

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

А.А. БОГДАНОВ, К.О. ЛАПИДУС, С.Л. ТИМОШЕНКО

**ПРАКТИКУМ ПО МЕТОДАМ ОБРАБОТКИ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

*Рекомендовано УМО “Ядерные физика и технологии”
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 539.1.01.(076.5)

ББК 22.38я7

Б73

Богданов А.А., Лapidус К.О., Тимошенко С.Л. **Практикум по методам обработки и моделирования в современных экспериментах по физике высоких энергий**: учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008. 80 с.

Практикум посвящен компьютерным методам обработки и моделирования в экспериментах по физике высоких энергий. Практикум состоит из 3 глав, каждая из которых описывает один из аспектов такого моделирования. Первая глава посвящена пакету программ ROOT – по существу, целой среде, обеспечивающей базовый набор C++ классов и предназначенной для хранения и представления данных, работы с научной графикой и т.п. Во второй главе рассматриваются программы – генераторы физических событий, возникающих при взаимодействии различных частиц высоких энергий. В третьей главе описан GEANT3 – пакет программ, предназначенных для моделирования прохождения элементарных частиц через экспериментальную установку. Каждая из глав заканчивается планом лабораторной работы соответствующей тематики и списком литературы. Описанные программы охватывают, по существу, весь цикл работ, который обычно проводится при моделировании и обработке данных ускорительных и космических экспериментов по физике элементарных частиц.

Лабораторный практикум предназначен для студентов старших курсов, обучающихся по специальностям «Физика элементарных частиц» и «Экспериментальные методы ядерной физики».

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы МИФИ.

Рецензент к.ф.-м.н. В.О. Тихомиров (ФИАН)

ISBN 978-5-7262-1067-4

© *Московский инженерно-физический институт
(государственный университет) 2008*

1. РАБОТА В ROOT

1.1. Общие сведения

К концу 20-го века все возрастающая сложность экспериментальных установок и увеличение объема накапливаемых данных требовали освоения научным сообществом новых, более эффективных инструментов обработки информации. Речь идет о языке программирования C++, который к середине 90-х годов стал широко использоваться для создания коммерческих программных продуктов. Принципиальной особенностью этого языка является поддержка методов объектно-ориентированного программирования (ООП).

Сотрудники Европейской организации ядерных исследований (CERN) Рене Бран и Фонс Ридмайкерс в 1994 г. занялись исследованием возможностей C++ применительно к задачам ядерного эксперимента. Результатом этой работы явилось создание программного пакета ROOT. К настоящему времени ROOT претерпел впечатляющую эволюцию и стал по сути дела стандартным программным обеспечением, используемым для хранения и обработки данных ускорительного эксперимента.

Официальный Web-сайт проекта ROOT расположен по адресу <http://root.cern.ch>. На этом сайте содержится информация о текущем релизе.

Наилучшим справочным материалом по ROOT является блестяще написанное руководство пользователя, которое доступно по адресу <http://root.cern.ch/root/doc/RootDoc.html>.

Поскольку ROOT реализован на C++, то следует напомнить некоторые понятия этого языка, необходимые для практической работы.

В самом общем виде идея ООП заключается в том, чтобы моделировать окружающий мир как совокупность взаимодействующих объектов. В C++ такой подход реализуется с помощью классов.

Класс является типом данных, определяемым пользователем, и представляет собой модель реального объекта в виде данных и функций для работы с ними. Таким образом, класс — это тип данных, который объединяет переменные и функции. Функции класса называются функциями-членами или методами. Переменные класса называются данными-членами или полями. Принадлежность метода `DoSomething` классу `MyClass` обозначается так: `MyClass::DoSomething`.

Переменная соответствующего типа называется объектом, т. е. объект — это конкретный представитель, экземпляр данного класса.

При работе с объектами часто используются указатели. Указателем называется переменная, хранящая адрес памяти, по которому располагается другая переменная. Тип указателя — указатель на переменную данного типа.

Создание и определение указателя обычно осуществляется с помощью операции `new`:

```
MyClass *pointer = new MyClass (...);
```

Здесь с помощью операции `new` выделяется объем динамической памяти, необходимой для размещения переменной типа `MyClass` (т. е. объекта), и адрес этого участка памяти записывается в соответствующий указатель — переменную `pointer`.

Обращение к методам класса через указатель производится с помощью операции `"->"`. Предположим, класс `MyClass` имеет метод `DoSomething(...)` (троеточие обозначает возможные параметры и опции этого метода). Тогда обращение к этому методу с помощью указателя `pointer` выглядит следующим образом:

```
pointer->DoSomething (...);
```

В случае работы непосредственно с объектом класса MyClass, обращение к методам производится через ". " :

```
MyClass cl;  
cl.DoSomething(...);
```

Перейдем теперь собственно к ROOT. Полное название этого программного пакета “An Object Oriented Data Analysis Framework” — объектно-ориентированная среда для анализа данных. ROOT реализован как набор библиотек классов, обеспечивающих необходимую функциональность: гистограммы, функции, графики, деревья и т. д. В рамках настоящего курса будут рассмотрены классы ROOT, обеспечивающие работу с гистограммами, функциями, файлами, графиками, деревьями. Описание классов ROOT для различных версий пакета находится по адресу <http://root.cern.ch/root/Reference.html>.

Кроме того, в состав ROOT входит интерпретатор CINT, который воспринимает команды ROOT и выражения C/C++.

Существуют два варианта работы с ROOT. Первый состоит в том, чтобы работать с программой root.exe в сессионном режиме. Второй вариант заключается во включении библиотек классов ROOT в собственные программы.

ROOT имеет принятые соглашения по наименованию различных типов переменных:

имена классов начинаются с T	TF1, TFile
переменные типа «не класс» заканчиваются на _t	Int_t
поля начинаются с f	fIntegral
методы начинаются с прописной	Fill()
константы начинаются с k	kRed
глобальные переменные начинаются с g	gStyle

В ROOT используются predetermined машинно-независимые типы переменных. К наиболее употребляемым типам относятся:

Char_t	знаковый символьный	1 байт
Int_t	знаковый целый	4 байта
Float_t	вещественный	4 байта
Double_t	вещественный	8 байт
Bool_t	логический (0 ложь, 1 истина)	

1.2. Первые шаги в ROOT. Скрипты

Для начала работы в ROOT наберите в командной строке

```
$ root
```

Эта команда запустит интерактивную сессию работы с ROOT (при условии, что программа установлена и правильно настроены соответствующие переменные окружения).

Для выхода из программы следует набрать

```
root[] .q
```

(далее root[] будет означать, что команды вводятся в командной строке ROOT).

Как уже обсуждалось, ROOT имеет встроенный командный интерпретатор CINT. CINT воспринимает три типа команд.

1. Собственно команды CINT начинаются с ". "

.? вывести список всех команд

.L <filename> загрузить файл filename

.x <filename> загрузить и выполнить файл filename

2. C/C++ выражения в соответствии с синтаксисом языка

```
Int_t a = 8
```

```
a++
```

```
Int_t b=a*2
```

3. Команды SHELL начинаются с ". !"

```
.! pwd
```

Подобно командному интерпретатору ОС Linux, оболочка ROOT имеет встроенную историю команд, для навигации по которой следует использовать клавиши «вверх» и «вниз».

Приведем пример простейшей сессии работы в ROOT: создания гистограммы, заполнения ее гауссовым распределением и рисования гистограммы.

Сначала создадим объект класса TH1F и указатель h1 на этот объект:

```
root[] TH1F *h1 = new TH1F("h1", "Random  
gauss", 100, -2, 2)
```

Далее с помощью метода FillRandom заполним гистограмму значениями, распределенными по гауссу:

```
root[] h1->FillRandom("gaus", 1000)
```

Нарисуем гистограмму:

```
root[] h1->Draw()
```

Обратите внимание на то, что интерпретатор CINT позволяет опускать точки с запятой после команд.

Очевидно, работа в интерактивной сессии может быть полезна для небольших задач, поскольку каждый раз необходимые команды приходится набирать вручную (или отыскивать в истории команд). Для большей функциональности необходимо иметь возможность писать скрипты, т.е. последовательности команд, сохраненные в файле. В ROOT различается два типа скриптов: именованные и неименованные.

Неименованные скрипты представляют собой простую последовательность команд для CINT, заключенную в фигурные скобки. Пусть файл MyMacro.C содержит следующий код:

```
{  
    #include <iostream>  
    using namespace std;
```

```

    for (Int_t i=0; i<10; i++) {
        cout<<i<<endl;
    }
}

```

Запуск такого скрипта в интерактивной сессии осуществляется командой `.x`:

```
root[] .x MyMacro.C
```

По умолчанию ROOT будет запускать скрипт из текущей директории или из директории `$ROOTSYS/macros`. В командной строке ROOT можно задать полное имя скрипта, который следует выполнить, например

```
root[] .x /home/user2/rootscripts/MyMacro.C
```

Теперь создадим скрипт, содержащий определение функции:

```

void drawhist() {
    TH1F *h1 = new TH1F("h1", "simplest
histo", 10, 0, 10);
    h1->Fill(3, 3);
    h1->Fill(4, 2);
    h1->Fill(5, 1);
    h1->Draw();
}

```

Такой скрипт является именованным. Прежде чем выполнить функцию `drawhist()`, нужно загрузить скрипт в память:

```

root[] .L MyNamedMacro.C
root[] drawhist()

```

Обратите внимание, что в отличие от работы в режиме интерактивной сессии, в скриптах требуется ставить точки с запятой после каждой команды, в соответствии с синтаксисом C/C++.

Команды ROOT, которые будут приводиться далее, можно использовать как в режиме интерактивной сессии, так и в скриптах.

В заключение следует упомянуть о возможности преобразования данных HBOOK/PAW в ROOT-файлы. Для этого в составе ROOT существует специальная утилита `h2root`. Эта утилита автоматически преобразует гистограммы, `ntuples`, содержащиеся в HBOOK-файле, в соответствующие объекты ROOT и записывает их в новый файл.

Синтаксис утилиты `h2root` (в консольной строке ОС Linux)

```
$ h2root <hbook file> <root file>
```

где `hbook file` означает имя файла HBOOK, а `root file` имя выходного ROOT-файла.

1.3. Гистограммы (I)

Гистограммы в ROOT реализованы как иерархия классов, наследующих корневому классу `TH1`. ROOT поддерживает одномерные, а также двухмерные и трехмерные гистограммы.

Начнем обсуждение с одномерных гистограмм. Наиболее употребляемым на практике классом является `TH1F`, это класс одномерных гистограмм, на содержимое бина (ячейки) которых отводится 4 байта (максимальная точность 7 знаков).

Общий синтаксис создания гистограммы

```
TH1F *h1 = new TH1F("HistName", "Histogram title",  
Nbins, xmin, xmax);
```

Конструктору гистограммы передается 5 параметров.

1. `HistName` — имя гистограммы, оно не должно содержать пробелов.

2. `Histogram title` — заголовок гистограммы.

3. `Nbins` — целое число бинов в гистограмме.

4 и 5. `xmin` и `xmax` — левая и правая граница изменения величины по оси X.

Для внесения значений в гистограмму используется метод `Fill(value)`, где `value` — значение, которое требуется занести. Этот метод увеличивает содержимое бина, к которому принадлежит значение `value`, на единицу. Иногда требуется внести значение с некоторым весом, это делается с помощью метода `Fill(value, w)`, где `w` — вес. Вес может быть отрицательной величиной.

В качестве примера использования класса `TH1F` создадим одномерную гистограмму, имеющую диапазон по `X` от 0 до 10, разбитый на 20 бинов.

```
TH1F *h1 = new TH1F("h1", "My histo", 20,0,10);
```

Обратите внимание, что очень часто имя гистограммы совпадает с именем указателя, но делается это исключительно для удобства работы и не является необходимым требованием. Заголовок гистограммы обычно содержит более развернутую информацию.

Заполним гистограмму значениями, последовательно применяя метод `Fill`:

```
h1->Fill(5); h1->Fill(2); h1->Fill(5.6);  
h1->Fill(7); h1->Fill(6.1); ...
```

Для рисования гистограммы используется метод `Draw()`:

```
h1->Draw();
```

В методе `Draw()` можно задавать различные опции рисования гистограмм. Например, если выполнить

```
h1->Draw("C"),
```

то через точки, соответствующие значениям бинов, будет проведена кривая. Опция "P" — нарисовать маркеры в каждом бине, "E" — нарисовать погрешности значений бинов. Опции можно совмещать, безо всяких пробелов, например,

```
h1->Draw("CP")
```

Предположим, создана некоторая другая гистограмма, указатель на которую `h2`, и хотим построить эту гистограмму в том же окне.

Это часто бывает необходимо, чтобы визуально сравнить две гистограммы (например, сигнал и фон). Для этого в методе Draw нужно указать параметр "same".

```
h2->Draw("same")
```

Поле, на которое выводятся графические объекты в ROOT, называется canvas (определяется классом TCanvas).

Объект, например гистограмма, рисуется на текущем активном canvas. Если canvas не существует, то он создается автоматически и имеет по умолчанию имя c1.

Чтобы разделить canvas на несколько частей, можно воспользоваться методом Divide(k,l), где k и l — число разбиений по горизонтали и вертикали соответственно. Чтобы выбрать, на какой части canvas'a следует рисовать объект, можно воспользоваться методом cd(n), где n — номер части. Разделы нумеруются слева направо, сверху вниз.

Пример

```
TCanvas *MyC = new TCanvas ("MyC", "Test canvas",  
1);
```

```
MyC->Divide(2,2);
```

```
MyC->cd(1);
```

```
h1->Draw();
```

Чтобы сохранить текущее изображение на canvas на диск, следует выбрать указателем мышки File menu/Save As и далее указать необходимый формат файла.

1.4. Сложение, деление и умножение гистограмм

Методы Add(), Divide() и Multiply() позволяют складывать, делить и умножать гистограммы.

Пусть есть две гистограммы, указатели на которых h1 и h2.

Чтобы добавить к h1 гистограмму h2:

```
h1->Add(h2)
```

Можно добавить h2 к h1 с некоторым весом w:

```
h1->Add(h2, w)
```

Вычесть h2 из h1:

```
h1->Add(h2, -1)
```

Важно понимать, что при этом происходит побиновое сложение, следовательно, складывать (равно как умножать и делить) можно только гистограммы с одинаковым числом бинов.

Аналогично осуществляется побиновое деление и умножение гистограмм:

```
h1->Divide(h2)
```

```
h1->Multiply(h2)
```

ROOT позволяет также умножать и делить гистограммы на функцию. Для этого следует задать необходимую функцию. Работу с функциями одного аргумента в ROOT обеспечивает класс TF1. Создание функции происходит следующим образом:

```
root[] TF1 *f1 = new TF1 ("f1", "formula",  
xmin, xmax);
```

Первый параметр задает имя функции. Параметр formula собственно задает функциональную зависимость, например, это может быть $x*x*\exp(-x)$, $\sin(x)$, и т. д. Третий и четвертый параметр задают область определения функции.

Чтобы умножить или поделить гистограмму на функцию:

```
h1->Multiply(f1) или h1->Divide(f1)
```

1.5. Прочие аспекты работы с гистограммами

Чтобы создать идентичную копию какой-либо гистограммы (клонировать гистограмму), следует использовать метод Clone():

```
TH1F *h1_clone = (TH1F*)h1->Clone()
```

Однако получим две гистограммы с одинаковыми именами. Чтобы переименовать гистограмму, нужно сделать следующее

```
h1_clone->SetName("h1_clone")
```

Чтобы получить интегральное значение содержимого гистограммы

```
h1->Integral()
```

Чтобы нормировать гистограмму на величину norm.

```
Double_t scale = norm/h1->Integral()
```

```
h1->Scale(scale)
```

Чтобы сделать разбиение гистограммы более крупным

```
h1->Rebin(N);
```

По умолчанию этот метод сольет два соседних бина в один.

Чтобы дать заголовки осям X, Y, нужно сначала «взять» соответствующую ось, а затем использовать метод SetTitle:

```
h1->GetXaxis()->SetTitle("X axis title");
```

```
h1->GetYaxis()->SetTitle("Y axis title");
```

1.6. Фитирование гистограмм

Фитирование гистограмм может осуществляться двумя способами: через графический интерфейс FitPanel и в командном режиме.

Чтобы воспользоваться FitPanel в интерактивном режиме, следует кликнуть правой кнопкой мыши по нарисованной гистограмме, далее выбрать в появившемся меню пункт FitPanel. В верхней части открывшейся FitPanel можно выбрать желаемую для фита функцию: «polN», где N принимает значения от 0 до 9 соответствует полиномам порядка N, «gaus», «landau» — распределению Гаусса и Ландау соответственно; «expo» задает экспоненциальное распределение, «userg» — определенное пользователем.

В нижней части панели находится горизонтальный ползунок, который позволяет варьировать диапазон фитирования.

Под ползунком кнопка Fit выполняет собственно фитирование, Reset выставляет все параметры в значения по умолчанию, Close закрывает окно FitPanel.

По нажатию кнопки Fit программа выполняет фитирование гистограммы выбранной функцией с учетом заданных пользователем параметров и диапазона.

Вывод результатов фитирования происходит в окне, в котором была запущена интерактивная сессия ROOT. Эта распечатка дает весьма подробную информацию. Рассмотрим наиболее важную с практической точки зрения часть вывода.

Результаты фитирования представлены в виде таблицы значений. В полях NO. и NAME указывается номер параметра и его наименование, если такое имеется. В полях VALUE и ERROR приводятся значения найденных параметров функции, обеспечивающих правильную «подгонку» к значениям гистограммы и погрешности найденных значений.

Приведем пример вывода результатов фитирования гистограммы гауссовым распределением, которое имеет три параметра с именами Constant, Mean и Sigma.

NO.	NAME	VALUE	ERROR
1	Constant	1.39752e+03	8.54896e+00
2	Mean	6.14381e+01	8.84769e-02
3	Sigma	1.58783e+01	1.01910e-01

Для фитирования в режиме командной строки, или в скрипте, применяется метод `TH1F::Fit(f1, xmin, xmax)`. Существует возможность фитирования функцией, встроенной в ROOT, или использования собственных функций.

Например, чтобы фитировать гистограмму функцией Гаусса:
`h1->Fit("gaus")`

В ROOT имеются следующие встроенные функции:

1. `gaus` Функция Гаусса: $f(x) = p_0 * \exp(-0.5 * ((x-p_1)/p_2)^2)$
2. `exp` Экспонента: $f(x) = \exp(p_0 + p_1 * x)$
3. `polN` Полином степени N: $f(x) = p_0 + p_1 * x + p_2 * x^2 + \dots + p_N * x^N$.
4. `landau` Функция Ландау

В этих функциях p_0, \dots, p_N — параметры, которые предполагается отыскать в процессе фитирования.

Существует также возможность фитирования функцией, которую задает сам пользователь.

Пример создания функции $\cos(x)$, определенной в диапазоне (-3,5):

```
TF1 *f1 = new TF1("f1", "cos(x)", -3, 5);
```

Нарисовать график функции очень просто:

```
f1->Draw();
```

Создать функцию, которая содержала бы свободные параметры, можно так:

```
TF1 *f1 = new TF1("f1", "[0]*sin(x)*exp(-[1]*x)", 0, 10);
```

Здесь [0], [1] являются параметрами функции.

Чтобы теперь произвести фитирование гистограммы:

```
h1->Fit(f1);
```

Чтобы занести значения результатов фита в переменные для последующего использования, необходимо использовать соответствующие методы «взятия» параметров. Например, чтобы извлечь параметр χ^2 , характеризующий качество фита

```
Double_t chi2 = f1->GetChisquare()
```

найти параметр [1] и его погрешность:

```
Double_t par1 = f1->GetParameter(1)
```

```
Double_t par1_error = f1->GetParError(1)
```

1.7. Гистограммы (II)

Сохранение гистограмм на диск. Чтобы иметь возможность записать гистограмму в файл на диске, нужно, прежде всего, создать этот файл. В ROOT файлы представлены классом `TFile`. ROOT-файлы имеют расширение `".root"`.

Создание файла (объекта класса `TFile`)

```
TFile f("histos.root", "new")
```

Первым параметром конструктора является имя файла (в данном случае `histos.root`).

Второй параметр является опцией создания(открытия) файла:

`new` или `create` — создать файл; если файл с таким именем уже существует, он не будет открыт;

`recreate` — создать файл; если файл с таким именем уже существует, он будет перезаписан;

`update` — открыть файл для записи; если файла с таким именем не существует, он будет создан;

`read` — открыть файл для чтения (по умолчанию).

Созданный (или открытый) таким образом файл становится текущей ROOT-директорией. Изначально, после запуска ROOT, текущей директорией является сама сессия ROOT. Общее правило заключается в том, что последний созданный файл есть текущая директория.

В ROOT имеется глобальная переменная `gDirectory`, указывающая на текущую директорию.

Чтобы показать текущую директорию

```
gDirectory->pwd() или .pwd
```

Показать содержимое директории

```
gDirectory->ls() или .ls
```

Сменить директорию позволяет команда `TFile::cd()`.

Закреть файл можно командой `TFile::Close()`.

Приведем пример, поясняющий работу с текущей ROOT-директорией.

```
root [] .pwd
Current directory: Rint:/
root [] TFile f1("file1.root","recreate")
root [] .pwd
Current directory: file1.root:/
root [] TFile f2("file2.root","recreate")
root [] .pwd
Current directory: file2.root:/
root [] f1.cd()
root [] .pwd
Current directory: file1.root:/
root [] f1.Close()
root [] .pwd
Current directory: Rint:/
```

Запись гистограммы (равно как и других объектов), осуществляется методом `TN1F::Write()`.

Пример сохранения гистограммы в файл `histos.root`:

```
TFile f("histos.root","recreate");
TN1F *h1 = TN1F h1("hgaus", "histo from a
gaussian",100,-3,3);
h1->FillRandom("gaus",10000);
h1->Write();
```

Можно записать сразу все объекты в текущей директории командой `TFile::Write()`

```
f->Write();
```

Чтение объекта производится методом `TFile::Get("name")` этот метод возвращает указатель на объект с именем `name`.

Пример. Чтобы прочитать гистограмму, сохраненную ранее в файле `histos.root`:

```
TFile f("histos.root");  
TH1F *h = (TH1F*)f.Get("hgaus");
```

Обратите внимание, что необходимо приведение к нужному типу указателя (“cast”). Далее можно работать с гистограммой `hgaus` через указатель `h`.

1.8. Двухмерные гистограммы

Работа с двухмерными гистограммами аналогична одномерному случаю. Основным, применяемым классом, является класс `TH2F`, отвечающий гистограмме с максимальной точностью в 7 знаков.

При создании двухмерной гистограммы, в отличие от одномерной, необходимо указать число бинов как по оси X , так и по оси Y , а также соответствующие диапазоны изменения величин:

```
TH2F *h2 = new TH2F("h2", "h2 title", NbinsX,  
xmin, xmax, NbinsY, ymin, ymax);
```

Методу `Fill()` также следует передавать два значения (x, y) и, опционально, вес:

```
h2->Fill(1.2, 3.7)  
h2->Fill(1.2, 3.7, 5)
```

Применение метода `Draw()` для графического отображения гистограммы ничем не отличается от одномерного случая:

```
h2->Draw()
```

По умолчанию, метод `Draw()` отображает двухмерную гистограмму как «облако» точек, пропорциональное содержимому каждой клетки в пространстве (x, y). Часто употребляемыми опциями метода `Draw()` являются "LEGO", "SURF1", "SURF2".

Параметр "LEGO" позволяет отобразить гистограмму в трехмерном виде, в котором содержимое каждой клетки отображается в виде «башни» соответствующей высоты.

Параметр "SURF1" отображает гистограмму в виде трехмерной «сетчатой» поверхности.

Если задать опцию "TEXT", то в каждой клетке двухмерной гистограммы будет напечатано числовое значение ее содержимого.

1.9. Графики

Работа с графиками обеспечивается классом TGraph. Для создания графика нужно определить два массива, содержащие n значений абсцисс и ординат точек.

Создадим график, который содержит 20 точек, удовлетворяющих функции $y = 10 \cdot \sin(x+0.2)$.

```
Int_t n = 20;
Double_t x[n], y[n];
for (Int_t i=0; i<n; i++) {
    x[i] = i*0.1;
    y[i] = 10*sin(x[i]+0.2);
}
TGraph *gr1 = new TGraph (n, x, y);
```

Аналогично гистограмме и функции, график рисуется с помощью метода Draw()

```
gr1->Draw("ACP")
```

В методе Draw() могут быть использованы различные опции, наиболее важные среди них:

- A производится рисование координатных осей
- L точки графика соединяются ломаной линией

- С точки графика соединяются плавной кривой
- * каждая точка отмечается звездочкой
- Р в каждой точке отображается маркер текущего стиля.

Изменить стиль маркера можно командой `gr1->SetMarkerStyle(N)`, где N обозначает номер стиля.

Опции не зависят от регистра и могут указываться слитно без пробелов.

Пример скрипта, создающего график $y(x)=10*\sin(x+0.2)$ и обеспечивающего его рисование

```
{
    Int_t n = 20;
    Double_t x[n], y[n];
    // создаются массивы значений x и y
    for (Int_t i=0; i<n; i++) {
        x[i] = i*0.1;
        y[i] = 10*sin(x[i]+0.2);
    }
    // создается график
    TGraph *gr3 = new TGraph(n,x,y);
    TCanvas *c1 = new TCanvas ("c1","Graph Draw
Options",200,10,600,400);
    // задается стиль маркера и рисуется график
с координатными осями,
    // точки графика соединены ломаной и каждая
точка маркируется
    // в соответствии с заданным стилем
    gr3->SetMarkerStyle(21);
    gr3->Draw("APL");
}
```

Чтобы наложить два графика на одной картинке, следует в методе Draw для второго графика опустить параметр "A", т.е. не рисовать новых осей координат. Пример:

```
{
Int_t n = 20;
Double_t x[n], y[n], x1[n], y1[n];
for (Int_t i=0; i<n; i++) {
    x[i] = i*0.5;
    y[i] = 5*cos(x[i]+0.2);
    x1[i] = i*0.5;
    y1[i] = 5*sin(x[i]+0.2);
}
TGraph *gr1 = new TGraph(n,x,y);
TGraph *gr2 = new TGraph(n,x1,y1);
TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","Two
Graphs",200,10,600,400);
gr1->SetLineColor(4);
gr1->Draw("AC*");
// совмещаем два графика, опустив опцию "A" у
второго
gr2->SetLineWidth(3);
gr2->SetMarkerStyle(21);
gr2->SetLineColor(2);
gr2->Draw("CP");
}
```

Для создания графиков с погрешностями точек используется класс TGraphErrors. Пример:

```

{
    c1 = new TCanvas("c1", "A Simple Graph with
error bars", 200, 10, 700, 500);
    c1->SetFillColor(42);
    c1->SetGrid();
    c1->GetFrame()->SetFillColor(21);
    c1->GetFrame()->SetBorderSize(12);
    // создаются массивы значений
    Int_t n = 10;
    Float_t x[n] = {-
.22, .05, .25, .35, .5, .61, .7, .85, .89, .95};
    Float_t y[n] =
{1, 2.9, 5.6, 7.4, 9, 9.6, 8.7, 6.3, 4.5, 1};
    // создаются массивы погрешностей
    Float_t ex[n] =
{.05, .1, .07, .07, .04, .05, .06, .07, .08, .05};
    Float_t ey[n] =
{.8, .7, .6, .5, .4, .4, .5, .6, .7, .8};
    // создается и рисуется график
    TGraphErrors *gr = new
TGraphErrors(n, x, y, ex, ey);
    gr->SetTitle("TGraphErrors Example");
    gr->SetMarkerColor(4);
    gr->SetMarkerStyle(21);
    gr->Draw("ALP");
    c1->Update();
}

```

В том случае, если погрешности точек несимметричны, используется класс `TGraphAsymmErrors` (подробнее см. Руководство пользователя)

1.10. Деревья

Наиболее важный раздел ROOT — работа с деревьями (соответствующий класс называется `TTree`). Дерево является обобщением `ntuple` в PAW и дает более широкие возможности. Напомним, что `ntuple` можно представить как пронумерованную таблицу числовых значений. Каждая строка в такой таблице пронумерована и соответствует так называемому вхождению (часто каждое вхождение отвечает одному реальному или смоделированному событию). Дерево представляет собой аналогичную структуру, но принципиальное отличие от `ntuple` состоит в том, что содержимое дерева не ограничивается переменными типа `float`, а может включать другие типы данных, вплоть до классов. Столбцы таблицы, содержащие значения одного сорта, для дерева называются ветвями.

Создание дерева:

```
TTree t1("t1", "Simple Tree")
```

Для того чтобы добавить к дереву ветвь, используется метод `TTree::Branch`

```
t1.Branch("px", &px, "px/F")
```

Первый параметр метода – это имя ветви. Вторым параметром задается адрес, по которому будет читаться переменная. (Напомним, что символ `&` в языке C означает операцию взятия адреса.) Третий параметр характеризует лист (значение) на дереве в формате имя/тип. Тип определяется символом. Наиболее употребительными являются "F" (`Float_t`), "I" (`Int_t`).

Таким образом, в примере выше создается ветвь с именем "px", содержащая данные типа `Float_t`. Значения в эту ветвь будут заноситься из переменной `px`.

Чтобы занести значения переменных в дерево, используется метод `Fill()`.

Проиллюстрируем сказанное на примере скрипта, создающего простое дерево и записывающего его в файл.

```
{
    //создается файл, в котором будет храниться
дерево
    TFile f("tree1.root", "recreate");
    //создается собственно дерево
    TTree t1("t1", "Simple Tree");
    //создаются необходимые переменные
    Float_t px, py, pz;
    Int_t ev;
    //создаются три однотипные ветви
    t1.Branch("px", &px, "px/F");
    t1.Branch("py", &py, "py/F");
    t1.Branch("pz", &pz, "pz/F");
    // и одна ветвь, которая будет содержать
целочисленные переменные (номер
// события)
    t1.Branch("ev", &ev, "ev/I");
    //цикл, в котором происходит заполнение
дерева
    for (Int_t i=0; i<10000; i++) {
        gRandom->Rannor(px,py); //присваивание
случайных значений px и py
        pz = px*px + py*py;
        ev = i;
        t1.Fill(); //заполнение дерева
    }
    t1.Write(); //запись дерева в файл
}
```

После выполнения этого скрипта будет создан файл `tree1.root`, содержащий дерево `t1`. Это дерево будет состоять из 4 ветвей (по количеству вызовов метода `TTree::Branch`): `px`, `py`, `pz`, `ev`. Первые три ветви будут содержать нецелочисленные значения, а третья — целочисленные. Эти значения будут считываться из соответствующих одноименных переменных. Заполнение дерева происходит в цикле `for` (10000 вхождений в цикл). По аналогии с гистограммами, метод `Write()` позволяет записать объект — в нашем случае дерево — в файл.

Чтобы узнать общую информацию о дереве, можно использовать метод `Print()`

```
root [] t1.Print()
```

Этот метод выведет информацию о названии дерева, числе вхождений, размере, а также о количестве и содержимом ветвей.

Для того чтобы вывести значения, содержащиеся в конкретном вхождении, существует метод `Show(N)`, где `N` — номер интересующего нас вхождения.

Вывод этого метода для созданного дерева `t1` будет выглядеть следующим образом:

```
root [] t1->Show(151)
=====> EVENT:151
      px                = -2.81273
      py                = -0.944246
      pz                =  8.80302
      ev                = 151
```

Для просмотра содержимого дерева иногда бывает удобно воспользоваться ROOT Object Browser. Чтобы запустить его, следует в командной строке просто создать объект `TBrowser`:

```
root[] TBrowser b
```

Откроем в нем файл `tree1.root`. Если этот файл находится в памяти ROOT, то его можно найти в папке ROOT Files. В ином случае, можно загрузить этот файл в память, отыскав его во встроенном навигаторе по файловой системе и дважды кликнув по нему левой кнопкой мыши. После этого файл окажется в каталоге ROOT Files. Теперь, дважды кликнув на нем, в правой части ROOT Object Browser увидим содержимое этого файла.

В файле `tree1.root` содержится лишь дерево `t1`. Дважды кликнув на `t1`, увидим список ветвей. Если кликнуть дважды по значку ветви (в данном случае лист), то можно вывести содержимое этой ветви в виде гистограммы.

Рассмотрим далее процесс чтения данных из дерева.

Прежде всего, следует описать переменные, в которые будут считываться значения. Затем нужно указать дереву, что считывание будет осуществляться именно в эти переменные. Это делается с помощью метода `SetBranchAddresses`. Этот метод имеет два параметра. Первым параметром является имя ветви дерева, вторым – адрес переменной, в которую необходимо осуществлять чтение.

Собственно считывание происходит с помощью команды `GetEntry(i)`, где `i` – номер вхождения. Этот метод считывает все значения, содержащиеся в `i`-м вхождении, и присваивает их переменным, которые были указаны ранее в `SetBranchAddresses`.

Чтобы узнать общее число вхождений, используется метод `GetEntries()`.

Следующий скрипт обеспечивает чтение дерева, созданного в предыдущем примере.

```

{
    //открывается файл, содержащий дерево
    TFile *f = new TFile("tree1.root");
    //создается указатель t1 на взятое из файла
дерево с именем t1
    TTree *t1 = (TTree*)f->Get("t1");
    //создаются переменные, в которые будут
считываться данные дерева
    Float_t px, py, pz;
    Int_t ev;
    //устанавливаются адреса переменных, в
которые будет осуществляться
    //чтение ветвей дерева t1 с именами px, py,
pz и ev
    t1->SetBranchAddresses("px",&px);
    t1->SetBranchAddresses("py",&py);
    t1->SetBranchAddresses("pz",&pz);
    t1->SetBranchAddresses("ev",&ev);
    //создается гистограмма
    TH2F *hpхру = new TH2F("hpхру","py vs
px",30,-3,3,30,-3,3);
    //в переменную nentries вносится общее число
вхождений в дерево t1
    Int_t nentries = (Int_t)t1->GetEntries();
    //цикл по вхождениям
    for (Int_t i=0; i<nentries; i++) {
        t1->GetEntry(i);
        hpхру->Fill(px,py);
    }
    hpхру->Draw();
}

```

По сравнению с предыдущим скриптом, в цикле `for` происходит чтение переменных по вызову `t1->GetEntry(i)`.

Простейший анализ содержимого дерева реализуется с помощью метода `Draw`.

```
t1->Draw("px")
```

 построит гистограмму значений `px`.

Построить двухмерное распределение значений переменных можно следующим образом

```
t1->Draw("px:pz")
```

В методе `Draw` можно также указать определенные критерии, которым должны удовлетворять события (вхождения). Эти критериями должны являться выражениями языка `C`.

Например, можно указать следующую конструкцию:

```
t1->Draw("pz", "px<0.5")
```

в таком случае будет построена гистограмма значений `pz`, для событий, удовлетворяющих поставленному условию, т.е. в которых значение `px<0.5`.

Такая конструкция бывает очень полезна в следующем случае. Представим, что дерево заполнено пособытийно, и в каждом из событий выставляется значение `iscut`, показывающее, удовлетворяет ли данное событие какому-либо критерию. Если событие «хорошее», то значение `iscut` есть 0, в противном случае 1. Если хотим построить значения каких-либо переменных только для тех событий, которые удовлетворяют этому критерию, то это можно сделать следующим образом:

```
t1->Draw("var1", "iscut==0");
```

Обратите внимание на использование `==`, поскольку производится сравнение значения `iscut` с нулем, а не операция присваивания. Использование в этом случае одного знака равенства является очень распространенной ошибкой.

Очевидно, событие может отбираться по целому ряду критериев, тогда их можно перечислить, используя операторы логических И и ИЛИ («&&» и «|» соответственно).

Например, построим гистограмму значений `var1`, для событий в которых `iscut1=0` и `iscut2=0`:

```
t1->Draw("var1", "iscut1==0 && iscut2==0");
```

В заключение необходимо пояснить, что не следует однозначно ассоциировать каждое вхождение в дерево с физическим событием. Нередко встречается другая организация дерева, в котором вхождения соответствуют, например, трекам частиц. Отметим также, что существует класс `TNtuple`, который представляет собой частный случай дерева, значения которого ограничиваются переменными типа `Float_t`, т. е. это полная аналогия `ntuple` в `PAW`.

По изложенному материалу предлагается провести две лабораторные работы.

Лабораторная работа №1

Цель: работа с простейшим генератором событий

В процессе выполнения работы студент должен:

- 1) по имеющемуся примеру изучить принцип работы с генератором `TGenPhaseSpace`, являющимся компонентом `ROOT`;
- 2) самостоятельно освоить работу с 4-векторами в `ROOT`: класс `TLorentzVector`;
- 3) модифицировать программу для генерации определенного процесса (по заданию преподавателя);
- 4) создать и вывести на экран распределения, полученные в процессе генерации: энергия, импульс, полярный угол и т. п.;

5) осуществить фитирование полученных распределений, определить значения интересующих параметров (средняя энергия, угол вылета и т.п.).

Лабораторная работа №2

Цель: введение в методику идентификации частиц.

В процессе выполнения работы студент должен:

1) обратиться к экспериментальным данным, содержащимся в дереве ROOT, сохраненном в файле;

2) построить необходимые для проведения идентификации частиц гистограммы;

3) самостоятельно освоить класс TCutG, обеспечивающий работу с графическими ограничениями;

4) создать графические ограничения для селекции определенного типа частиц (по заданию преподавателя);

5) провести исследование качества идентификации частиц в зависимости от критерия χ^2 , полярного, азимутального угла вылета частицы (по заданию преподавателя).

2. ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. PYTHIA

Программы PYTHIA, JETSET интенсивно используются для генерации событий в физике высоких энергий при описании процессов множественного рождения в столкновениях элементарных частиц — в частности, жестких взаимодействий в столкновениях e^+e^- , pp и ep , а также некоторых других случаях. Программы предназначены для генерации полных событий, т.е. дают более детальную картину, чем мы наблюдаем в эксперименте, в рамках нашего понимания фундаментальной физики процессов. Обсуждаемые здесь программы Монте-Карло построены как ведомые системы, т.е. пользователь должен написать основную программу. Из нее различные программы вызываются для выполнения частных задач, после чего управление снова передается основной программе. Некоторые из этих задач могут быть весьма тривиальными, и достаточно высокоуровневые программы могут производить большое число вызовов подпрограмм. Многие программы не предназначены для непосредственного вызова пользователем, а только через программы высокого уровня, типа LUEXEC, LUEEVT, PYINIT или PYEVNT.

В основном, это означает, что существуют три пути, по которым вы взаимодействуете с программами. Во-первых, устанавливая переменные общих блоков, вы определяете, как программы должны выполнять частные задачи, т.е. какие процессы должны генерироваться, каковы предполагаемые массы частиц, какие константы связи должны использоваться, каковы сценарии фрагментации и так далее с сотнями опций и параметров. Во-вторых, при вызовах подпрограмм происходит генерирование

события по правилам, установленным выше. Обычно в подпрограмме существует несколько аргументов, которые связаны с деталями физической ситуации, например, с энергией в системе центра масс, предполагаемой в событии. В-третьих, вы также можете заглянуть в общий блок LUJETS для того, чтобы извлечь информацию о сгенерированном событии, или же можно вызвать различные функции и подпрограммы для дальнейшего анализа.

Работа с PUTHIA должна быть строго организована, так как необходимо вначале инициировать процедуру генерации и только затем генерировать события, и нельзя свободно изменять ключи и параметры в ходе выполнения программы. Поэтому точность полученных результатов напрямую зависит от заданной структуры программы. Таким образом, работа с PUTHIA может быть разделена на три этапа.

1. Этап инициализации. Здесь определяются все основные характеристики будущего процесса генерации. В этом разделе содержится следующая информация.

Общие блоки, по меньшей мере, следующие, а возможно, и некоторые еще:

```
COMMON/LUJETS/N,K(4000,5),P(4000,5),V(4000,5)
COMMON/LUDAT1/MSTU(200),PARU(200),MSTJ(200),
PARJ(200)
```

```
COMMON/PYSUBS/MSEL,MSUB(200),KFIN(2,-
40:40),SKIN(200)
```

```
COMMON/PYPARS/MSTP(200),PARP(200),MSTI(200),PA
RI(200)
```

Выбор требуемых процессов. Некоторое количество фиксированных «меню» для подпроцессов может быть задано выбором различных значений MSEL, но при MSEL=0 это можно сделать, используя номера подпроцессов. Например, если нужно сгенерировать процессы 14, 18 и 29, это можно сделать так:

```
MSEL=0
```

$$\text{MSUB}(14) = 1$$

$$\text{MSUB}(18) = 1$$

$$\text{MSUB}(29) = 1$$

Выбор кинематических ограничений в массиве SKIN. Например, для того, чтобы сгенерировать процесс жесткого рассеяния с $5 \text{ ГэВ} < p_T < 10 \text{ ГэВ}$, используются ограничения

$$\text{SKIN}(3) = 5$$

$$\text{SKIN}(4) = 10$$

К сожалению, излучение в начальном и конечном состоянии будет давать сдвиг кинематики жесткого рассеяния, делая последствия от ограничений менее предсказуемыми. Следовательно, всегда нужно очень осторожно подходить к наложению ограничений, чтобы не обрезать никаких желаемых конфигураций событий.

Также на этапе инициализации необходимо произвести дополнительно следующие действия:

1) описание исходного физического сценария, например, для массы топ-кварка;

2) выбор структурных функций, определяющих Q^2 , и прочие подробности процесса генерации;

3) выключение частей генератора, не нужных для данного моделирования, например, фрагментации для исследований на партонном уровне;

4) инициализация процедуры генерации события. Здесь устанавливается кинематика, обнаруженные максимумы дифференциальных сечений, использующиеся в последующем монте-карловском моделировании, а также выполняются другие подготовительные задачи. Инициализация выполняется PYINIT, которая должна вызываться только после того, как значения всех ключей и параметров выше устанавливаются на нужные значения.

Должны быть определены система отсчета, пучки частиц и энергия взаимодействия в ГэВ.

```
CALL PYINIT ('CMS', 'p', 'pbar', 1800.)
```

2. Цикл генерации. Здесь генерируются и анализируются заданные события. Это включает в себя следующие действия:

Генерация следующего события при вызове

```
CALL PYEVNT
```

Печать нескольких событий для проверки того, что все работает, как запланировано, с помощью

```
CALL LULIST(1)
```

Анализ представляющих интерес свойств события, проводимый или при непосредственном считывании информации из общего блока LUJETS, или с использованием ряда сервисных подпрограмм в JETSET.

Сохранение событий на диске, или интерфейс для моделирования детектора.

3. Последний этап. Ставятся задачи.

Распечатка таблицы выведенных сечений, полученных в результате монте-карловского моделирования, с помощью команды

```
CALL PYSTAT(1)
```

Печать гистограмм и другой выходной информации, необходимой пользователю.

Полная информация о каждом новом сгенерированном событии сохраняется в общем блоке LUJETS, который, таким образом, формирует запись события. Здесь каждая струя или частица, которая появляется на некоторой стадии фрагментации или в цепочке распадов, будет занимать одну строку в массиве. Различные компоненты этой строки будут содержать информацию относительно того, является ли объект струей/частицей, историю рождения, настоящее состояние (фрагментировала/распалась или нет), данные об импульсе, энергии и массе, а также пространственно-временную позицию вершины рождения.

Обратите внимание, что векторы $K(I, 3) - K(I, 5)$ и P, V могут иметь специальное значение для некоторых определенных приложений. Общий блок LUJETS увеличивался со временем и в настоящий момент может содержать 4000 входов. Большое количество входов обусловлено тем, что запись события содержит не только конечные частицы, но также все партоны и адроны промежуточного звена, которые впоследствии образовали ливни, фрагментировали или распались

COMMON/LUJETS/N, K(4000, 5), P(4000, 5), V(4000, 5)

N – число строк в массивах K, P, V , занятых текущим событием. N непрерывно обновляется, поскольку осуществляется определение первоначальной конфигурации и обработка фрагментации и распадов. В дальнейшем конкретное число партонов/частиц, установленное между l и N , обозначается I .

$K(I, 1)$: код текущего состояния партона/частицы, сохраненного в строке. Основное правило заключается в том, что коды 1-10 соответствуют существующим в настоящее время партонам/частицам, в то время как большие значения кодов отвечают партонам/частицам, которые уже не существуют (распались или фрагментировали) или несут другой вид информации о событии.

= 0 – свободная строка.

= 1 – нераспавшаяся или нефрагментировавшая струя, во втором случае струя может быть единственной или последней струей в системе струй.

= 2 – нефрагментировавшая струя, которая сопровождается несколькими струями в одной и той же синглетной по цвету системе.

= 3 – нефрагментировавшая струя со специальной информацией о цветовом потоке, сохраненной в $K(I, 4)$ и $K(I, 5)$, так что соседние

по струне партоны могут следовать не друг за другом, а в свободном порядке в записи события.

= 4 – частица, которая может распасться, но не в пределах разрешенного объема вокруг первичной вершины.

= 5 – частица, которая должна распасться при следующем вызове LUEXEC при данном расположении вершины (этот код устанавливается только пользователем).

= 11 – распавшаяся частица или фрагментировавшая струя, вторая может быть единственной струей или последней из системы струй.

= 12 – фрагментировавшая струя, которая сопровождается несколькими струями той же синглетной по цвету системы.

= 13 – струя, которая была уничтожена в записи, когда использовалась специальная информация о цветовом потоке при перестройке системы струй.

= 14 – партон, который совершил цепочку переходов в дальнейшие партоны.

= 15 – частица, которая распалась при вмешательстве пользователя.

$K(I,2)$ – KF-код партона/частицы.

$K(I,3)$ – номер строки родительской частицы или струи, если известно, иначе 0. Обратите внимание, что отнесение частицы к данной струе в системе струй нефизично, и приведенное здесь значение нужно понимать только как определение способа, которым было сгенерировано событие.

$K(I,4)$ – обычно номер строки первой дочерней частицы; равен 0 для нераспавшихся частиц или нефрагментировавших струй.

$K(I,5)$ – обычно номер строки последней дочерней частицы; равен 0 для нераспавшихся частиц или нефрагментировавших струй.

$P(I,1)$ – p_x , импульс для x -направления, ГэВ/с.

$P(I,2) - p_y$, импульс для y -направления, ГэВ/с.

$P(I,3) - p_z$, импульс для z -направления, ГэВ/с.

$P(I,4) - E$, энергия, ГэВ.

$P(I,5) - m$, масса, ГэВ/с².

$V(I,1) - x$ -координата точки вершины рождения, мм

$V(I,2) - y$ -координата точки вершины рождения, мм

$V(I,3) - z$ -координата точки вершины рождения, мм

$V(I,4) -$ время рождения, мм/с

$V(I,5) -$ время жизни частицы, мм/с. Если распад частицы выключен, то $V(I,5)=0$.

Чтобы проиллюстрировать работу PYTHIA, представим себе, например, что требуется смоделировать рождение хиггсов с энергией 300 ГэВ. При использовании PYTHIA программа, выглядит следующим образом.

С... Общие блоки

```
COMMON/LUJETS/N,K(4000,5),P(4000,5),V(4000,5)
```

```
COMMON/LUDAT1/MSTU(200),PARU(200),MSTJ(200),PARJ(200)
```

```
COMMON/PYSUBS/MSEL,MSUB(200),KFIN(2,-0:40),SKIN(200)
```

```
COMMON/PYPARS/MSTP(200),PARP(200),MSTI(200),PARI(200)
```

```
COMMON/LUDAT2/KCH(500,3),PMAS(500,4),PARF(2000),VCKM(4,4)
```

```
COMMON/LUDAT3/MDCY(500,3),MDME(2000,2),BRAT(2000),KFDP(2000,5)
```

```
COMMON/PAWC/HBOOK(10000)
```

С... Число генерируемых событий. Ключи для соответствующих процессов.

```
NEV=1000
```

```
MSEL=0
```

```
MSUB(102)=1
```

```

MSUB(123)=1
MSUB(124)=1
С... Выбор масс  $t$  и  $H$  и кинематических
ограничений на массы.
PMAS(6,1)=140
PMAS(25,1)=300
СКИН(1)=290
СКИН(2)=300
С... Только при моделировании жесткого процесса:
выключены ненужные задачи.
MSTP(61)=0
MSTP(71)=0
MSTP(81)=0
MSTP(111)=0
С...Инициализация и печать парциальных ширин.
CALL PYINIT('CMS','p','p',16000.)
CALL PYSTAT(2)
С... Вызов печати гистограмм.
CALL HLIMIT(10000)
CALL HBOOK1(1,'Higgs mass', 50, 275., 325.,0.)
С... Генерация события. Рассмотрим сначала
несколько событий.
DO 200 IEV=1,NEV
CALL PYEVNT
IF(IEV.LE.3) CALL LULIST(1)
С... Цикл по частицам для нахождения хиггсов и
гистограммирования их масс.
DO 100 I=1,N
100 IF(K(I,2).EQ.25) HMASS=P(I,5)
CALL HF1(1,HMASS,1.)
200 CONTINUE
С... Печать сечений и гистограмм.

```

```
CALL PYSTAT(1)
CALL HISTDO
END
```

Процессы 102, 123, и 124 – три основных источника хиггсов ($gg \rightarrow H$, $ZZ \rightarrow H$ и $WW \rightarrow H$). `MSUB(ISUB) = 1` — команда для включения процесса `ISUB`. Значение ключа `MSEL=0` отключает любые процессы рождения частиц; далее можно сформировать «меню» из желаемых процессов, используя соответствующие значения `MSEL`. Команда `PMA5` устанавливает значения масс топ-кварка и хиггса, а переменные `SKIN` — желаемый массовый диапазон хиггса. Хиггс с номинальной массой 300 ГэВ фактически имеет довольно широкое распределение по массе брейт-вигнеровского типа. Затем идут ключи `MSTP`, которые должны изменить процедуру генерации, в данном случае — выключать излучение в начальном и конечном состоянии, многократные взаимодействия для пучка струй и фрагментацию, так, чтобы остался только «партонный скелет» жесткого процесса. Вызов `PYINIT` инициализирует `PYTHIA`, далее находятся максимумы сечений, заново вычисляются свойства распада хиггса, которые зависят от массы хиггса, и т. д. Свойства распада могут быть распечатаны из `PYSTAT(2)`.

В следующем примере представлена программа, моделирующая образование Z^0 на LEP.

```
C-----
-----
C...Предварительное декларирование параметров.
C...Все переменные в формате двойной точности.
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)
C...Три функции Pythia возвращают целые
переменные поэтому их надо определить.
      INTEGER PYK, PYCHGE, PYCOMP
C... Задаются общие блоки
```

```

COMMON/PYJETS/N,NPAD,K(4000,5),P(4000,5),V(400
0,5)
COMMON/PYDAT1/MSTU(200),PARU(200),MSTJ(200),PA
RJ(200)
COMMON/PYDAT2/KCHG(500,4),PMAS(500,4),PARF(200
0),VCKM(4,4)
COMMON/PYDAT3/MDCY(500,3),MDME(8000,2),BRAT(8000
),KFDP(8000,5)
COMMON/PYSUBS/MSEL,MSELPD,MSUB(500),KFIN(2,-
40:40),CKIN(200)
COMMON/PYPARS/MSTP(200),PARP(200),MSTI(200),PA
RI(200)
COMMON/PYMSSM/IMSS(0:99),RMSS(0:99)
C-----

```

```

-----
C...Инициализация.
ECM=91.2D0
NEV=1000
MSEL=0
MSUB(1)=1
DO 100 IDC=MDCY(23,2),MDCY(23,2)+MDCY(23,3)-1
IF(IABS(KFDP(IDC,1)).GE.6)
MDME(IDC,1)=MIN(0,MDME(IDC,1))
100 CONTINUE
CALL PYINIT('CMS','e+','e-',ECM)
CALL PYSTAT(2)
C...Задание гистограмм.
CALL PYBOOK(1,'charged multiplicity ME',100,-
0.5D0,99.5D0)
CALL PYBOOK(2,'charged multiplicity PS',100,-
0.5D0,99.5D0)

```

C-----

C...Цикл по событиям.

```
DO 300 ICA=1,2
IF(ICA.EQ.1) THEN
MSTP(48)=1
MSTJ(101)=2
ELSE
MSTP(48)=0
ENDIF
```

C...Начало цикла.

```
DO 200 IEV=1,NEV
CALL PYEVNT
```

C...Печать первых нескольких событий.

```
IF(IEV.LE.2) CALL PYLIST(1)
```

C... Заполнение гистограмм.

```
CALL PYEDIT(3)
CALL PYFILL(ICA,DBLE(N),1D0)
```

C...Конец цикла события.

```
200 CONTINUE
```

C...Конец цикла моделирования.

```
300 CONTINUE
```

C-----

C... Третий этап. Вывод данных и гистограмм.

```
CALL PYSTAT(1)
```

```
CALL PYNIST
```

```
END
```

2.2. UrQMD

Генератор взаимодействия UrQMD основан на транспортной модели UrQMD (Ultra Relativistic Quantum Molecular Dynamics [1], [2]), предназначенной для моделирования взаимодействий тяжелых ионов в диапазоне энергий от SIS до RHIC. В рамках этого генератора изучается широкий круг эффектов, связанных с тяжелыми ионами: от мультифрагментации и коллективного движения до образования конечных частиц и корреляций между ними. Данный генератор работает на UNIX-совместимых платформах.

Для начала работы с UrQMD необходимо откомпилировать командный код программы, написанной на FORTRAN77. Для компиляции необходимо, чтобы на PC были установлены: компилятор FORTRAN77 и GNU-make. Компиляция инициализируется заданием команды *make* в той директории, где находятся источники программного кода генератора. После успешной компиляции создается двоичный файл `urqmd.TYPE`, где `TYPE` — это результат выполнения команды *uname*.

В отличие от генератора PYTHIA, где и моделирование и обработка полученных результатов осуществляется в одной программе, в генераторе UrQMD сначала производится генерирование событий с определенными параметрами и уже затем отдельной программой производится обработка полученной информации.

Чтобы запустить генератор UrQMD, необходимо определить рабочие параметры во входном файле. Входной файл становится доступен из UrQMD с помощью определения его имени как переменной окружения `ftn09`. Выходные файлы определяются таким же образом, как переменные окружения `ftn13`, `ftn14`, `ftn15` или `ftn16`, в зависимости от формата выходных данных. Ниже

приведен пример определения переменных окружения в программной оболочке bash.

```
$ export ftn09=inputfile
$ export ftn14=outputfile
$ export ftn15=collisionfile
```

Стандартный вид входного файла представлен на следующем примере:

```
# this is a sample input file for uqmd
# projectile
# Ap Zp
pro 197 79
# optional: special projectile: ityp, iso3
# PRO 101 2
# target
# At Zt
tar 197 79
# number of events
nev 1
# time to propagate and output time-interval
(in fm/c)
tim 40 40
#
# incident beam energy in AGeV
ene 10.7
#
imp 3.0
#
# equation of state
eos 0 # CASCADE mode
# some options and parameters
cto 4 1 # output of initialization
```

```

ctp 1 1.d0 # scaling for decay width of
Reonances
#
f15 # no output to file15
# end of file
xxx

```

Из примера видно, что описание каждой переменной состоит из трех частей: первая — это описание значения данной переменной, которое начинается со знака # (данная часть может отсутствовать, она нужна только для удобства), затем следует символьная метка переменной и последним определяется значение вводимой переменной. Входной файл не имеет строго определенной структуры, однако настоятельно рекомендуется, чтобы среди входных параметров были определены: налетающее ядро, мишень, прицельный параметр и начальная энергия пучка. Ниже приведены параметры, которые чаще всего требуют определения.

```

# строка комментариев
xxx последняя строка в файле
pro Ap Zp определяется налетающее ядро
tar At Zt определяется мишень
nev nevents определяется количество событий для
моделирования
ene ebeam определяется начальная кинетическая энергия
пучка (в лаб. системе)
plb pbeam определяется начальный импульс пучка (в лаб.
системе)
ecm srt полная энергия в случае коллайдерного режима (ГэВ)
imp bmax определяется прицельный параметр (bmin=0)
rsd seed определяется генератор случайных чисел
stb ityp определяется частица, как стабильная
f14 запрещается вывод в файл 14

```

f15 запрещается вывод в файл 15

Генератор UrQMD может осуществлять вывод информации в различные виды выходных файлов. Стандартные выходные файлы это ftn13 и ftn14. Выходной файл записывается в текстовом формате. Стандартный файл содержит заголовочную информацию и информацию об образовавшихся частицах на определенном интервале времени (в конце моделирования взаимодействия). Файл 13, кроме того, содержит координаты образования частиц в координатном и импульсном пространствах. Файл ftn15 содержит информацию обо всех столкновениях и распадах в пределах данного события. Файл ftn16 содержит информацию обо всех распавшихся частицах и обо всех стабильных частицах в конце данного события. Запись каждого события состоит из заголовка и тела события. Заголовки всех четырех перечисленных выходных файлов идентичны. Информация, представленная в заголовке выходного файла, содержит данные о версии используемого генератора, типах сталкивающихся частиц, прицельном параметре и номере события.

В первой строке тела стандартного выходного файла содержится информация о количестве строк, содержащих данные об образованных частицах. Также в первой строке содержится время образования частиц в fm/c. В следующей строке находятся счетчики количества столкновений, резонансов, распадов на одно данное событие. Затем следуют строки, содержащие информацию об индивидуальной частице. Формат данных и выводимая информация зависят от типа выбранного выходного файла. Стандартный выходной файл обеспечивает всю необходимую информацию для проведения любого анализа взаимодействий тяжелых ионов в рамках модели UrQMD. Ниже приведен список данных об одной частице, записываемых в выходной файл ftn14:

- 1) время образования частицы, фм/с;

- 2) x координата, фм;
- 3) y координата, фм;
- 4) z координата, фм;
- 5) энергия частицы в ГэВ;
- 6) значение проекции импульса частицы на ось x, ГэВ;
- 7) значение проекции импульса частицы на ось y, ГэВ;
- 8) значение проекции импульса частицы на ось z, ГэВ;
- 9) масса частицы, ГэВ;
- 10) уникальный код частицы;
- 11) изоспин частицы;
- 12) заряд частицы;
- 13) индекс частицы, с которой происходило последнее взаимодействие;
- 14 количество столкновений;
- 15 информация о родительском процессе.

Файл `ftn 15` содержит информацию: о каждом акте взаимодействия между двумя участниками, распаде резонанса и разрыве струи, которые происходят во время взаимодействия тяжелых ионов. Эта информация может быть использована для восстановления пространственно-временной эволюции события. Каждый акт (столкновения, распада или аннигиляции) описывается от 3 до N строками (три строки для распадов и аннигиляций, четыре для рассеяния, больше для распада струй) с индивидуальной информацией о частице. Заголовок события состоит из одной строки. Формат заголовка одинаков с начальными строками, описывающими двухчастичные взаимодействия и распады, которые следуют дальше в файле. Для того чтобы отличить начало события от начала описания столкновения или распада, первое число в заголовке события рано 0. Затем следует номер события, массы налетающей частицы и мишени, прицельный параметр, энергия двух частиц в с.ц.м., полное сечение

взаимодействия тяжелых ионов, энергия и импульс (на частицу) в лабораторной системе координат. Заголовочная строка содержит в начале количество входящих и выходящих частиц, затем код процесса взаимодействия, номер столкновения в соответствующем событии, время столкновения в фм/с, полную энергию в с.д.м., полное сечение, парциальное сечение для соответствующего канала и, наконец, барионную плотность в точке столкновения. Одной из задач, для которых используется файл `ftn15`, является возможность отследить траекторию одной частицы в процессе взаимодействия или возможность отследить изменение со временем энергии в одном акте взаимодействия.

2.3. Генератор столкновений HIJING

Релятивистская физика тяжелых ионов изучает ядро-ядерные столкновения высоких энергий с целью выяснения поведения ядерной материи при экстремальных условиях, таких как высокая плотность и температура. Основной целью исследований является получение в лабораторных условиях нового состояния ядерного вещества — кварк-глюонной плазмы (КГП). Существование КГП предсказывается в современной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамике.

Одним из наиболее интересных для изучения явлений в столкновениях релятивистских тяжелых ионов является образование струй (направленных потоков частиц) с большими поперечными импульсами. Эти струи состоят из частиц, возникающих при адронизации кварков и глюонов. Кварки и глюоны до своей адронизации распространяются в сильновзаимодействующей среде, которая может включать как адронную, так и кварковую составляющую. При этом потери энергии кварка в процессе столкновения с частицами среды и при

тормозном излучении зависят от свойств среды. Эти потери ведут к подавлению образования струй (явление “jet quenching”). Таким образом, “jet quenching” может служить сигнатурой кварк-глюонной плазмы.

Другим сигналом является образование мини-струй. Оценивается, что мини-струи дают вклад до 50% поперечной энергии при центральных столкновениях тяжелых ионов. Мини-струи при средних поперечных импульсах имеют более короткие длины пробега в партонной среде и вероятнее диссипируют в фоне теряя память о начальных корреляциях и изменяя свои характеристики при взаимодействии со средой.

Для изучения образования струй (мини-струй) при релятивистских взаимодействиях ядер и моделирования явления “jet quenching” была разработана монте-карло программа HIJING (Heavy Ion Jet Interaction Generator). Данная программа основана на модели пертурбативной КХД (используется для образования струй) и лундовской струнной модели (описание фрагментации струй).

Программа позволяет генерировать события до энергий 10 ТэВ/нуклон в системе центра масс, что включает область энергий ускорителя LHC.

Стоит заметить, что время генерирования события сильно зависит от энергии взаимодействия и типа частиц. Например,

- pp взаимодействие при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ
~ 700 событий/мин
- pp взаимодействие при энергии $\sqrt{s} = 1.8$ ТэВ
~ 250 событий/мин
- AuAu взаимодействие при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ/нуклон
~ 1 событие/мин
- PbPb взаимодействие при энергии $\sqrt{s} = 6.4$ ТэВ/нуклон
~ 1 событие/10мин

Пакет HIJING состоит из подпрограмм для физического моделирования и общих блоков для определения параметров и записи событий.

HIJING использует PYTHIA 5.3 для генерации кинематических переменных в жестких процессах и JETSET 7.2 для фрагментации струй. Поэтому HIJING использует такие же коды частиц как JETSET 7.2 и PYTHIA 5.3. Таким образом, пользователи могут использовать (модифицировать) подпрограммы JETSET 7.2 и изменять переменные параметров JETSET 7.2 и PYTHIA. Чтобы сэкономить время компилирования, JETSET 7.2 не был включен в основное тело программы HIJING. Вместо этого, PYTHIA 5.3 была немного модифицирована и вместе с JETSET7.2 объединена в HIPYSET. Две эти программы – HIJING и HIPYSET – представляют собой пакет программ HIJING.

Пакет HIJING состоит из нескольких основных подпрограмм, базовых общих блоков и дополнительных подпрограмм.

Существуют две главные подпрограммы, которые пользователи должны вызывать в своей программе – это HIJSET и HIJING.

HIJSET – подпрограмма, которую вызывают перед подпрограммой HIJING, для инициализации основных входных параметров, таких как: тип частицы, энергии взаимодействия, системы взаимодействия.

HIJSET (EFRM, FRAME, PROJ, TARG, IAP, IZP, IAT, IZT)

EFRM – определяется энергия столкновения (ГэВ/нуклон) частиц в типе эксперимента указанной параметром FRAME

FRANE – указывается тип эксперимента

= CMS – эксперимент для сталкивающихся пучков в системе центра масс (ЦМ) с импульсом частиц пучка в направлении +z и импульсом частиц мишени в направлении -z

= LAB – эксперимент на фиксированной мишени, указывается импульс налетающей частицы (PROJ) в направлении +z

PROJ, TARG – определяются переменные для определения частиц пучка и мишени

= P – протон

= PBAR – антипротон

= N – нейтрон

= NBAR – антинейтрон

= PI+

= PI-

= A – ядро

IAP, IAT – масса налетающего ядра и мишени

IzP, IzT – заряд налетающего ядра и мишени

HIJING – это главная подпрограмма пакета HIJING, которая вызывается строго после HIJSET. Стоит отметить: в то время как подпрограмма HIJING может вызываться неоднократно, то подпрограмма HIJSET вызывается единожды.

HIJING (FRAME, BMIN, BMAX)

FRAME – указывается тип эксперимента, который определяется при вызове HIJSET

BMIN, BMAX – определяется нижний и верхней предел прицельного параметра.

Существует также несколько основных общих блоков, которые обеспечивают пользователя важной информацией о генерированных событиях. Общий блок HIMAIN1 содержит основную информацию о событиях, а общий блок HIMAIN2 – информацию об образованных частицах.

COMMON/HIMAIN1/NATT, EATT, JATT, NT, NP, NO, N01, N10, N11

NATT – полное число образованных стабильных и нераспавшихся частиц в текущем событии;

EATT – полная энергия образованных частиц в системе центра масс, для проверки закона сохранения энергии;

JATT – полное число упругих рассеяний в текущем событии;

NT, NP – число участников налетающей частицы и мишени в текущем событии.

COMMON/НIMAIN2/KATT(130000,4),PATT(130000,4)

KATT(I,1): (I=1,...,NATT) – код образовавшейся частицы, совпадает с кодом частиц PYTHIA;

KATT(I,2): (I=1,...,NATT) – статус кода для идентификации источника образования частицы, номер строки родительской частицы, если известно, иначе 0;

KATT(I,3): (I=1,...,NATT) KATT(I,4): (I=1,...,NATT) – статус числа частиц;

PATT(I,1-4): (I=1,...,NATT) – 4-импульс (p_x , p_y , p_z , E) (ГэВ/с, ГэВ) образовавшийся частицы.

Отметим, не вдаваясь в подробности, еще несколько блоков. Блок HIJET1 содержит информацию об образованных партонах, которые связаны с валентными кварками и дикварками налетающего ядра или мишени для формирования системы струн для фрагментации. Блок HIJET2 содержит информацию об образованных партонах, которые не связаны с валентными кварками и дикварками. Блок HISTRNG содержит информацию о нуклонах налетающего ядра и мишени, и соответствующие конституентные кварки и дикварки.

Общий блок HIPARNT содержит коды состояний и параметры, которые регулируют эффективность программы HIJING. Все они имеют разумные значения по умолчанию, так что неопытный пользователь поначалу может пренебречь ими и исследовать полный диапазон возможностей постепенно. Некоторые параметры

просто переопределяют параметры JETSET 7.2 и PYTHIA 5.3. Поэтому для более детального изучения рекомендуем обратиться к руководству пользователя этих программ.

COMMON/HIPARNT/HIPR1(100),IHPR2(50),HINT1(100),IHNT2(50)

Параметры HIPR1(100) и IHPR2(50) – содержат входные параметры (ключи) для события, в то время как параметры GHINT1(100),IHNT2(50) содержат дополнительную информацию о текущем событии.

Так как общее число параметров достигает около 200, остановимся только на наиболее значимых параметрах.

Значения по умолчанию определяются с помощью D=...

HIPR1(8):(D=2.0 GeV) минимальный поперечный импульс жестких или полужестких рассеяний.

HIPR1(11):(D=2.0 GeV) минимальный поперечный импульс струи, которая будет взаимодействовать с существующей ядерной материей.

HIPR1(12):(D=1.0 fm) поперечное расстояние между струей и существующими нуклонами, дальше которого они будут взаимодействовать и струи будут терять энергию.

HIPR1(29):(D=0.4 fm) минимальное расстояние между двумя нуклонами внутри ядра, когда координаты всех нуклонов в ядре инициализированы.

IHPR2(2):(D=3) ключ для начального и конечного излучения в жестких процессах

=0 – начальное и конечное излучение выключено;

=1 – начальное излучение включено, а конечное – выключено;

=2 – начальное излучение выключено, а конечное – включено;

=3 – начальное и конечное излучение включено.

ИНР2(3):(D=0) ключ для жестких рассеяний с определенным поперечным импульсом $P_T = \text{ИНР1}(10)$ на событие

=1 – обыкновенный жесткий процесс;

=2 – только прямое образование фотона;

=3 – образование тяжелых кварков (очарованных
 $\text{ИНР2}(18)=0$

или прекрасных $\text{ИНР2}(18)=1$). Для инклюзивного образования нужно положить $\text{ИНР1}(10)=0.0$

ИНР2(4):(D=1) ключ для “jet quenching” в существующей ядерной среде;

ИНР2(6):(D=1) ключ для ядерных эффектов на партонной функции распределения;

ИНР2(8):(D=10) максимальное число образованных струй на нуклон-нуклонное взаимодействие. Если $\text{ИНР2}(8)=0$, образование струй будет выключено;

ИНР2(9):(D=0) ключ гарантирует образование по крайней мере одной пары мини-струй на событие;

ИНР2(11):(D=1) выбирает модель образования барионов

=0 – барион-антибарионная пара не образуется, начальные дикварки трактуются как точечные.

=1 – дикварк-антидикварковая пара образуется, начальные дикварки трактуются как точечные.

=2 – дикварк-антидикварковая пара образуется, с возможностью рассматривать дикварк как состояние “p0rcorn”;

ИНР2(12):(D=1) опция для выключения распада частиц таких как π^0 , K^0_S , D^{+-} , Λ , Σ^{+-} , χ^0 , Ω .

ИНР2(13):(D=1) опция для включения single дифракционной реакции;

ИНР2(14):(D=1) опция для включения упругих процессов;

INPR2(18):(D=0) опция для включения образования b-кварков. По умолчанию включено образование очарованных кварков. Когда включается образование b-кварков, образование очарованных кварков автоматически выключается.

HINT1(72)-HINT1(75): параметры для распределения Вудса – Саксона (плотности ядерного вещества) налетающего ядра, $\rho(x)=FNORM*(1.+W*(X/R)**2)/(1+EXP((X-R)/D)$ R=HINT1(72) – радиус ядра, D=HINT1(73) – толщина поверхности, W=HINT1(74) – принимает в расчет центральную неравномерность, FNORM=HINT1(75) – центральная плотность, находится из условий нормировки.

HINT1(76)-HINT1(79): параметры для распределения Вудса – Саксона ядра мишени, $\rho(x)=FNORM*(1.+W*(X/R)**2)/(1+EXP((X-R)/D)$ R=HINT1(76), D=HINT1(77), W=HINT1(78), FNORM=HINT1(79).

Для релятивистских столкновений адронов и тяжелых ионов, обычно изучаются события с фиксированным прицельным параметром, главным образом при центральных столкновениях $b=0$. Моделирование событий при данных условиях является самым простым для генератора HIJING. При моделировании столкновений протонов (p+p) нужно всегда использовать нулевой прицельный параметр, и тогда HIJING даст результаты, усредненные по прицельному параметру воздействия. В следующей программе в качестве примера показано моделирование 1000 центральных событий Au+Au при энергии в системе центра масс 200 ГэВ/нуклон. При этом вычисляется и выводится информация о скорости и поперечном импульсе образованных заряженных частиц. Стоит заметить, что сталкивающиеся ядра, которые не претерпели взаимодействий, не считаются новыми образовавшимися частицами.

```

CHARACTER FRAME*8, PROJ*8, TARG*8
COMMON/HIMAIN1/NATT, EATT, JATT, NT, NP, NO, N01, N10
, N11
COMMON/HIMAIN2/KATT(130000, 4), PATT(130000, 4)
C *****information of produced particles
COMMON/HIJJET1/NPJ(300, KFPJ(300, 500), PJPX(300,
500), PJPY(300, 500)
PJPZ(300, 500), PJPE(300, 500), PJPM(300, 500), NTJ(
300), KFTJ(300, 500)
PJTX(300, 500), PJTY(300, 500, PJTZ(300, 500), PJTE(
300, 500), PJTM(300, 500)
COMMON/HIJJET2/NSG, NJSG(900), IASG(900, 3), K1SG(
900, 100), K2SG(900, 100)
PXSG(900, 100), PYSG(900, 100), PZSG(900, 100), PESG
(900, 100), PMSG(900, 100)
C *****information of produced partons
EFRM=200.0
FRAME='CMS'
PROJ='A'
TARG='A'
IAP=197
IZP=79
IAT=197
IZT=79
CALL
HIJSET(EFRM, FRAME, PROJ, TARG, IAP, IZP, IAT, IZT)
C *****Initialize HIJING
BMIN=0.0
BMAX=0.0
DO 2000 I_event=1, 100

```

```

      CALL HIJING (FRAME, BMIN, BMAX) C
      DO 1000 I=1, NATT
      IF (LUCHGE (KATT (I, 1)) .NE. 0) THEN
      IF (LUCHGE (KATT (I, 1)) .EQ. 0) GO TO 1000
      PTR=SQRT (PATT (I, 1)**2+PATT (I, 2)**2)
      IF (PTR .GE. 10.0) GO TO 100
      IPT=1+PTR/0.2
      DNDPT (IPT)=DNDPT (IPT)+1.0/FLOAT (N
EVENT)/0.2/2.0/PTR
      100
      Y=0.5*LOG ((PATT (I, 4)+PATT (I, 3)) / (PATT (I, 4)+
PATT (I, 3)))
      IF (ABS (Y) .GE. 10.0) GO GO 1000
      IY=1+ABS (Y) /0.2
      DNDY (IY)=DNDY (IY)+1.0/FLOAT (N EVENT) /0.2/2.0
      1000 CONTINUE
      2000 CONTINUE
      C....print out the rapidity and transverse
momentum distributions:
      WRITE (*, *) (0.2* (K1), DNDPT (K), DNDY (K), K=1, 50)
HIMAIN2
      END

```

По изложенному материалу предлагается провести две лабораторные работы.

Лабораторная работа №1

Цель: моделирование взаимодействия протонов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 500$ ГэВ с последующим анализом результатов в среде ROOT.

В процессе выполнения работы студент должен:

1) написать основную программу, осуществляющую моделирование 1000 *pp*-взаимодействий. В программе должны сохраняться основные результаты взаимодействия: координаты, импульсы, типы образовавшихся частиц в виде tree;

2) сохранить, полученные результаты в формате, пригодном для последующего преобразования в формат root;

3) написать макрос, производящий обработку и визуализацию полученных данных;

Лабораторная работа №2

Цель: моделирование взаимодействия тяжелых ионов средних энергий.

В процессе выполнения работы студент должен:

1) запустить процесс моделирования взаимодействий тяжелых ионов с энергией порядка 10 ГэВ на нуклон;

2) набрать статистику для различных прицельных параметров взаимодействия;

3) написать макрос, производящий обработку полученных данных. Одним из результатов может быть график зависимости множественности образовавшихся частиц от прицельного параметра.

Дополнительная литература по различным видам генераторов событий.

[1]. Bass. S. A., Belkacem M., Bleicher M., Brandstetter M., Bravina L., Ernst C., Gerland L., Hofmann M., Hofmann S., Konopka J., Mao G., Neise L., Soff S., Spieles C., Weber H., Winkelmann L. A., Stöcker H., Greiner W., Hartnack C., Aichelin J. and Amelin N. *Microscopic Models for Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions*// Prog. Part. Nucl. Phys. **41** (1998) 225–370.

[2]. Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C., Bass S.A., Ernst C., Soff S., Weber H., Stöcker H. and Greiner W. *Relativistic Hadron-Hadron Collisions and the Ultra-Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model (UrQMD)*// J. Phys. **G25** (1999), 1859–1896

3. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ПРОГРАММОЙ GEANT3

С увеличением масштабов и сложности экспериментов по физике высоких энергий работы по проведению модельных расчетов требуют все большего и большего внимания и становятся неотъемлемой частью:

разработки и оптимизации детекторов;

развития и тестирования программ по реконструкции и анализу данных;

обработки экспериментальных данных.

Первая версия GEANT была написана в 1974 году и обладала способностью трассировать всего несколько частиц в событии через очень простую экспериментальную установку [1]. После значительного усовершенствования частей программы, отвечающих за геометрию и трассировку, новая версия GEANT 3.21 была выпущена в марте 1994 года. С тех пор эта версия является основной рабочей версией и значительных изменений в нее не вносилось.

GEANT – программа для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество. Первоначально разработанная для экспериментов по физике высоких энергий, сегодня она применяется в таких областях, как медицина, биология и астрофизика.

Основные направления использования GEANT в физике высоких энергий:

1) трассировка частиц сквозь экспериментальную установку для моделирования отклика детектора;

2) графическое представление экспериментальной установки и траектории частиц.

Эти два направления объединены в интерактивной версии GEANT. Такой подход очень продуктивен, так как позволяет

проводить прямые наблюдения того, что происходит с частицей во время прохождения через детектор и значительно облегчает отладку программы.

В соответствии с этими направлениями GEANT позволяет:

1) описывать экспериментальную установку как структуру геометрических объемов. Каждому объему присваивается соответствующий идентификатор (номер) среды ([GEOM]). Различные объемы могут обладать одинаковыми идентификаторами среды, которая определяется так называемыми параметрами трассировки через среду (TRACKING MEDIUM parameters, включающими в себя описание материала, заполняющего объем [CONS];

2) использовать события, полученные при моделировании каким-либо генератором взаимодействий [KINE];

3) трассировать частицы сквозь различные области экспериментальной установки, принимая во внимание геометрические формы различных объемов и физические эффекты в соответствии с природой частиц, с видами взаимодействий со средой и магнитными полями в среде [TRAK], [PHYS];

4) записывать траекторию частиц и отклик чувствительных элементов детекторов [TRAK], [HITS];

5) визуализировать детекторы и траекторию частиц [DRAW], [XINT].

Программа, созданная пользователем для моделирования, содержит обязательные и необязательные подпрограммы, определяющие действие GEANT на различных этапах работы. Задачами пользователя являются:

1) создание пользовательских подпрограмм, описывающих входные данные и экспериментальное окружение;

2) компоновка необходимых программных сегментов и утилит в выполняемую программу;

3) создание соответствующих потоков данных, контролирующих выполнение программы.

Основная программа в процессе своего выполнения проходит три этапа:

- 1) инициализация;
- 2) обработка события;
- 3) прекращение работы.

Пользователь на каждом из этих этапов может включить свой собственный код в соответствующие подпрограммы.

Инициализация управляется пользователем в подпрограмме UGINIT. Процедура инициализации состоит из следующих шагов, большинство из которых осуществляется вызовом соответствующих подпрограмм GEANT:

GINIT — инициализация общих блоков GEANT параметрами по умолчанию;

GFFGO — чтение данных для изменения параметров и установок по умолчанию или для обеспечения информацией о текущем событии;

GZINIT — инициализация менеджера по работе с банками памяти;

GDINIT — инициализация пакета рисования;

GPART — заполнение массива JPART свойствами частиц [CONS];

GMATE — заполнение массива JMATE характеристиками используемых материалов [CONS].

Затем следует пользовательский код, в котором определяются:

- 1) геометрия различных составляющих экспериментальной установки, которые хранятся в массивах данных JROTM и JVOLU;
- 2) параметры среды, через которую происходит трассировка [CONS], [TRAK], хранящиеся в массиве данных JTMed;

3) те элементы установки, которые необходимо рассматривать как чувствительные, дающие отклик, когда частица проходит сквозь них [HITS].

Обычно все это определяется в пользовательской подпрограмме UGEOM.

GGCLOS — обработка всей пользовательской информации и подготовка к трассировки частиц;

GBHSTA — создание стандартных гистограмм GEANT, если требуется пользователем;

GPHYSI — вычисление таблиц энергетических потерь и сечений и запись их в массив JMATE. [CONS], [PHYS]

Обработка события начинается с вызова подпрограммы GRUN, которая для каждого события должна выполняться, передавая контроль выполнения программы следующим подпрограммам:

GTRIGI — инициализация расчета события и создание заголовочного массива JHEAD;

GTRIG — обработка одного события;

GTRIGC — очистка памяти, отведенной для одного события;

Во время своего выполнения GTRIG вызывает следующие подпрограммы:

GUKINE — генерирует или читает первоначальную кинематику и записывает ее в массивы JVERTX и JKINE;

GUTREV — вызывает GTREVE, которая производит следующие действия с вершиной: 1) перемещает все частицы, соответствующие вершине, из постоянного стека JKINE во временный JSTAK, 2) контролирует прохождение каждой частицы сквозь установку, вызывая GUTRAK/GTRACK; каждая частица трассируется в свою очередь, и после пересечения чувствительного объема пользователь может записать любую необходимую информацию в массив данных JHITS.

Массив JSTAK является массивом вида LIFO (Last In – First Out). Это значит, что вторичная частица, образованная при трассировке первичной, будет трассироваться дальше, а трассировка первичной частицы начнется только после того, как будет закончена трассировка вторичной и всех частиц, рожденных вторичной частицей. Необходимо подчеркнуть, что трассировка вторичных частиц в GEANT по умолчанию не производится. Пользователь должен сам определить, трассировать вторичные частицы или нет через подпрограммы GSKING/GSKPHO. Массив данных JXYZ, содержащий пространственные координаты треков частиц, может быть заполнен во время трассировки [TRAK].

GUDIGI — моделирует отклик детектора на событие, используя информацию о хитах, записанную в массив JHITS во время трассировки частиц. Информация об отклике детектора хранится в массиве JDIGI [HITS].

GUOUT — осуществляет все необходимые действия при окончании обработки события и записывает всю информацию.

Некоторые дополнительные подпрограммы вызываются во время обработки события:

1) адронное взаимодействие моделируется с помощью GHEISHA [2] или FLUKA [3,4,5]. В подпрограммах GUPHAD и GUNADR пользователь может выбрать, какой из методов будет использован для генерации адронного ливня. По умолчанию в GEANT используется GHEISA.

2) подпрограмма GUSWIM вызывается в том случае, если происходит трассировка заряженной частицы в магнитном поле.

Прекращение работы контролируется пользователем в подпрограмме GULAST. В простейшем случае она может содержать просто вызов подпрограммы GLAST, которая вычисляет и печатает некоторую статистическую информацию, например: время на одно событие, параметры использования памяти и т.д.

Взаимодействие между программными элементами GEANT осуществляется посредством массивов данных переменных, сгруппированных в несколько общих блоков. К тому же, внутри каждого программного сегмента подпрограммы взаимодействуют друг с другом с помощью обмена аргументами.

В GEANT чтение вводимых данных осуществляется подпрограммой GFFGO, которая использует пакет FFREAD [6]. Ключевые слова, считываемые GFFGO, можно разделить на следующие типы:

- 1) общее управление;
- 2) управление физическими процессами;
- 3) управление процедурой отладки и процедурами ввода вывода;
- 4) пользовательские приложения;
- 5) генерация события.

Стандартные вводимые данные описываются в GEANT следующим образом: KEY – ключевое слово, описывающее данные, сокращенное до 4 символов, N – максимальное число вводимых переменных, T – тип переменных. До вызова GFFGO пользователь может определить свои вводимые данные, используя вызов подпрограммы FFKEY:

```
CALL FFKEY ('key', VAR(1), NVAR, 'type')
```

Эти данные будут распознаваться GEANT таким же образом, как и предопределенные в GEANT данные.

Кинематические переменные в GEANT всегда соответствуют так называемой Master Reference System (MARS). Эта система определяется как локальная система отсчета, в которой определен первый объем, содержащий все остальные объемы (элементы) детектора. MARS – это декартова система координат, в которой $\mathbf{z}=[\mathbf{x};\mathbf{y}]$.

Экспериментальная установка описывается определением первичного объема, в котором будут размещены все остальные

объемы детектора. В терминологии GEANT каждый объем, содержащий внутри себя другие объемы, созданные добавлением или делением первичного объема, называется Материнским. Объемы внутри Материнского называются Дочерними. Дочерние объемы в свою очередь могут содержать внутри себя объемы и, следовательно, будут по отношению к ним Материнскими.

Каждый объем, определенный в GEANT, имеет систему отсчета, присвоенную этому объему. Если этот объем содержит другие, то система отсчета называется Mother Reference System (MRS). Каждый дочерний объем имеет свою Daughter Reference System (DRS).

Основными физическими единицами измерения в GEANT являются: сантиметр, секунда, килогаусс, гигаэлектронвольт, гигаэлектронвольт в секунду (ГэВ/с), гигаэлектронвольт в секунду в квадрате (ГэВ/с²) и градус.

Ниже приведен костяк стандартной программы, использующей GEANT. Пользовательские подпрограммы, которые рекомендуется использовать при составлении основной программы, выделены **жирным шрифтом**.

```
PROGRAM GEXAMP
PARAMETER (NGBANK=50000, NHBOOK=5000)
COMMON/GCBANK/Q (NGBANK)
COMMON/PAWC /H (NHBOOK)
С--> Инициализация памяти NBOOK и GEANT
CALL GZEBRA ( NGBANK)
CALL HLIMIT (-NHBOOK)
С--> Инициализация графики
CALL HPLINT (0)
CALL IGMETA (8, 0)
С--> Инициализация GEANT
CALL UGINIT
С--> Начало обработки события
```

```
CALL GRUN
C--> Конец обработки события
CALL UGLAST
END
```

*-----

--

```
SUBROUTINE UGINIT
C--> Инициализация GEANT
CALL GINIT
C--> Чтение вводимых данных
OPEN(4, FILE='gcards.dat', STATUS='UNKNOWN')
CALL GFFGO
C--> Инициализация структуры данных
CALL GZINIT
C--> Инициализация графики
CALL GDINIT
IF(NRGET.GT.0) THEN
C--> Чтение структуры данных из файла
CALL GRFILE(1,'mygeom.dat','I')
ELSE
C--> Инициализация таблиц частиц
CALL GPART
C--> Описание геометрии и материалов
CALL UGGEOM
ENDIF
C--> Таблицы энергетических потерь и сечений
CALL GPHYSI
IF(NRSAVE .GT. 0) THEN
C--> Сохранение параметров структур данных
CALL GRFILE(2,'mysave.dat','NO')
ENDIF
C--> Печать банков данных
```

```
CALL GPRINT('MATE',0)
CALL GPRINT('TMED',0)
CALL GPRINT('VOLU',0)
C--> Запись гистограмм
END
```

*-----

--

SUBROUTINE **UGEOM**

C--> Определяются материалы геометрия и среда трассировки

C--> Записываются банки данных о геометрии.

```
CALL GGCLOS
```

```
END
```

*-----

--

SUBROUTINE **GUKINE**

C--> Генерируется кинематика

C--> Карта данных KINE itype x y z px py pz

```
CALL GSVERT(PKINE,0,0,0,0,NVERT)
```

```
CALL GSKINE(PKINE(4),IKINE,NVERT,0,0,NT)
```

C--> Печатается кинематика

```
IF (IDEBUG.NE.0) THEN
```

```
CALL GPRINT('VERT',0)
```

```
CALL GPRINT('KINE',0)
```

```
END IF
```

```
END
```

*-----

--

SUBROUTINE **GUSTEP**

C--> Вызывается в конце каждого шага трассировки

C--> Отладка программы

```
CALL GDEBUG
C--> Запись созданных частиц
IF (NGKINE.GT.0) CALL GSKING (0)
END
```

```
*-----
```

```
--
```

```
SUBROUTINE UGLAST
```

```
C--> Подпрограмма завершенияTermination
routine
C--> Печатаются гистограммы и статистика
CALL GLAST
C--> Закрывается файл HIGZ/GKS
CALL IGEND
END
```

В GEANT используется технология ZEBRA для хранения больших структур данных, это позволяет адаптировать размер данных программы с размером решаемой задачи. Вызов GZEBRA инициализирует общий банк данных /GCBANK/, в котором хранится структура данных GEANT. Эта операция должна быть выполнена до выполнения любых других операций в системе GEANT. Вызов HLIMIT инициализирует систему ZEBRA для использования общих блоков /PAWC/ пакета гистограммирования HBOOK. Вызов HLIMIT должен происходить после вызова GZEBRA и аргумент должен определять размерность общего банка /PAWC/ со знаком минус. Основная программа работает в фоновом режиме. Если есть необходимость осуществления моделирования в интерактивном режиме, необходимо подключить интерактивную программу GXINT до вызова пользовательского кода. В показанном примере используется графическое приложение. Часто для программ в фоновом режиме или для небольших тестов графика не нужна. Для того чтобы исключить графику из своей

программы, необходимо удалить вызов следующих подпрограмм IGINIT, IGMETA, IGEND, GDINIT и GDEBUG. С другой стороны, если пользователь хочет включить и отладку, и графику, необходимо добавить следующий код:

```
SUBROUTINE GDCXYZ  
ENTRY IGSA  
ENTRY GDTRAK  
END
```

Пользовательский код для определения среды и геометрии должен быть определен в подпрограмме UGEOM. Предопределенная структура данных тоже может быть считана с диска, однако в любом случае рекомендуется произвести вызов подпрограммы GPHYSI для инициализации таблиц сечений.

Удобно сохранять входные данные в специальном входном файле. Это позволяет использовать стандартный способ ввода и в случае необходимости легко менять исходные данные, не компилируя основную программу. Пример стандартного файла gcards.dat приведен ниже:

```
READ 4  
TRIG 10  
STOP
```

В первой строке содержится инструкция FFREAD открыть и начать обрабатывать файл с логическим номером 4, во второй строке определяется (переопределяется) количество событий для обработки. Последняя строка завершает ввод данных из файла.

Одной из основной задач при создании программы моделирования на GEANT является описание экспериментальной установки. Это осуществляется описанием геометрии и среды (материала). Способ задания среды, заполняющей объем, состоит в задании двух блоков параметров. Первый из них определяет природу материала, заполняющего объем, и содержит такую информацию, как атомный номер, атомный вес, плотность и т.д.

(подробнее см. описание подпрограммы GSMATE). Второй набор параметров определяет процесс трассировки частицы: магнитное поле, точность трассировки, максимальные энергетические потери на один шаг трассировки и т.д. (подробнее см. описание подпрограммы GSTMED). Каждой среде прохождения соответствует материал через определенный пользователем уникальный номер среды. Различным средам прохождения могут соответствовать, с определенными ограничениями, одинаковые материалы. Каждый объем заполняется средой прохождения с определенным номером среды. Различные объемы могут заполняться одинаковыми средами прохождения. Трассировка частицы сквозь экспериментальную установку требует доступа к данным, описывающим: геометрию детектора, материал и среду прохождения, свойства частиц.

В GEANT есть стандартные материалы, которые уже определены и описаны в массиве данных JMATE. Следующая подпрограмма осуществляет запись стандартных материалов в массив данных:

```
CALL GMATE
```

В случае необходимости существует возможность определить свой материал и записать его в массив данных.

```
CALL GSMATE (IMATE, CHNAMA, A, Z, DENS, RADL, ABSL, UB  
UF, NWBUF)
```

IMATE – номер материала (INTEGER);

CHNAMA – имя материала (CHARACTER *20);

A – атомный вес (REAL);

Z – заряд (REAL);

DENS – плотность в гр/см³ (REAL);

RADL – радиационная длина в см (REAL);

ABSL – длина абсорбции в см (REAL);

UBUF – массив NWBUF пользовательских переменных (REAL);

NWBUF – количество переменных UBUF (INTEGER).

Существует возможность получить параметры материала:

CALL GFMATE

(IMATE,CHNAMA,A,Z,DENS,RADL,ABSL,UBUF,NWBUF).

Параметры вызываемой подпрограммы те же, что и в **GSMATE**.

Подпрограмма:

CALL GPMATE (IMATE)

осуществляет печать параметров материала. Как отмечалось выше, помимо определения материала, необходимо также задать и среду трассировки. Данная операция осуществляется вызовом следующей подпрограммы:

CALL GSTMED (ITMED, NATMED, NMAT, ISVOL, IFIELD, FIELDM, TMAXFD, STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, UBUF, NWBUF)

ITMED – номер среды трассировки (INTEGEER);

NATMED – имя среды трассировки (CHARACTER *20);

NMAT – номер материала (INTEGER);

ISVOL – идентификатор того, является ли среда регистрирующей (INTEGER):

<0 не регистрирующий объем;

>0 регистрирующий объем;

IFIELD – идентификатор магнитного поля (INTEGER):

=0 нет магнитного поля;

=1 сильно неоднородное магнитное поле (определенное пользовательской функцией GUFLLD): трассировка происходит с использованием метода Рунге-Куты в подпрограмме GRKUTA;

=2 неоднородное магнитное поле (определенное пользовательской функцией GUFLLD): трассировка по спирали осуществляется подпрограммой GHFLIX;

=3 однородное магнитное поле вдоль оси z величиной, определенной в FIELD, трассировка по спирали осуществляется подпрограммой GHHELIX3;

FIELDM – максимальное значение магнитного поля в килогауссах (REAL);

TMAXFD – максимальное угловое отклонение в магнитном поле на один шаг трассировки, в градусах (REAL);

STEMAX – максимальное значение шага трассировки в см (REAL);

DEEMAX – максимальные относительные энергетические потери на один шаг трассировки $0 < DEEMAX < 1$ (REAL);

EPSIL – точность пересечения границ в см (REAL);

STMIN – минимальное значение энергетических потерь, обусловленных множественным рассеянием, черенковским излучением или эффектами магнитного поля для максимального шага трассировки, в см (REAL);

UBUF – массив NWBUF пользовательских переменных (REAL);

NWBUF – количество переменных UBUF (INTEGER).

Существует возможность получить параметры материала:

CALL **GFTMED** (ITMED, NATMED, NMAT, ISVOL, IFIELD, FIELDM, TMAXFD, STEMAX, DEEMAX, EPSIL, STMIN, UBUF, NWBUF)

Параметры вызываемой подпрограммы те же, что и в **GFTMED**.
Подпрограмма:

CALL **GPTMED** (ITMED)

осуществляет печать параметров среды трассировки.

Во время инициализации необходимо задать параметры частиц, участвующих в моделировании. Эта процедура осуществляется вызовом подпрограммы:

CALL **GPART**

при выполнении которой записываются характеристики стандартных частиц в структуру данных JPART. Подпрограмма **CALL GPIONS**

производит запись характеристик ионов в структуру данных JPART. Пользователь может определить сам и другие частицы или переопределить некоторые свойства стандартных частиц:

CALL GSPART (IPART, CHNPART, ITRTYP, AMASS, CHARGE, TFILE, UB, NWB)

IPART – номер частицы (INTEGER);

CHNPART – имя частицы (CHARACTER *20);

ITRTYP – тип подпрограммы трассировки (INTEGER);

1 – трассировка подпрограммой GTGAMA;

2 – трассировка подпрограммой GTELEC;

3 – трассировка подпрограммой GTNEUT;

4 – трассировка подпрограммой GTHADR;

5 – трассировка подпрограммой GTMUON;

6 – трассировка специальной частицы geantino производится подпрограммой GTNINO;

7 – трассировка тяжелых ионов производится подпрограммой GTCKOV;

8 – трассировка фотонов производится подпрограммой GTHION.

AMASS – вес частицы в ГэВ (RAEL);

CHARGE – заряд частицы (REAL);

TFILE – время жизни частицы в секундах (REAL);

UB – массив NWB пользовательских переменных (REAL);

NWB – количество переменных UB (INTEGER).

Существует возможность получить параметры частицы:

CALL GFPART (IPART, CHNPART, ITRTYP, AMASS, CHARGE, TFILE, UB, NWB)

Параметры вызываемой подпрограммы те же, что и в **GSPART**.
Подпрограмма:

CALL GPPART (IPART)

осуществляет печать параметров частицы.

Неотъемлемой частью GEANT является возможность визуализировать информацию о проводимых модельных расчетах. Для этой цели предназначен программный пакет рисования, который выполняет следующие функции: визуализирует компоненты детектора, изображает логическое дерево этих компонентов, рисует траекторию частиц, показывает хиты в регистрирующих элементах детектора. Визуализация может происходить как в интерактивном режиме работы, так и при вызове подпрограмм основной программы.

Лучший способ работы с графикой — это инициализация программного пакета HPLOT [7] подпрограммой HPLINT. GDINIT производит вызов программного пакета визуализации GEANT. Основными подпрограммами которого являются:

- GDRAW – рисует проекцию детектора;
- GDRVOL – рисует другую проекцию детектора;
- GDRAWC – рисует разрез детектора вдоль одной из осей;
- GDRAWX – рисует разрез детектора под любым углом;
- GDXYZ – рисует треки по окончании обработки события;
- GDCXYZ – рисует треки во время трассировки частицы;
- GDPART – рисует имя частицы и номер трека в конце события;
- GDAHIT – рисует один хит;
- GDHITS – рисует хиты для детекторов, измеряющих траекторию;
- GDCHIT – рисует хиты для детекторов типа калориметр;
- GDTREE – рисует геометрическое дерево созданных объемов детектора;
- GDSPEC – рисует спецификацию указанного объема;
- GDFSPC – рисует спецификацию нескольких указанных объемов.

Для задания геометрии детектора служит программный пакет геометрии. Его основными задачами являются: определение на этапе инициализации геометрии детектора, сквозь которую будет происходить трассировка частицы; осуществление взаимодействия, во время обработки события, между подпрограммами трассировки и информацией о среде трассировки частицы. Взаимодействие устанавливается подпрограммами GMEDIA/GTMEDI, GTNEXT/GNEXT и GINVOL, которые дают ответы на следующие вопросы: в каком объеме данная точка, каково расстояние до ближайшего объема вдоль траектории частицы, каково расстояние до ближайшего объема, данная точка все еще в текущем объеме. При задании каждого объема определяются следующие характеристики: имя, форма, локальная координатная система, свойства вещества, заполняющего объем, свойства среды трассировки, набор параметров для визуализации объема. До того как объем не будет позиционирован в основной системе координат, он не имеет никакого пространственного соответствия с другими объемами детектора. Первоначальный объем должен быть определен самым первым, он и содержит основную координатную систему. Данный объем является материнским для всех остальных объемов, определенных впоследствии.

Пользователь может определить объем, используя следующие подпрограммы: GSVOLU, GSPOS, GSPOSP, GSDVN, GSDVT, GSDVX. Рассмотрим подробнее основные.

CALL **GSVOLU** (CHNAME, CHSHAP, NMED, PAR, NPAR, IVOLU)

CHNAME – уникальное имя объема (CHARACTER* 4);

CHSHAP – имя формы объема. В GEANT существуют 16 форм, которые используются для определения объема: коробка, три типа трапециевидов, два типа труб, два типа конусов, сфера, параллелепипед, поликонус, полигон, эллиптически рассеянная

труба, гиперболическая труба, скрученный трапециод, обрезанная труба.

NMED – среда трассировки для данного объема, если объем располагается внутри другого, то его среда трассировки замещает материнскую (INTEGER)

PAR – массив, содержащий параметры формы объема (REAL);

NPAR – количество параметров, описывающих форму (INTEGER);

IVOLU – номер объема (INTEGER).

CALL **GPVOLUME** (IVOLU) – производит печать параметров объема. Подпрограмма **GSPOS** осуществляет позиционирование данного объема внутри материнского

CALL **GSPOS** (CHMANE, NR, CHMOTH, X, Y, Z, IROT, CHONLY)

CHMANE – имя позиционируемого объема (CHARACTER *4);

NR – номер копии позиционируемого объема (INTEGER);

CHMOTH – имя объема в который происходит размещение объема CHMANE (CHARACTER *4);

X – координата x позиционируемого объема в основной системе координат (REAL);

Y – координата y позиционируемого объема в основной системе координат (REAL);

Z – координата z позиционируемого объема в основной системе координат (REAL);

IROT – номер матрицы вращения, описывающей ориентацию объема относительно координатной системы материнского объема (INTEGER);

CHONLY – индекс показывает, размещен ли данный объем только в данном материнском объеме или он может находиться в других материнских объемах. Возможные значения ONLY или MANY (CHARACTER *4).

Часто при описании детектора возникает необходимость определять одинаковые по своим свойствам объемы, отличающиеся только размерами, например при описании электромагнитного калориметра. В этом случае удобно и логично присвоить всем объемам одинаковые имена и различные параметры позиционирования и размеров. Это можно сделать, определяя объем с нулевыми параметрами в подпрограмме **GSVOLU** и присваивая параметры в подпрограмме **GSPOSP**. Эта подпрограмма в основном подобна **GSPOS**, за исключением того, что объем с нулевыми параметрами может быть позиционирован только **GSPOSP**, где определяются параметры объема.

CALL **GSPOS** (CHMANE, NR, CHMOTH, X, Y, Z, IROT, CHONLY, PAR, NPAR)

PAR – массив, содержащий параметры формы объема (REAL);

NPAR – количество параметров, описывающих форму (INTEGER).

По изложенному материалу предлагается провести две лабораторные работы.

Лабораторная работа №1

Цель: моделирование электромагнитного ливня в калориметре.

В процессе выполнения работы студент должен:

1) изменить имеющуюся программу-заготовку к предлагаемым условиям – прохождения гамма кванта через чередующиеся слои свинца и сцинтиллятора (PbW_4);

2) уметь выводить полученную информацию в выходной файл;

3) уметь визуализировать процесс прохождения частицы через калориметр;

4) менять тип первоначальной частицы. Например, гамма-квант на электрон;

5) провести анализ полученных результатов – получить картину развития электромагнитного ливня.

Лабораторная работа №2

Цель: моделирование адронного ливня в калориметре.

В процессе выполнения работы студент должен:

- 1) изменить имеющуюся программу-заготовку к предлагаемым условиям – прохождение гамма-кванта через чередующиеся слои свинца и сцинтиллятора (PbWO_4);
- 2) уметь выводить полученную информацию в выходной файл;
- 3) уметь визуализировать процесс прохождения частицы через калориметр;
- 4) менять тип первоначальной частицы, например, протон на нейтрон;
- 5) провести анализ полученных результатов – получить картину развития адронного ливня;
- 6) модифицировать программу с целью моделирования “*preshower*”.

Дополнительная литература по теме GEANT3

- [1]. Brun R, Hansroul M., and Lassalle J.C. // *GEANT User's Guide*, DD/EE/82 edition, 1982.
- [2] Fesefeldt H.C. Simulation of hadronic showers, physics and applications.// Technical Report PYTHIA 85-02, III Physikalisches Institut, RWTH Aachen Physikzentrum, 5100 Aachen, Germany, September 1985.
- [3] Aarnio P.A. et al. Fluka user's guide.// Technical Report TIS-RP-190, CERN, 1987, 1990.
- [4] Fass'o A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R., Stevenson G.R., and Zazula J.M.// FLUKA92. In *Proceedings of the Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments*, Santa Fe, USA, 11-15 January 1993.
- [5] Fass'o A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R., Stevenson G.R., and Zazula J.M. A Comparison of FLUKA Simulations with measurements of Fluence and Dose in Calorimeter Structures.// *Nuclear Instruments & Methods A*, 332:459, 1993.
- [6] Brun R. et al.// *FFREAD User Guide and Reference Manual*, dd/us/71 edition, February 1987.
- [7] Brun R. and Renshall H.// HPLLOT users guide, Program Library Y251. CERN, 1990.

Оглавление

1. РАБОТА В ROOT.....	3
1.1. Общие сведения.....	3
1.2. Первые шаги в ROOT. Скрипты.....	6
1.3. Гистограммы.....	9
1.4. Сложение, деление и умножение гистограмм.....	11
1.5. Прочие аспекты работы с гистограммами.....	12
1.6. Фитирование гистограмм.....	13
1.7. Гистограммы (II).....	16
1.8. Двухмерные гистограммы.....	18
1.9. Графики.....	19
1.10. Деревья.....	23
2. ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ	
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	31
2.1. PYTHIA.....	31
2.2. UrQMD.....	42
2.3. Генератор столкновений HIJING	47
3. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ПРОГРАММОЙ GEANT3.....	58

Алексей Александрович Богданов
Кирилл Олегович Лapidус
Сергей Леонидович Тимошенко

Практикум по методам обработки и моделирования в
современных экспериментах по физике высоких энергий

Учебное пособие

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 20.11.2008. Формат 60x84 1/16

Уч.-изд.л. 5,0. Печ.л. 5,0. Тираж 120 экз.

Изд. №3/48 Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет).
115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства “Трoвант”.
г. Троицк Московской области

