

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ПАКЕТ CORSIKA – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШАЛ

Введение

Физика космических лучей давно использует атмосферу Земли как гигантский детектор частиц высоких и сверхвысоких энергий. В настоящее время несколько десятков установок, расположенных в многих странах мира, регистрируют широкие атмосферные ливни --- каскады частиц, вызванные энергичным космическим излучением.

По мере увеличения сложности экспериментальных задач и структуры установок все серьезнее становится проблема математического моделирования как самого процесса каскадного размножения частиц в атмосфере, так и реакции детекторов установок на различные типы вторичного излучения. Результаты моделирования используются для планирования эксперимента и интерпретации его результатов. Трудно сказать, кто первый осознал необходимость такого численного эксперимента, однако, сегодня он считается неотъемлемой частью эксперимента реального. Достаточно детальные расчеты проводились уже тридцать лет назад, когда возможности цифровых вычислительных машин позволили проводить статистическое моделирование ШАЛ.

Разнообразие программных средств для моделирования ШАЛ методом Монте-Карло велико: частично это пакеты, разработанные отдельными группами физиков--космиков, частично --- коды, воспринятые от ускорительных коллабораций. До недавних пор, однако, не существовало общепринятого и общедоступного программного комплекса, изначально ориентированного на разнообразные нужды экспериментаторов--исследователей ШАЛ, который, к тому же, включал бы в себя последние достижения в области моделей взаимодействия ядро-ядро и был бы сделан на достаточно высоком программистском уровне. Первым кодом, способным серьезно претендовать на это место, несомненно, является CORSIKA.

CORSIKA(COsmic Ray Simulations for KAscade) --- монте-карловская программа для изучения эволюции и свойств широких атмосферных ливней. Она была разработана для моделирования эксперимента KASCADE в Карлсруэ (Германия), нацеленном на измерение элементного состава первичного космического излучения в энергетическом диапазоне $3 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{16}$ эВ.

Программа позволяет моделировать взаимодействия и распады ядер и других адронов, мюонов, электронов и фотонов в атмосфере до энергий порядка 10^{20} эВ. Она помнит тип, энергию, положение, направление и время прихода всех вторичных частиц, рожденных в воздушном ливне и пересекающих определенный уровень наблюдения.

CORSIKA представляет собой законченный набор подпрограмм на ФОРТРАНе. Она почти полностью доступна в исходных текстах, не нуждается в дополнительных библиотеках программ для моделирования атмосферных ливней и, следовательно, может работать на любом компьютере, имеющем компилятор ФОРТРАН и достаточно оперативной памяти.

Программа состоит из четырех основных частей. Первая часть представляет собой скелет из программ общего назначения: ввода-вывода, распада частиц, прослеживания траектории частицы с учетом ионизационных потерь и отклонения частиц вследствие многократного рассеяния и влияния магнитного поля Земли. Вторая часть отвечает за взаимодействие адронов и ядер с ядрами воздуха при энергиях свыше 80 ГэВ. Третья часть моделирует взаимодействия адронов с энергиями ниже 80 ГэВ. Четвертая часть рассматривает взаимодействия электронов, позитронов и фотонов. В пакете CORSIKA имеется несколько альтернативных программных блоков, выполняющих функции трех последних частей с различной точностью и затратами машинного времени.

Для моделирования адронных взаимодействий высокой энергии можно использовать генератор столкновений ультрарелятивистских ионов VENUS Клауса Вернера, подробно моделирующий рождение, взаимодействие и фрагментацию цветных струн, или пакет HDPM Капдевиля, простой монте-карловский генератор, основанный на модели DPM (дуальной партонной модели), пытающийся воспроизвести соответствующие кинематические распределения, основываясь на эксперименте или теоретических предсказаниях. Кроме того, имеются модель министруй SIBYLL Гэйссера и Станева, модель кварк-глюонных струн QGSJET Калмыкова и Остапченко, а также вариант DPM DPMJET-II.4 Ранфта. Каждая из моделей имеет свои сечения взаимодействия адронов при энергии выше 80 ГэВ, которые могут быть выбраны независимо от собственно модели адронных взаимодействий.

Низкоэнергичные адронные взаимодействия можно моделировать или по программе GHEISHA Фезефельдта, признанной монте-карловской программе, работающей вплоть до энергий в несколько сот ГэВ, или по более простой и быстрой программе, основанной на модели ISOBAR и модели файерболов. Группа разработчиков CORSIKA рекомендует использовать программу GHEISHA для моделирования адронных взаимодействий при низких энергиях.

Электронно-фотонные каскады можно моделировать по программе EGS4 (SLAC), прямо прослеживающей траектории частиц и их взаимодействия, или рассчитывать по аналитическим аппроксимациям NKG, дающим электронные плотности в заданных точках и полное число электронов на заданном уровне.

Возможно также прямое моделирование черенковского света в воздухе, прослеживание электронных и мюонных нейтрино и антинейтрино, а также рассмотрение почти горизонтальных ливней. Для сокращения времени моделирования ливней ультравысоких энергий (свыше 10^{16} эВ) можно использовать вариант программы, осуществляющий моделирование с весами, в котором прямо прослеживается только часть вторичных частиц. Имеется также версия программы, предназначенная специально для тестирования моделей адронных взаимодействий.

Группа разработчиков пакета CORSIKA создала набор подпрограмм общего назначения, лишь немного изменила упомянутые выше программы других авторов, разработала необходимые интерфейсы между ними и довольно удобный интерфейс пользователя. Группа также постоянно занимается поддержкой пакета: поиском и исключением ошибок, модернизацией моделей и адаптацией новых пакетов, распространением пакета в мировом сообществе космиков, общением с пользователями. Она также несет ответственность за еще не обнаруженные ошибки, поэтому разработчики призывают пользователей не передавать пакет новым пользователям и, вместо этого, адресовать их непосредственно к первоисточнику.

Вместе с тем необходимо отметить, что в пакете CORSIKA в зачаточном состоянии находятся средства для описания детекторов, а средства обработки результатов отсутствуют как таковые. Последние, правда, могут легко быть заимствованы из библиотеки CERN.

1. Требования к вычислительной системе

Пакет требует для своей работы значительных вычислительных ресурсов. В зависимости от выбранной модели адронного взаимодействия и функциональной версии (NKG, EGS, CERENKOV, HORIZONTAL, TESTINT, THINNING и т.д.) может потребоваться от 20 до 60 Мб оперативной памяти. Время моделирования зависит от модели, функциональной версии и значений многочисленных параметров. Например, комбинация VENUS + EGS + CERENKOV для ливня с энергией 1 ТэВ требует нескольких минут на стандартном PENTIUM 100 MHz. Необходимое дисковое пространство сильно зависит от задачи, если использовать предлагаемый разработчиками выводной файл DATXXXXXX, содержащий информацию о каждой частице на нескольких уровнях наблюдения, то надо располагать несколькими свободными мегабайтами на каждый ливень с энергией порядка 1 ТэВ.

Такого рода ресурсами обычно располагают рабочие станции и специально оборудованные персональные компьютеры, работающие под управлением многозадачной и многопользовательской операционной системой UNIX (Linux). Даже если компьютер не располагает реальной оперативной памятью нужного размера, операционная система расширяет поле памяти за счет дискового пространства. Кроме того, многопользовательская система экономит ресурсы, позволяя использовать одни и те же исполняемые файлы и файлы данных нескольким пользователям.

2. Использование реальной вычислительной системы для выполнения задачи

В учебных целях пакет CORSIKA установлен на компьютере PENTIUM, работающем под Linux. Предполагается, что человек, выполняющий упражнения (всюду далее --- пользователь), является зарегистрированным пользователем данной машины, то есть, обладает идентификатором, знает соответствующий пароль и имеет в своем распоряжении некоторое дисковое пространство. Желательно также знание основ операционной системы UNIX (Linux). Доступ к серверу возможен с любого рабочего места --- компьютера, подключенного к глобальной сети и способного эмулировать терминал сервера.

Детально вопросы использования вычислительной системы необходимо обсудить с ведущим преподавателем.

Каталог диска сервера, в котором установлен пакет CORSIKA, содержит два подкаталога --- VENUS и QGSJET, каждый из которых содержит исполняемый модуль (соответственно, VENUS+CERENKOV и QGSJET+CERENKOV) и все необходимые для моделирования файлы данных, кроме вводного управляющего файла. Каталог также содержит оригинальное описание пакета в виде ps-файла. ps-файл можно просматривать с помощью программы (команды) ghostview, если рабочее место обеспечивает эмуляцию X-терминала (окна X-Windows) сервера.

Исполняемые файлы (программные модули, готовые к выполнению) в подкаталогах VENUS и QGSJET носят имена **cven** и **cqgs**, соответственно. В каждом из подкаталогов имеется свой файл INPUTS --- пример вводного управляющего файла. Пользователю необходимо скопировать интересующий его файл INPUTS в свой домашний каталог (или один из подкаталогов), где у него будет возможность его редактировать (изменять). Запуск программы на исполнение осуществляется одной из двух команд (в зависимости от выбранной модели адронного взаимодействия):

```
> cven < INPUTS &
```

или

```
> cqgs < INPUTS &
```

Здесь знак “>” в начале командной строки обозначает приглашение системы. Заметим, что UNIX(Linux) различает строчные и прописные буквы.

Выполнимые файлы несколько отличаются от стандартных, формирующихся из ФОРТРАН-файлов, возникающих при установке пакета. Отличия эти связаны, во-первых, с их специфической функцией --- создать файлы данных, подлежащие дальнейшей обработке (см. следующий параграф) --- и, во-вторых, с необходимостью экономии ресурсов (стандартный файл DATXXXXXX не создается) и ограничения возможностей неопытных пользователей сложной программы: не весь диапазон параметров, декларированный в описании пакета, доступен пользователю учебных версий.

Например, диапазон первичных энергий ограничен сверху значением 10^5 ГэВ, что вполне достаточно, чтобы почувствовать характерные черты воздушного ливня, но не позволит пользователю запустить слишком длинную задачу. Максимальное число ливней, моделируемых за один прогон, также ограничено и зависит от первичной энергии.

3. Управление моделированием и его результаты

Учебные модули моделируют атмосферные ливни методом прямого статистического моделирования (без применения аналитических аппроксимаций (NKG) или весов (THINNING)). Вторичные частицы прослеживаются до указанных пользователем энергетических порогов и уровня наблюдения. Релятивистские заряженные частицы генерируют черенковские фотоны, которые также прослеживаются до уровня наблюдения. Такого рода моделирование требует много процессорного времени, поэтому следует соблюдать известную осторожность при выборе параметров. Целью задачи является исследование средних характеристик атмосферных ливней, а не набор большой статистики с целью изучения флуктуаций и корреляций, поэтому число моделируемых ливней должно быть лишь достаточным для приемлемого усреднения изучаемых характеристик. Например, для усреднения поперечного распределения черенковского света от ливня с энергией 1 ТэВ достаточно около десятка ливней, для поперечного распределения мюонов или адронов на уровне моря не хватит и тысячи, так как это малочисленные компоненты ливня, к тому адроны в ливне с такой энергией до земли обычно не доходят. Можно, однако, поднять уровень наблюдения на несколько километров и получить искомый результат при разумных затратах времени.

Рекомендуется использовать диапазон первичных энергий 100 ГэВ ---- 100 ТэВ, диапазон зенитных углов (если наклонные ливни необходимы в упражнении) 0 --- 45 градусов, диапазон уровней наблюдения 0 --- $5 \cdot 10^5$ см. В качестве первичных ядер лучше использовать самые легкие -- протоны и ядра гелия. Выбор ширины ячеек гистограмм описан ниже. Остальные параметры лучше не трогать без крайней необходимости.

В результате выполнения любого из двух файлов (**cven** и **cqgs**) в каталоге пользователя (указанном в качестве параметра в поле **DIRECT** вводного файла INPUTS), создаются файлы

rd_gm --- гистограмма радиального распределения вторичных гамма-квантов,
rd_el --- гистограмма радиального распределения вторичных электронов,
rd_mu --- гистограмма радиального распределения мюонов,
rd_hd --- гистограмма радиального распределения вторичных адронов,
ad_gm --- гистограмма углового распределения вторичных гамма-квантов,
ad_el --- гистограмма углового распределения вторичных электронов,
ad_mu --- гистограмма углового распределения мюонов,
ad_hd --- гистограмма углового распределения вторичных адронов,
ard_ch --- гистограмма радиально-углового распределения черенковских фотонов.

(Все гистограммы нормированы на один ливень, то есть, поделены на число разыгранных ливней.) Под радиальным распределением понимается следующее: для каждой вторичной частицы, достигшей уровня наблюдения, вычисляется расстояние в плоскости наблюдения от точки падения оси (точки пересечения направления первичной частицы с плоскостью наблюдения); частица заносится в ту или иную ячейку той или иной гистограммы в соответствии с этим расстоянием и типом частицы. Для каждой достигшей уровня наблюдения частицы вычисляется также ее угол с вертикалью, и в соответствии с его значением частицы разбрасываются по гистограммам углового распределения. Черенковские фотоны распределяются по ячейкам двумерной гистограммы: в соответствии с расстоянием от оси и углом с вертикалью. Количество ячеек гистограммы (или каждого измерения) 20, ширина всех ячеек одинакова (в пределах гистограммы или в пределах измерения) и задается пользователем для каждой гистограммы или измерения отдельно:

в поле **RADHS** параметрами **dr_gm**, **dr_el**, **dr_mu**, **dr_hd** задаются ширины ячеек гистограмм радиальных распределений гамма-квантов, электронов, мюонов и адронов, соответственно;

в поле **ANGHS** параметрами **da_gm**, **da_el**, **da_mu**, **da_hd** задаются ширины ячеек гистограмм угловых распределений гамма-квантов, электронов, мюонов и адронов, соответственно;

в поле **RANGCH** параметрами **dr_ch**, **da_ch** задаются, соответственно, ширины радиальных и угловых ячеек радиально-углового распределения черенковских фотонов.

При выборе ширины ячеек гистограмм надо принять во внимание характерные масштабы распределений. Для радиальных распределений гамма-квантов, электронов, мюонов и черенковских фотонов это сотни метров, для адронов --- десятки метров. Угловые распределения естественно ограничиваются 1,57 радиана, но основная масса частиц и, особенно, черенковского света лежит в узком конусе с углом раствора порядка десятка градусов. Левый край гистограммы --- нулевой, правый край --- 20 ширины ячеек. Таким образом, ширина ячейки примерно равна ширине распределения, деленному на 20. Не рекомендуется задавать ширину ячейки радиальной гистограммы больше 5000 см (500 см) или меньше 500 см (50 см) для гамма-квантов, электронов, мюонов и черенковских фотонов (адронов).

Все гистограммы, кроме черенковской, есть одномерные массивы из 20 ячеек, черенковская гистограмма --- двумерный массив 20 X 20 ячеек. В ФОРТРАН-тексте они декларированы как

REAL RD_GM(20),RD_EL(20),RD_MN(20),RD_HD(20)

REAL AD_GM(20),AD_EL(20),AD_MN(20),AD_HD(20)

REAL RAD_CH(20,20)

причем левый индекс массива **RAD_CH(20,20)** соответствует радиальному измерению, а правый --- угловому. Запись в файлы производится по единому формату **10(1X,1PE10.3)**, в частности:

WRITE(79,111) ((RAD_CH(K,J),J=1,20),K=1,20)

111 FORMAT(10(1X,1PE10.3))

Поскольку при заполнении гистограммы мы теряем информацию об азимутальном угле соответствующей полярной системы координат, данные гистограммы являются усреднениями соответствующих пространственного или углового распределений по азимуту. Однако, усредненные по ансамблю ливней распределения должны быть симметричными относительно оси распределения ливней. Поэтому при моделировании только вертикальных ливней мы можем воспользоваться гистограммами для получения аппроксимации поперечного и углового распределения различных частиц ливня, что составляет содержание первых двух упражнений задачи.

В случае моделирования наклонных ливней средние поперечные и угловые распределения перестают быть симметричными относительно вертикали, и усреднение по азимуту

искажает их тем больше, чем больше зенитный угол ливня.

Если, однако, разыграть ансамбль ливней равномерно в пределах некоторого конуса направлений (ось конуса вертикальна), то результирующие средние распределения снова симметричны относительно вертикали, и мы получаем возможность проанализировать, как искажает поперечные распределения частиц экспериментальная установка, не определяющая направление прихода ливня или имеющая плохое угловое разрешение (третье упражнение).

Пространственно-угловое распределение черенковских фотонов страдает от двойного усреднения по азимутам при заполнении радиально-угловой гистограммы даже при рассмотрении только вертикальных ливней, так как на любом отличном от нуля удалении от оси ливня среднее угловое распределение черенковского света не будет симметричным относительно вертикали: приближенной осью симметрии будет некоторое направление, наклоненное "на ось" ливня. Однако, черенковская гистограмма дает возможность проследить, каким видится поперечное распределение черенковского света детекторам с различными апертурами (четвертое упражнение).

У П Р А Ж Н Е Н И Е 1

Смоделировать для некоторого уровня наблюдения и некоторого типа первичной частицы два ансамбля вертикальных ливней фиксированных энергий, E_1 и E_2 , различающихся как минимум вдвое.

- а) средствами RAW аппроксимировать поперечные распределения гамма-квантов для обоих ансамблей одной и той же модельной функцией, сравнить полученные в результате аппроксимации значения параметров модельной функции, нарисовать средствами RAW соответствующие гистограммы и аппроксимирующие функции;
- б) то же для электронов;
- в) то же для мюонов;
- г) то же для адронов;
- д) то же для угловых распределений гамма-квантов;
- е) то же для угловых распределений электронов;
- ж) то же для угловых распределений мюонов;
- з) то же для угловых распределений адронов.

У П Р А Ж Н Е Н И Е 2

Смоделировать для некоторого уровня наблюдения и некоторой первичной энергии два ансамбля вертикальных ливней, один --- от протонов, другой --- от гамма-квантов.

- а) средствами RAW аппроксимировать поперечные распределения вторичных гамма-квантов для обоих ансамблей одной и той же модельной функцией, сравнить полученные в результате аппроксимации значения параметров модельной функции, нарисовать средствами RAW соответствующие гистограммы и аппроксимирующие функции;
- б) то же для электронов;
- в) то же для мюонов;
- г) то же для адронов;
- д) то же для угловых распределений вторичных гамма-квантов;
- е) то же для угловых распределений электронов;
- ж) то же для угловых распределений мюонов;
- з) то же для угловых распределений адронов.

У П Р А Ж Н Е Н И Е 3

Смоделировать для некоторого уровня наблюдения, некоторой первичной энергии и некоторого типа первичной частицы два ансамбля ливней, один --- вертикальный, другой --- равномерный по некоторому вертикальному конусу.

- а) средствами RAW аппроксимировать поперечные распределения гамма-квантов для обоих ансамблей одной и той же модельной функцией, сравнить полученные в результате аппроксимации значения параметров модельной функции, нарисовать средствами RAW соответствующие гистограммы и аппроксимирующие функции;
- б) то же для электронов;
- в) то же для мюонов;
- г) то же для адронов.

У П Р А Ж Н Е Н И Е 4

Смоделировать для некоторого уровня наблюдения, некоторой первичной энергии и некоторого типа первичной частицы ансамбль вертикальных ливней (можно использовать один из уже полученных для 1, 2 или 3 упражнения). Преобразовать исходную радиально-угловую гистограмму, дифференциальную по радиусу и углу, в интегральную по углу, то есть создать новую гистограмму, ячейки которой *при каждом фиксированном значении радиального индекса* будут заполнены следующим образом: первая ячейка по углу содержит то же, что и соответствующая ячейка исходной гистограммы; вторая ячейка по углу содержит сумму содержимого первых двух ячеек исходной гистограммы; ... последняя ячейка по углу содержит сумму всех ячеек исходной гистограммы.

Средствами RAW аппроксимировать поперечные распределения черенковского света при нескольких (3--5) значениях углового индекса интегральной по углу гистограммы (то есть при нескольких значениях апертуры детектора) одной и той же модельной функцией, сравнить полученные в результате аппроксимации значения параметров модельной функции, нарисовать средствами RAW соответствующие гистограммы и аппроксимирующие функции.