ядер, меньшие — слишком короткой траекторией до захвата.

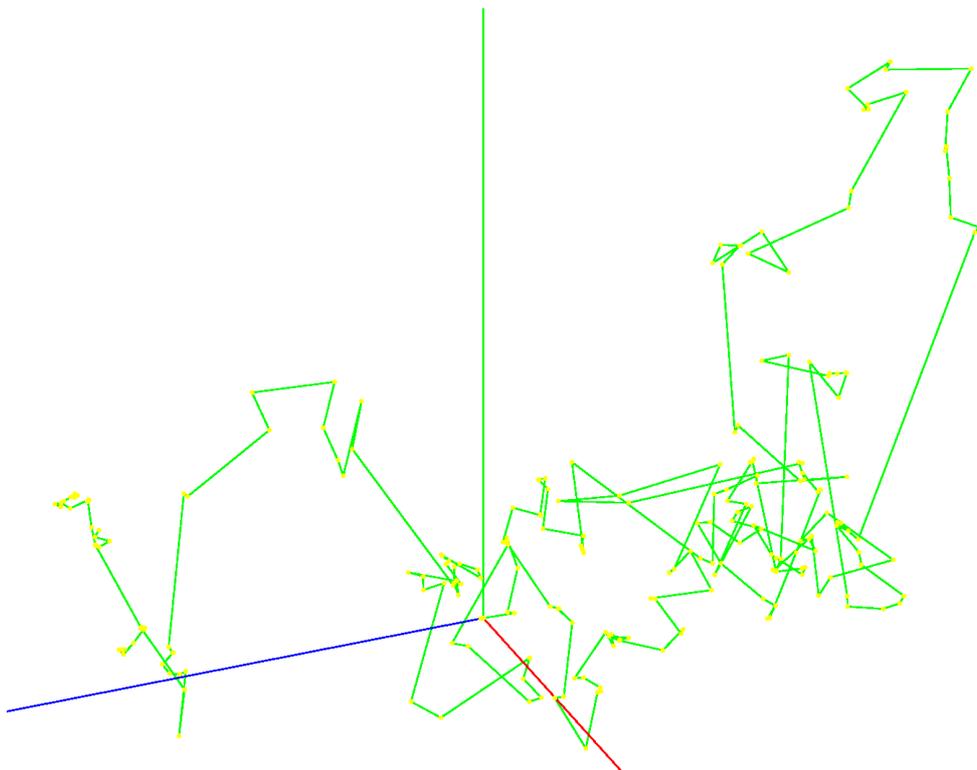


Рис. 3.1: Пример случайного блуждания нейтрона с первичной энергией 200 кэВ до захвата. Нейтрон начинает движение из начала координат, красной прямой обозначена ось x , зеленой — ось y , синей — ось z .

В отсутствие неупругих процессов случайное блуждание нейтрона приближается по свойствам к броуновскому движению, называемому иначе винеровским случайным процессом. Он предполагает:

- 1) стационарность, т.е. независимость переходных вероятностей от времени;
- 2) марковость, т.е. зависимость переходных вероятностей только от текущего состояния частицы, но не от предыдущих её состояний;
- 3) независимость приращений координат от времени и предыдущего состояния;
- 4) нормальность приращений координат с фиксированными

средними и дисперсиями.

В случае блуждания нейтрона средние и дисперсии приращений зависят от его энергии, которая убывает со временем, поэтому последние два свойства могут не соблюдаться (или соблюдаться приближенно).

Первые два свойства также соблюдаются лишь приближенно в силу убывания энергии.

По-настоящему винеровский процесс реализуется только после замедления нейтрона до тепловых энергий, когда он оказывается в равновесии со средой: средние потери энергии оказываются близкими к нулю, происходят лишь флуктуации энергии около среднего значения.

Физически наблюдению этого броуновского движения мешает процесс захвата нейтрона, начинающий действовать еще при существенно больших энергиях, но становящийся существенно более вероятным при тепловых энергиях. Если исключить процесс захвата, блуждание нейтрона будет ограничено только размерами материального тела, в котором он движется, и временем его распада.

Распределение пробегов нейтрона до любого процесса взаимодействия подчиняется экспоненциальному закону. При тепловом равновесии со средой средний пробег от взаимодействия к взаимодействию почти не меняется, т.е. длины пробегов оказываются независимыми и одинаково распределенными величинами. Если рассматривать не все подряд точки взаимодействия, а только отстоящие друг от друга по номеру на n , то изменения координат от точки к точке будут примерно подчиняться нормальному закону распределения вследствие

центральной предельной теоремы, т.е. мы должны наблюдать винеровский случайный процесс.

В приложении `walk` можно выключить процессы захвата и распада нейтрона специальными командами.

3.2 Упражнения задачи

Задача содержит две группы упражнений. Первая группа рассматривает характеристики случайных блужданий нейтрона при стандартном наборе процессов взаимодействия, вторая — при выключенных захвате и распаде. Для упражнений первой группы используются первичные энергии нейтронов 1 МэВ и ниже, для второй — 1 кэВ и ниже. В обеих группах возможно рассмотрение следующих характеристик процесса блуждания нейтрона:

- длины траектории в зависимости от времени/номера шага;
- расстояния от точки старта в зависимости от времени/номера шага;
- отдельных координат частицы в зависимости от времени/номера шага;
- кинетической энергии в зависимости от времени/номера шага;
- скорости потери энергии в зависимости от времени/номера шага;
- количества ядер отдачи на треке;
- распределения кинетических энергий ядер отдачи.

При включенных захвате и распаде можно также наблю-

дать пробег до захвата/распада. Если эти процессы выключены, пробег определяется размерами «среды» (материальной конструкции), в которой блуждает нейтрон.

3.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования

Программа `walk` является приложением GEANT4, предназначенным для выполнения под ОС LINUX Fedora. Для анализа и визуализации данных, как и всюду в этом практикуме, используется пакет ROOT.

Упражнения рассчитаны на студентов, владеющих основами компьютерной грамотности и базовыми численными методами, но не требуют знания ОС LINUX, GEANT4 и ROOT. Для успешной работы достаточно следовать приведенным ниже инструкциям и использовать справочные материалы (смотрите приложения) по LINUX и руководства GEANT4 и ROOT.

Для запуска моделирования по GEANT4 используются команды LINUX. По окончании расчёта результирующие файлы необходимо переименовать, сжать и скопировать в специальный архив для дальнейшего общего использования. Для этого используется командный файл, описанный ниже.

При обработке данных и их визуализации в ROOT используются командные C-файлы, являющиеся по сути программным кодом на C++. Для ускорения процесса обработки в приложении Б приведены примеры C-файлов, которые студент должен переделать под свои данные и конкретные параметры

гистограмм и графиков. Внутри тех же файлов разумно производить и не слишком сложные преобразования читаемых данных.

Для выполнения любого из упражнений задачи необходимы данные одного или нескольких сеансов моделирования случайных блужданий нейтронов по приложению `walk`. Один сеанс моделирования (`run`) обеспечивает получение выборки заданного объема различных реализаций блужданий нейтрона заданной энергии в заданной среде. При этом в выводных файлах сохраняется вся информация, необходимая для выполнения всех упражнений задачи. Из архива общего пользования можно получить результаты сеансов моделирования, проведенных ранее.

В результате каждого сеанса моделирования образуются три файла: `track` — с подробной информацией о треке, `trackl` — с информацией о длине траектории до захвата/распада/выхода из среды, `recoil` — с информацией о ядрах отдачи.

3.4 Формат выводных файлов

1. Файлы `track` содержат данные о треке нейтрона в каждой точке взаимодействия для каждого события. Данные начинаются со строки заголовка сеанса, состоящей из 8 чисел: три начальных координаты трека в см, три направляющих косинуса начального импульса нейтрона, начальная кинетическая энергия в кэВ и идентификатор первичной частицы (нейтрона) по таблице Particle Data Group (2112). Регуляр-

ные данные пишутся в 6 столбцов:

- столбец 1 — номер события;
- столбец 2 — координата x точки взаимодействия в см;
- столбец 3 — координата y точки взаимодействия в см;
- столбец 4 — координата z точки взаимодействия в см;
- столбец 5 — время t точки взаимодействия в нС;
- столбец 6 — кинетическая энергия нейтрона в кэВ после взаимодействия.

Число строк в файлах переменное, оно зависит от начальной энергии и числа событий.

2. Файлы `track1` содержат данные о длине трека нейтрона до захвата/распада/выхода из среды. Последний вариант реализуется в том случае, если процессы захвата и распада отключены. Данные пишутся в один столбец, содержащий полную длину трека в см.

Число строк соответствует числу событий.

3. Файлы `recoil` содержат данные о ядрах отдачи, появившихся на треке. Данные пишутся в 3 столбца:

- столбец 1 — номер события;
- столбец 2 — кинетическая энергия ядра отдачи в кэВ;
- столбец 3 — код ядра отдачи по таблице Particle Data Group.

Число строк в файлах переменное, зависит от начальной энергии и числа событий.

3.5 Сеанс моделирования

Для моделирования используются командные файлы `run*.mac`, в которых задаются исходные данные: число событий (число бросаемых нейтронов), начальная кинетическая энергия нейтронов, вещество среды, а также при необходимости выключаются процессы захвата и распада нейтронов. Студент должен самостоятельно подготовить `mac`-файлы для моделирования, используя имеющиеся образцы. На рис.2 показан файл `run10.mac`.

```
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 1
#
/gun/particle neutron
/gun/energy 0.2 MeV
/run/beamOn 10
```

Рис.3.2

Пример `mac`-файла для сеанса моделирования в пакетном режиме: `run10.mac`

Для построения полноценных гистограмм нам потребуется объём выборки не менее 100 событий. Создадим новый командный файл `run1000.mac` для генерации выборки объемом

1000 событий. Скопируем `run10.mac` в `run1000.mac` и заменим в последнем команду `/run/beamOn 10` на `/run/beamOn 1000`. Кроме того, заменим команду `/tracking/verbose 1` на `/tracking/verbose 0`, что резко сократит объём информации о моделируемых событиях, выдаваемой на экран (или в файл протокола) и ускорит процесс моделирования. В качестве материала среды выберем свинец, для этого перед `/run/beamOn 1000` добавим команду `/walk/det/setAbsMat 3`. В данной команде значение параметра 1 соответствует алюминию (Al), 2 — железу (Fe), 3 — свинцу (Pb), 4 — графиту (C), по умолчанию (т.е. в отсутствие команды) принимается алюминий. Энергию и тип первичной частицы оставим без изменения. В результате получится файл, показанный на рис.3.

```
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/neutron_walk/det/setAbsMat 3
/neutron_walk/det/update
/gun/particle neutron
/gun/energy 0.2 MeV
/run/beamOn 1000
```

Рис.3.3

Результирующий mac-файл: run1000.mac

В случае моделирования «броуновского» движения нейтрона заменим также /gun/energy 0.2 MeV на /gun/energy 1 keV и добавим две новых команды /process/inactivate nCapture и /process/inactivate Decay neutron перед /run/beamOn 1000 и сохраним в run1000-nocapt.mac (рис.4).

```
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/process/inactivate nCapture
/process/inactivate Decay neutron
/walk/det/setAbsMat 3
/gun/particle neutron
/gun/energy 1 keV
/run/beamOn 1000
```

Рис.3.4

Результирующий mac-файл: run1000-nocapt.mac

Запуск моделирования в пакетном режиме производится командой

```
> walk <имя1.mac> > <имя2.out> &
```

Здесь первый знак ">" есть приглашение системы, `walk` — имя приложения, `<имя1.mac>` — имя командного файла, второй знак ">" — признак переадресации стандартного выводного потока в файл `<имя2.out>`, знак "&" — знак отсоединения приложения от окна терминала.

Время моделирования блужданий нейтронов составляет от долей секунды до нескольких секунд на событие, поэтому пользователь может позволить себе заказать и 100000 событий, но при этом объём вывода существенно вырастет и может составить многие сотни мегабайт. Самым большим выводным файлом является файл `track`, поскольку он содержит подробную информацию о треке нейтрона: координаты, энергию и время во всех точках взаимодействия нейтрона.

По окончании сеанса моделирования необходимо убедиться, что появились файлы `<имя2.out>`, `track`, `track1` и `recoil`. При отсутствии какого-либо из файлов с правильным временем создания (модификации) сеанс моделирования надо считать аварийно закончившимся. В этом случае надо обратиться к преподавателю. Если все ожидаемые файлы появились, надо воспользоваться скриптом `cparn` для переименования выводных файлов и копирования их в архив общего доступа. Формат `cparn`:

```
cparn <Nn> <E0> <M> <F>
```

Здесь `<Nn>` — число моделируемых историй, целое число без знака, `<E0>` — первичная энергия нейтрона, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью: `MeV` или `keV` (без пробела между значением и единицами), `<M>` —

материал среды: Al, Fe, Pb или C, <F> — набор физических процессов (1 — полный, 0 — без захвата и распада). Все значения параметров должны соответствовать значениям в `mas`-файле, с помощью которого велось моделирование.

Выводные файлы сохраняют свои основные имена после выполнения команды `srarn`, но к ним добавятся суффиксы со значениями параметров и суффикс `.gz` — признак сжатия командой `gzip`. В таком виде файлы будут сохранены в архив, они также останутся в текущем каталоге.

3.6 Представление результатов

Смотрите 1.6.

3.7 Упражнения

3.7.1 Характеристики блужданий нейтронов с естественным набором физических процессов

а) Промоделировать или взять из архива данные по блужданиям нейтронов с полным набором процессов для нескольких первичных энергий и/или для нескольких разных сред.

б) проанализировать все характеристики случайных блужданий из списка:

- длина траектории как функция времени (номера шага);
- расстояние от точки старта как функция времени (номера шага);
- кинетическая энергия как функция времени (номера шага);
- скорость потери энергии как функция времени (номера шага, длины траектории);
- пробег до захвата;
- распределение по количеству ядер отдачи на траектории нейтрона (на некоторой выборке траекторий) как функция первичной энергии и материала среды;
- распределение ядер отдачи по кинетической энергии как функция первичной энергии и материала среды.

Для каждой исследуемой характеристики необходимо построить распределения по искусственным выборкам с разными E_0 и материалами среды. Для функций времени (номера шага, длины траектории) гистограммы должны быть двумерными.

в) интерпретировать результаты анализа характеристик.

3.7.2 Характеристики блужданий нейтронов без захвата и распада (броуновское движение)

а) Про моделировать или взять из архива данные по блужданиям нейтронов без учёта процессов захвата и распада для нескольких первичных энергий и/или для нескольких разных сред.

б) проанализировать все характеристики случайных блужданий из списка предыдущего упражнения (пункт б)).

Для каждой исследуемой характеристики построить распределения по искусственным выборкам с разными E_0 и материалами среды. Для функций времени (номера шага, длины траектории) гистограммы должны быть двумерными.

в) интерпретировать результаты анализа характеристик.

Глава 4

Движение заряженных частиц в дипольном магнитном поле

Цель — рассмотреть характерные особенности поведения заряженных частиц в поле магнитного диполя, сопоставить приближенное аналитическое описание с численными решениями уравнений движения.

4.1 Физическое введение

Дипольное магнитное поле — простейшая конфигурация, позволяющая делать практически важные физические оценки характеристик движения заряженных частиц в магнитосфере Земли.

В первом приближении геомагнитное поле может считаться дипольным вплоть до расстояний $\sim 6R_{\text{Земли}}$. Поле в этой области пространства обусловлено земными токами, на больших расстояниях необходимо учитывать влияние токов магнитосферы. Именно в области почти дипольного поля распо-

ложены магнитные ловушки Земли, называемые *радиационными поясами*.

Простые оценки параметров движения частиц радиационных поясов в дипольном приближении на малых расстояниях (высотах) в вакууме теряют смысл из-за наличия у Земли атмосферы, простирающейся до высот более 100 км над поверхностью. Взаимодействие заряженных частиц даже с верхними слоями атмосферы приводит к быстрой потере ими энергии посредством ионизации. В этом случае мы должны перейти от обычного детерминированного уравнения движения частицы в магнитном поле

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{Ze}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (4.1)$$

к стохастическому, содержащему случайную тормозящую силу $\mathbf{F}_{\text{торм}}$:

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{Ze}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] - \mathbf{F}_{\text{торм}} . \quad (4.2)$$

Кроме того, в зависимости от типа заряженной частицы и её энергии к практически непрерывному процессу ионизации надо добавить другие случайные процессы (синхротронное и тормозное излучение для электронов, ядерное взаимодействие для адронов и т.д.). Рассмотрение такого случайного процесса логично вести путем статистического моделирования для учета сложной геометрии и воспроизведения распределений случайных величин с контролируемой точностью.

В данной задаче решение (закон движения) получается с помощью приложения GEANT4, способного в принципе учесть все указанные и многие другие факторы. Однако, базовые

упражнения ограничиваются только рассмотрением движения в дипольном поле в вакууме, и приложение `field` решает детерминированное уравнение движения.

В случае постановки перед студентом более сложных задач (например, при рассмотрении более сложных моделей геомагнитного поля или учёте остаточной атмосферы) приложение должно быть соответствующим образом доработано.

В стационарном магнитном поле диполя в отсутствие потерь энергии частицей (ионизация отсутствует, синхротронными потерями пренебрегаем) частица может совершать финитное движение, которое происходит сколь угодно долго, что соответствует нахождению частицы в магнитной ловушке [5].

Обычно это сложное движение раскладывается на три составляющих: ларморовское вращение в плоскости, перпендикулярной силовой линии поля, широтные колебания между *зеркальными точками* (смотрите ниже) и азимутальный (долготный) дрейф (рис.1). Если первая составляющая является общей для движения частицы в любом магнитном поле, то последние две характерны для движения в аксиально симметричных магнитных ловушках, частным случаем которых является дипольное поле. Каждой составляющей движения соответствует своя условно сохраняющаяся величина, называемая *адиабатическим инвариантом*.

Прослеживание частицы пакетом GEANT4 происходит в декартовой системе координат, в ней поле диполя, ориентированного вдоль оси Z, имеет вид:

$$B_x = 3\frac{Mxz}{R^5}, \quad B_y = 3\frac{Myz}{R^5}, \quad B_z = (3z^2 - R^2)\frac{M}{R^5},$$

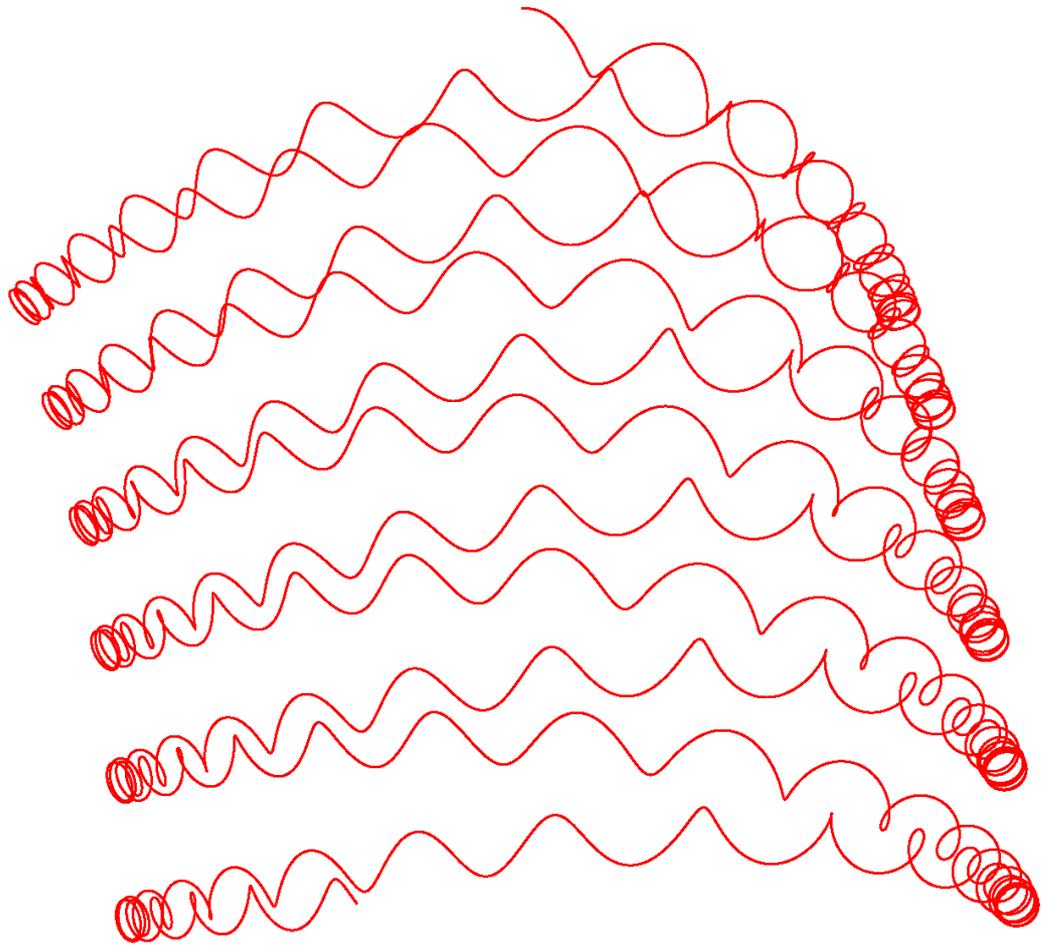


Рис. 4.1: Пример траектории электрона с кинетической энергией 100 МэВ в дипольном магнитном поле.

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 .$$

Здесь x, y, z — координаты в связанной с диполем системе координат.

Однако дипольное магнитное поле проще описывается в сферической системе координат (R, λ, ϕ) , где R — расстояние от центра диполя, λ — магнитная широта, меняющая-

ся в пределах $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$, ϕ — магнитная долгота ($0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$).

Напряженность магнитного поля на магнитном экваторе $B_{\text{ЭКВ}}$ хорошо описывается выражением [6]:

$$B_{\text{ЭКВ}} = \frac{0,3004}{R_{\text{ЭКВ}}^3} \cdot R_{\text{Земли}}^3, \text{ Гс.} \quad (4.3)$$

Здесь $R_{\text{ЭКВ}}$ — расстояние от центра диполя до точки на экваторе, $R_{\text{Земли}}$ — радиус Земли.

Силовая линия поля диполя может быть выражена следующим выражением:

$$R(\lambda) = R_{\text{ЭКВ}} \cos^2 \lambda. \quad (4.4)$$

Изменение дипольного поля вдоль силовой линии есть:

$$B(\lambda) = B_{\text{ЭКВ}} \frac{\sqrt{4 - 3\cos^2 \lambda}}{\cos^6 \lambda}. \quad (4.5)$$

Частица, двигаясь от экватора к полюсу, попадает в область все большей напряженности поля и замедляет скорость движения вдоль силовой линии, так как на неё действует тормозящая сила [7]

$$\mathbf{F}_{\parallel} = \frac{Ze}{c} [\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}_r], \quad (4.6)$$

где \mathbf{B}_r — радиальная составляющая магнитного поля. Точка, где движение частицы вдоль магнитной силовой линии меняет направление на обратное, называется зеркальной: частица отражается от «стенки» магнитной ловушки и продолжает движение к противоположной зеркальной точке.

Первый адиабатический инвариант связан с сохранением магнитного момента $\mu = \pi c \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{Ze B}$, где α — питч-угол, т.е.

угол вектора скорости с локальным направлением магнитного поля. В стационарном поле с малым градиентом $\mu \sim \frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{const.}$

Поле в зеркальной точке можно определить, зная поле $B_{\text{ЭКВ}}$ и питч-угол $\alpha_{\text{ЭКВ}}$ на экваторе:

$$B_{\text{mirr}} = \frac{B_{\text{ЭКВ}}}{\sin^2 \alpha_{\text{ЭКВ}}} \quad (4.7)$$

Колебательное широтное движение имеет свой собственный второй адиабатический инвариант — интеграл действия между зеркальными точками M_S и M_N :

$$J = \int_{M_S}^{M_N} p_{\parallel} ds, \quad (4.8)$$

где $p_{\parallel} = p \sqrt{1 - B/B_{\text{mirr}}}$ — проекция импульса на направление магнитного поля.

Период колебания частицы между точками отражения

$$\tau_2 = 8,5 \cdot 10^{-2} L \frac{1 + E_{\text{kin}}/mc^2}{\sqrt{(E_{\text{kin}}/mc^2) + 2E/mc^2}} T_2(\alpha_{\text{ЭКВ}}), \text{ с}, \quad (4.9)$$

где $T_2(\alpha_{\text{ЭКВ}}) = 1,3 - 0,563 \sin \alpha_{\text{ЭКВ}}$, а $L = R_{\text{ЭКВ}}/R_{\text{Земли}}$ — номер дрейфовой оболочки, характеризующий удалённость траектории частицы от центра диполя.

Долготный дрейф появляется из-за радиальной неоднородности магнитного поля: ларморовский радиус на внешнем полуокружье больше, чем на внутреннем, что и обуславливает смещение по долготе. С этим видом движения связан третий адиабатический инвариант — поток геомагнитного поля через экваториальную плоскость вне данной L -оболочки.

Период дрейфа вокруг Земли:

$$\tau_3 = \frac{88(1 + E_{kin}/mc^2)}{2 + E_{kin}/mc^2} \frac{K(\lambda_{mirr})}{LE_{kin}}, \text{ мин}, \quad (4.10)$$

где $K(\lambda_{mirr}) = 1,25 - 0,25 \cos^2 \lambda_{mirr}$ — геомагнитная широта точки отражения, E_{kin} — в МэВ.

4.2 Упражнения задачи

Упражнения можно разделить на две группы: базовые и сложные.

Базовые предполагают проверку соотношений (4.9) и (4.10) по данным прослеживания траекторий частиц в дипольном магнитном поле. Поскольку приложение **field** решает детерминированное уравнение движения (4.1), достаточно проследить только одну траекторию для каждого набора первичных данных: типа частицы (**e-**, **e+**, **proton**, **alpha**), энергии E_{kin} , номера дрейфовой оболочки L и питч-угла на экваторе $\alpha_{\text{ЭКВ}}$.

Сложные упражнения предполагают переделку приложения в двух направлениях:

- использование более сложной модели магнитного поля;
- введение той или иной модели атмосферы Земли.

И то, и другое изменение приводит к существенному усложнению траектории. В первом случае она формально остаётся детерминированной, но сильно зависит от начальных условий. Во втором случае она становится принципиально случайной. Поэтому переделанное приложение будет решать стохастическое уравнение движения (4.2), и для анализа поведения частиц необходимо для каждого набора первичных данных

моделировать несколько траекторий. Объем выборки будет определяться поставленной преподавателем задачей.

Набор возможных сложных упражнений весьма широк, и разбор их выходит за рамки данного руководства. Однако, необходимо заметить, что постановка и решение такого рода задач актуальны для анализа различных космофизических экспериментов и постоянно фигурируют в курсовых и дипломных работах студентов кафедры физики космоса. Поэтому приложение `field` можно рассматривать как некоторую заготовку для решения целого ряда магнитосферных задач, облегчающую жизнь молодым исследователям.

Наконец, следует упомянуть еще два возможных направления модификации стандартного приложения:

- введение местных электрических полей в магнитосфере;
- использование сопряженного подхода при прослеживании траекторий частиц (т.е. прослеживание от конечной точки к начальной).

Обе возможности предусмотрены арсеналом GEANT4 и могут быть использованы для постановки исследовательских задач на переднем краю физики атмосферы и магнитосферы.

4.3 Матобеспечение задачи и особенности его использования

Программа для прослеживания траекторий заряженных частиц в дипольном магнитном поле `field` является приложением GEANT4 и выполняется под ОС LINUX Fedora. Стандартное использование приложения не требует знания GE-

ANT4 и ОС LINUX, достаточно выполнять приведенные ниже инструкции. В базовых упражнениях обработка данных моделирования ведется с помощью аналитического пакета ROOT. Студент должен самостоятельно написать командные файлы ROOT (на языке C++) на основании образцовых C-файлов, приведенных в приложении Б.

При выполнении упражнений наряду с использованием ROOT студенту может потребоваться создать отдельную обрабатывающую программу, выходные файлы которой могут быть в итоге визуализированы с помощью ROOT.

Для запуска моделирования по GEANT4 используются команды LINUX. По окончании расчёта результирующие файлы необходимо переименовать, сжать скопировать в специальный архив для дальнейшего общего использования. Для этого используется описанный ниже командный файл `spard`.

При обработке данных и их визуализации в ROOT используются командные C-файлы, являющиеся программным кодом на C++. Для ускорения процесса обработки в приложении Б приведены примеры C-файлов, которые студент должен переделать под свои данные и конкретные параметры гистограмм и графиков. Внутри тех же файлов разумно производить и не слишком сложные преобразования читаемых данных.

Для выполнения базовых упражнений необходимы данные, получаемые в результате нескольких сеансов моделирования (прослеживания траекторий) с помощью приложения `field`. Один сеанс моделирования обеспечивает получение данных об одной или нескольких траекториях заряженной частицы

данного типа, с данной кинетической энергией, стартующей с данной L -оболочки, с данным питч-углом и с данной максимальной длиной траектории. Траектории всегда начинаются с экватора. По окончании сеанса вся необходимая информация о траекториях сохраняется в выводных файлах.

Аналогичные данные ранее проведенных сеансов можно получить из архива общего пользования.

В результате каждого сеанса моделирования образуется файл `swing` с данными о координатах и времени прохождения зеркальных точек каждой из прослеживаемых траекторий.

4.4 Формат выводных файлов

1. Файлы `swing*` содержат данные о декартовых и угловых координатах и времени прохождения зеркальных точек траекторией частицы. Данные пишутся в 7 столбцов:

- столбец 1 — номер периода широтного колебания;
- столбец 2 — координата x зеркальной точки в км;
- столбец 3 — координата y зеркальной точки в км;
- столбец 4 — координата z зеркальной точки в км;
- столбец 5 — время прохождения зеркальной точки в с.

Число строк в файлах переменное, зависит от кинетической энергии и типа частицы, максимальной длины траектории и числа прослеживаемых частиц.

4.5 Сеанс моделирования

Для моделирования используются командные файлы `run*.mac`, в которых задаются исходные данные: число событий (число прослеживаемых траекторий), начальная кинетическая энергия частицы, L -оболочка, экваториальный питч-угол и максимальная длина траектории. Студент должен самостоятельно подготовить `mac`-файлы для моделирования, используя имеющиеся образцы. На рис.2 показан файл `run10.mac`.

```
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
#
/gun/particle e-
/gun/energy 10 MeV
/gun/setL 1.5
/gun/setPitchAng 20.5 deg
/gun/setMaxTrLen 200000.0 km
/run/beamOn 10
```

Рис.4.2

Пример `mac`-файла для сеанса моделирования в пакетном режиме: `run10.mac`

Переделаем его в `mac`-файл для моделирования одной траектории протона с начальной энергией 100 МэВ и сохраним его под именем `run1.mac`. В команде `/tracking/verbose` изменим значение 0 на 1, что обеспечит подробную информацию о траектории в стандартном выводном потоке. В команде `/gun/particle` значение параметра `e-` изменим на `proton`.

```
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 1
#
/gun/particle proton
/gun/energy 100 MeV
/gun/setL 1.8
/gun/setPitchAng 35.0 deg
/gun/setMaxTrLen 50000.0 km
/run/beamOn 1
```

Рис.4.3

Результирующий `mac`-файл: `run1.mac`

Изменим также начальную кинетическую энергию с 10 МэВ на 100 МэВ в команде `/gun/energy`. Запустим протон на L -оболочку 1,8 (команда `/gun/setL`) с экваториальным питч-углом 35 градусов (команда `/gun/setPitchAng`), а длину его траектории ограничим 50000 километрами (команда

/gun/setMaxTrLen). Не забудем также изменить на 1 число моделируемых траекторий в команде /run/beamOn. В результате будем иметь файл `run1.mac`, изображенный на рис.3.

Запуск моделирования в пакетном режиме производится командой

```
> field <имя1.mac> > <имя2.out> &
```

Здесь первый знак ">" есть приглашение системы, `field` — имя приложения, `<имя1.mac>` — имя командного файла, второй знак ">" — признак переадресации стандартного выводного потока в файл `<имя2.out>`, знак "&" — знак отсоединения приложения от окна терминала.

Время прослеживания траектории зависит от первичной энергии, питч-угла и особенно от прослеживаемой длины трека и может составлять от нескольких секунд до сотен секунд. Для оценки периода качания частиц достаточно длины трека в несколько тысяч километров, для оценки скорости азимутального дрейфа хватит несколько десятков тысяч. Трек длиной в миллион километров позволит проследить полный оборот частицы вокруг Земли. Не стоит делать максимальную длину трека больше 500000 км и поднимать частицы выше $L=6$. Не стоит также задавать кинетическую энергию выше 200 МэВ.

По окончании сеанса нужно убедиться в наличии файлов `<имя2.out>` и `swing` в текущем каталоге. Если их нет, сеанс не состоялся, и необходимо обратиться к преподавателю. Если файлы присутствуют, надо использовать скрипт `spard` для их переименования и копирования в архив. Формат `spard`:

`spard <Nt> <PT> <E0> <L> <A> <MTL>`

Здесь `<Nt>` — число прослеживаемых траекторий, целое число без знака, `<PT>` — тип частицы, литерал (`e-`, `e+`, `p`, `He`), `<E0>` — начальная кинетическая энергия, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью: `keV` или `MeV` (без пробела между значением и единицами), `<L>` — номер дрейфовой оболочки, положительное число (может быть с десятичной точкой), `<A>` — экваториальный питч-угол, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью `deg` (без пробела между значением и единицами), `<MTL>` — максимальная длина трека, положительное число (может быть с десятичной точкой) с размерностью `km` (без пробела между значением и единицами). Все значения параметров должны соответствовать значениям в `mas`-файле, с помощью которого велось моделирование.

Выводные файлы сохраняют свои основные имена после выполнения команды `spard`, но к ним добавятся суффиксы со значениями параметров и суффикс `.gz` — признак сжатия командой `gzip`. В таком виде файлы будут сохранены в архив, они также останутся и в текущем каталоге.

4.6 Представление результатов

Смотрите 1.6.

4.7 Упражнения

4.7.1 Проверка соотношения для периода колебаний между зеркальными точками

а) Промоделировать или взять из архива данные по траекториям электронов(позитронов) с кинетическими энергиями 1-100 МэВ, на дрейфовых оболочках $L = 1-6$ и с экваториальными питч-углами $10^\circ-80^\circ$. На основании соответствующих файлов `swing*` составить таблицу значений периодов колебаний τ_2 и добавить туда значения для каждого набора первичных параметров, рассчитанные по формуле (4.9). Оценить погрешности этой формулы. Изобразить данные таблицы графически.

б) Повторить процедуру для протонов и α -частиц для тех же диапазонов первичных параметров.

4.7.2 Проверка соотношения для периода азимутального дрейфа

а) Промоделировать или взять из архива данные по траекториям электронов(позитронов) с кинетическими энергиями 1-100 МэВ, на дрейфовых оболочках $L = 1-6$ и с экваториальными питч-углами $10^\circ-80^\circ$.

Внимание: для достаточно точной оценки периода долготного дрейфа траектория должна включать минимум десять периодов колебаний между зеркальными точками.

На основании соответствующих файлов `swing*` составить

таблицу значений периодов азимутального дрейфа τ_3 и добавить туда значения для каждого набора первичных параметров, рассчитанные по формуле (4.10). Оценить погрешности этой формулы. Изобразить данные таблицы графически.

б) Повторить процедуру для протонов и α -частиц для тех же диапазонов первичных параметров.

Глава 5

Приложения

5.1 Приложение А: некоторые команды ОС LINUX

Избранные команды LINUX

команда	назначение
<code>pwd</code>	Выводит имя текущей директории
<code>ls</code>	Выводит список файлов и каталогов по порядку
<code>ls -laX</code>	Выводит форматированный список всех файлов и директорий, включая скрытые
<code>ls -ltr</code>	Выводит форматированный список всех обычных файлов и директорий, отсортированный по времени в обратном порядке (самый свежий внизу)
<code>cd</code>	Переход в домашнюю директорию
<code>cd /home</code>	Переход в директорию <code>/home</code>
<code>cat /home/new.dat</code>	Показать содержимое файла <code>/home/new.dat</code>
<code>top</code>	интерактивный список текущих процессов, отсортированных по использованию центрального процессора

Избранные команды LINUX (продолжение)

команда	назначение
<code>tail /var/log/messages</code>	Выводит конец файла (по умолчанию — последние 10 строк)
<code>mkdir data</code>	Создание директории с именем <code>data</code> в текущей директории
<code>cp /home/new.dat /home/data</code>	Копирует <code>/home/new.dat</code> в <code>/home/data</code>
<code>rmdir /home/data</code>	Удаление директории с именем <code>/home/data</code>
<code>rm -rf /home/data</code>	Удаление директории с вложенными файлами
<code>cp -la /dir1 /dir2</code>	Копирование директорий
<code>mv /dir1 /dir2</code>	Переименование директории
<code>mv <имя_файла1> <имя_файла2></code>	Переименование файла. <code><имя_файла></code> может содержать путь. Если <code><имя_файла1></code> и <code><имя_файла2></code> содержат разные пути, происходит перемещение файла из директории в директорию.
<code>du -sh <имя_dir></code>	Выводит на экран размер директории <code><имя_dir></code>

Избранные команды LINUX (продолжение)

команда	назначение
<code>locate *.dat</code>	Поиск всех файлов с именем <code>*.dat</code>
<code>man <имя_команды></code>	Получение справки о команде <code><имя_команды></code>
<code>more <имя_файла></code>	Просмотр содержимого текстового файла <code><имя_файла></code> по страницам
<code>less <имя_файла></code>	Просмотр содержимого текстового файла <code><имя_файла></code> по страницам с возможностью вернуться назад
<code>tar -zxvf <имя_файла></code>	распаковать архив <code><имя_файла></code> с расширением <code>tgz</code> или <code>tar.gz</code>
<code>mc</code>	запустить файловый менеджер Midnight Commander, по возможности и внешне напоминающий Norton Commander
<code>./<имя_программы></code>	запустить исполняемый файл в текущем каталоге, если текущего каталога нет в списке каталогов, указанных в переменной окружения <code>PATH</code>

5.2 Приложение Б: примеры скриптов ROOT с соответствующими графиками

Если пакет ROOT правильно установлен и сконфигурирован на данном компьютере, запуск сессии ROOT осуществляется командой

```
> root
```

ответом будет приветствие ROOT:

```
*****
*
*           W E L C O M E  t o  R O O T           *
*
*   Version   5.34/14   16 December 2013   *
*
*   You are welcome to visit our Web site *
*           http://root.cern.ch           *
*
*****
```

```
ROOT 5.34/14 (heads/v5-34-00-patches@v5-34-13-131-gd110ad3,
Dec 23 2013, 08:15:00 on linuxx8664gcc)
```

```
CINT/ROOT C/C++ Interpreter version 5.18.00, July 2, 2010
Type ? for help. Commands must be C++ statements.
Enclose multiple statements between { }.
root [0]
```



```

                                32,0.0,3200.0);
nlines = 0;
while(1) {
    in >> x;
    if (!in.good()) break;
    h1->Fill(x);
    nlines++;
}
printf(" ***** r1: Found %d entries\n",nlines);
in.close();

h1->SetFillColor(kGreen);
h1->GetXaxis()->SetTitle("track length, cm");
h1->GetXaxis()->SetLabelSize(0.030);
h1->GetXaxis()->SetNdivisions(205);
h1->GetYaxis()->SetLabelSize(0.030);
h1->GetYaxis()->SetNdivisions(205);
h1->Draw();

return c;

}

```

Рис. 5.1: Скрипт track1.C для построения одномерной гистограммы. Данные читаются из текстового файла.

После выдачи команды
root [] graph()

в графическом окне ROOT появится гистограмма, изображенная на рис.2.

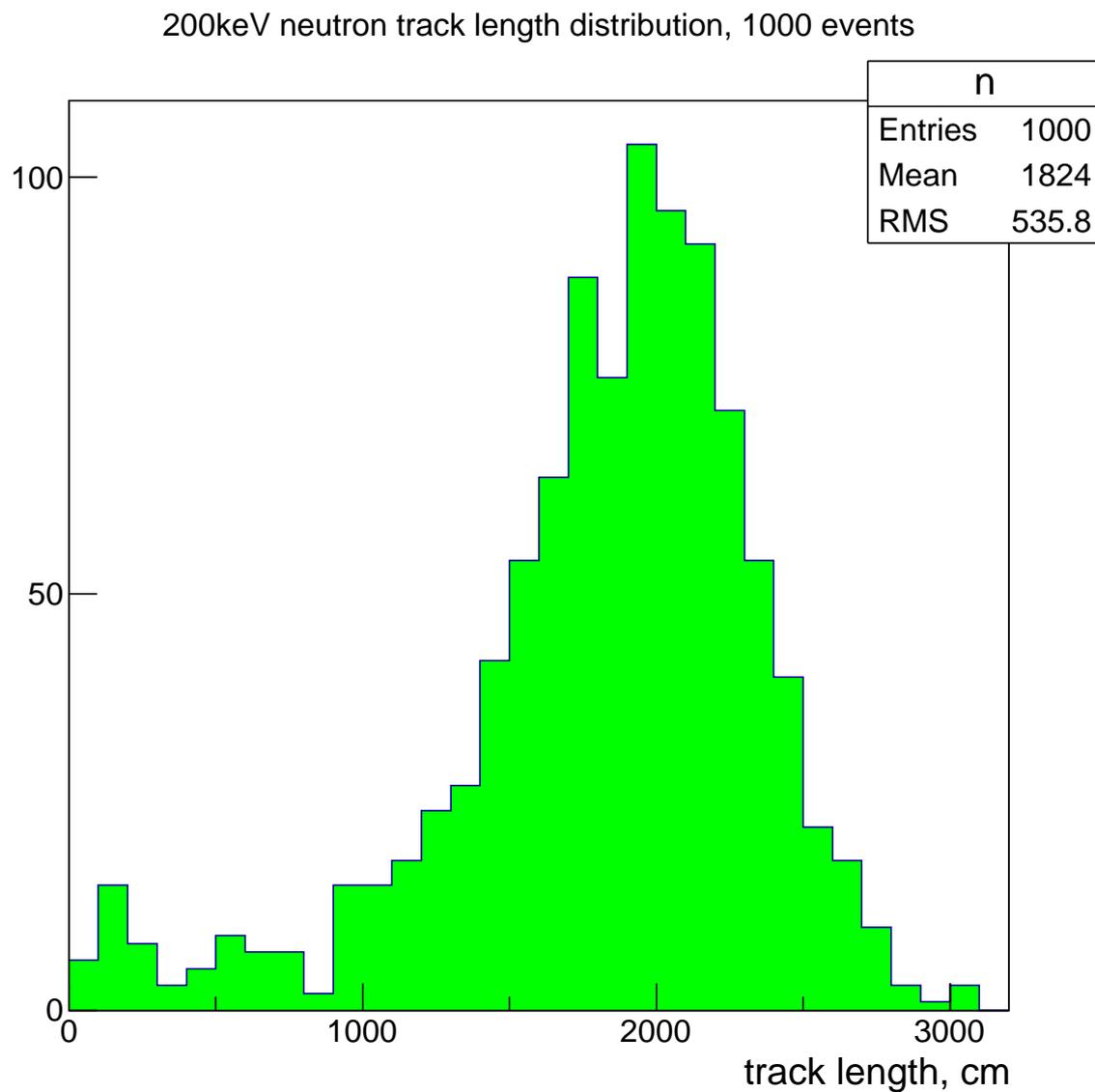


Рис. 5.2: Одномерная гистограмма, генерируемая скриптом trackl.C .

5.2.2 Двумерная гистограмма

На рис.3 приведен скрипт en-t.C, рисующий двумерную гистограмму, данные для которой берутся из файла

track.dat_1000. Последний содержит чисел, записанных в 6 столбцов. Скрипт выбирает из каждой строчки два числа и заполняет ими гистограмму.

```

TCanvas* graph()
{
    TCanvas *c = new TCanvas("c","Neutron ekin-t",
                             0,0,1000,1000);

    Int_t nlines = 0,  itype,  nev,nevold;
    Float_t x0,y0,z0,px0,py0,pz0,e0,  x,y,z,t,e,  range;
    ifstream in;

    in.open("track.dat_1000");

    TH2F *h1 = new TH2F("n","200keV neutron Ekin-t
                        distribution, 1000 events",
                        50,-3.0,3.5,50,-4.5,2.5);

    in >> x0 >> y0 >> z0 >> px0 >> py0 >> pz0 >> e0 >> itype;

    nlines = 0;
    while(1) {
        in >> nev >> x >> y >> z >> t >> e;
        if (!in.good()) break;
        h1->Fill(log10(t*0.001),log10(e));
        nlines++;
    }
    h1->Fill(log(t*0.001),log(e));

```

```
printf(" ***** r1: Found %d entries\n",nlines);
in.close();

h1->SetFillColor(kGreen);
h1->GetXaxis()->SetTitle("log10(t/1uS)");
h1->GetXaxis()->SetTitleOffset(1.6);
h1->GetXaxis()->SetTitleSize(0.030);
h1->GetXaxis()->SetLabelSize(0.020);
h1->GetXaxis()->SetNdivisions(205);
h1->GetYaxis()->SetTitle("log10(Ekin/1keV)");
h1->GetYaxis()->SetTitleOffset(1.6);
h1->GetYaxis()->SetTitleSize(0.030);
h1->GetYaxis()->SetLabelSize(0.020);
h1->GetYaxis()->SetNdivisions(205);
h1->GetXaxis()->CenterTitle();
h1->GetYaxis()->CenterTitle();
h1->GetZaxis()->SetLabelSize(0.020);

h1->Draw("LEGO2Z");
// h1->Draw("CONTZ");

return c;

}
```

Рис. 5.3: Скрипт en-t.C для построения одномерной гистограммы. Данные читаются из текстового файла.

После выдачи команды

```
root [] graph()
```

в графическом окне ROOT появится гистограмма, изображенная на рис.4.

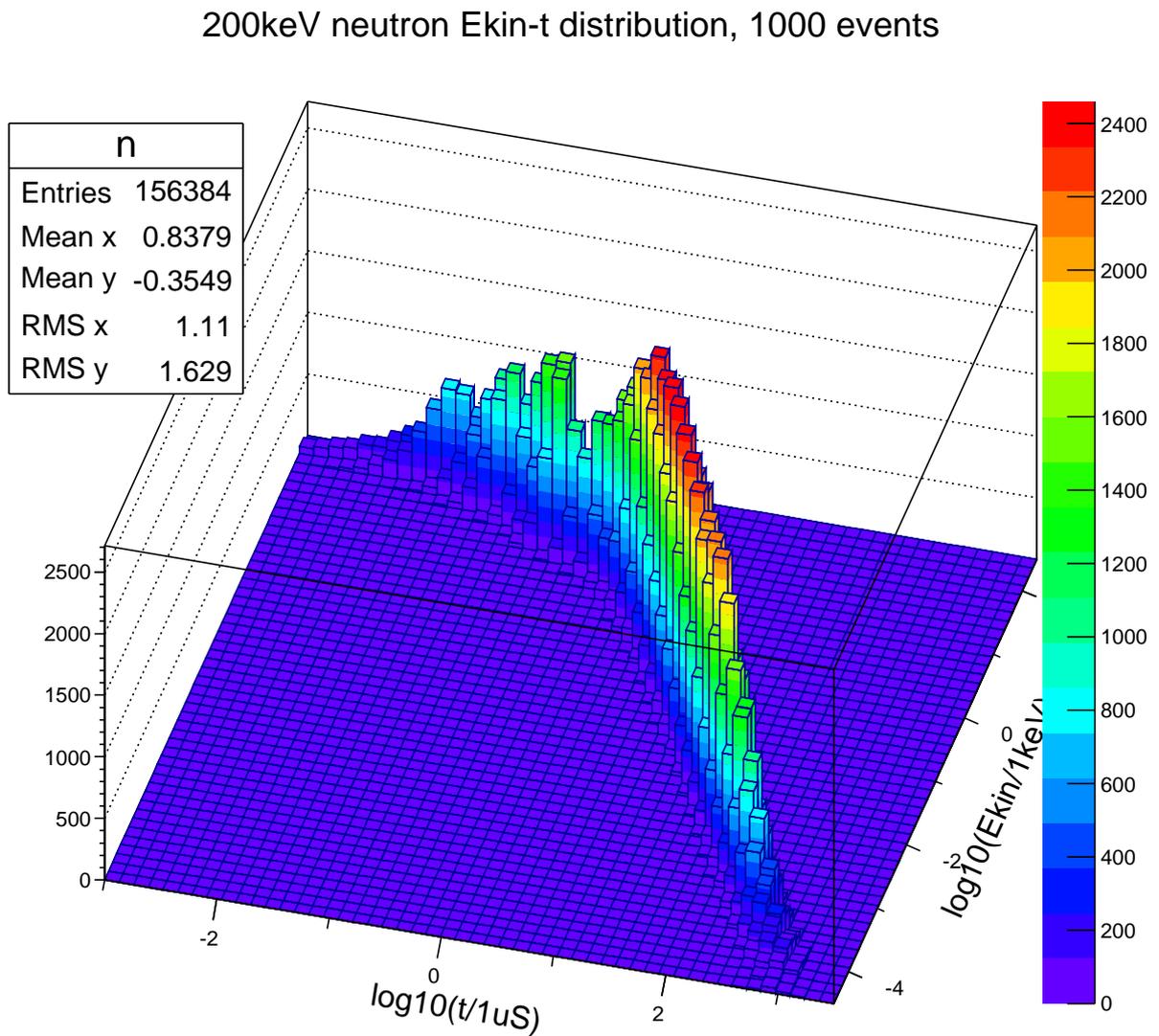


Рис. 5.4: Двумерная гистограмма, генерируемая скриптом en-t.C .

Если в скрипте на рис.3 сменить опцию рисования с "LEGO2Z" на "CONTZ" (для этого достаточно убрать признак комментария // перед `h1->Draw("LEGO2Z")`; и поставить его перед `h1->Draw("CONTZ")`), то получим ту же гистограмму в изолиниях (рис.5).

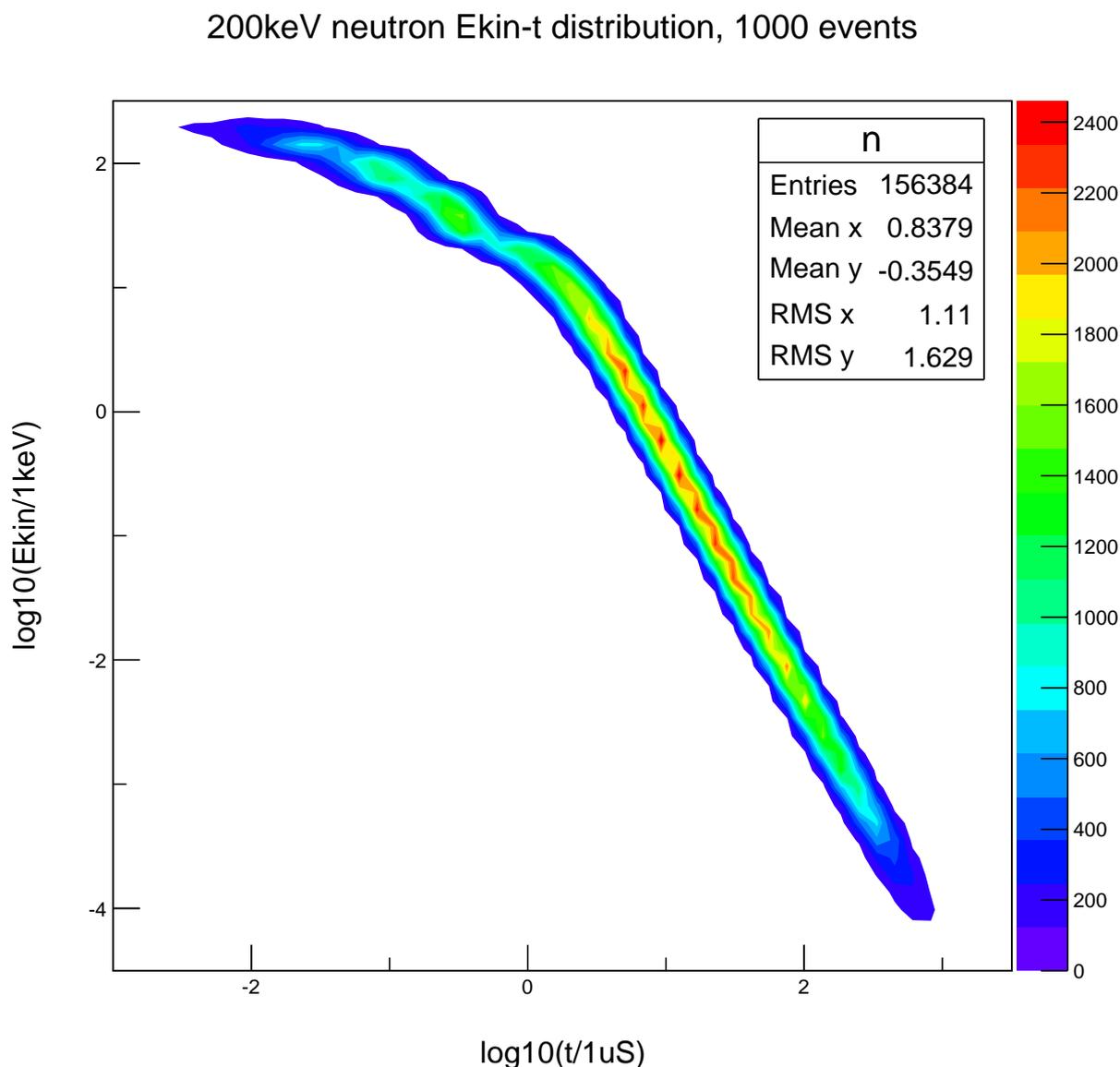


Рис. 5.5: Двумерная гистограмма, генерируемая скриптом en-t.C . Опция рисования "CONTZ".

Литература

- [1] <http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml>, Geant4 User's Guide for Application Developers, Version: geant4 10.1, Publication date 5 December 2014
- [2] Heck D and Pierog T, 2013, Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A Users Guide, KARLSRUHER INSTITUT FUER TECHNOLOGIE
- [3] С.З. Беленький, Лавинные процессы в космических лучах, 1948, ОГИЗ ГОСТЕХИЗДАТ
- [4] <http://root.cern.ch/root/html534/guides/users-guide/ROOTUsersGuideA4.pdf>, ROOT User's Guide, May 2013
- [5] Stormer, C., The polar Aurora, Clarendon Press, Oxford, 1955
- [6] Модель космоса, т.1: Физические условия в космическом пространстве, КДУ, Москва, 2007, с.518
- [7] А.М. Гальпер, Радиационный пояс Земли, Соросовский образовательный журнал, №6, 1999, с.77