РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ НЕЙТРИНО НА УСКОРИТЕЛЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСПАДОВ ПИ-МЕЗОНА($\pi-$) И К-МЕЗОНА($K-$) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ GEANT4

Цели работы

1) **Изучение формирование нейтринных пучков на ускорителе**
2) **Изучение принципа работы с программным пакетом Geant4**
3) **Изучения принципы построения гистограмм в библиотеке Root**
4) **Построение модели, аналог ускорителя У-70**
5) **Произвести расчет импульсных спектров для нейтринных пучков в ускорителе**

Geant4(Geometry and Tacking 4)

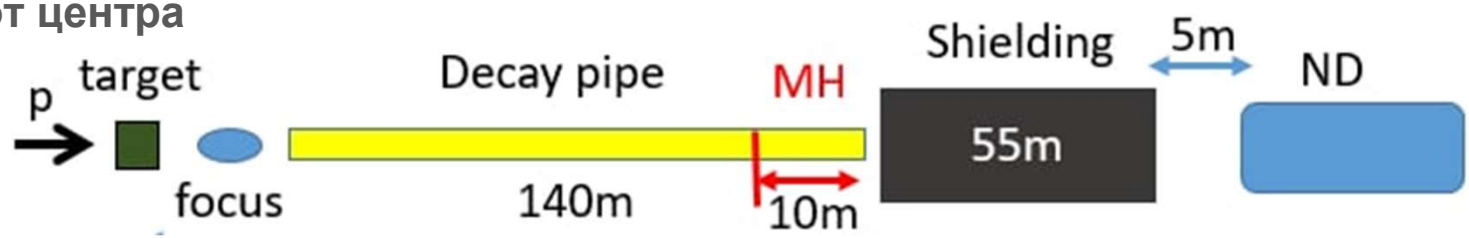
GEANT4 – программа для симуляции методом МонтеКарло, взаимодействий частиц, проходящих через вещество. Программа написана на языке C + +. Она используется во многих областях физики высоких энергий, в таких областях, как медицина и астрофизика, где необходим учет ядерных взаимодействий. Это программа с открытым исходным кодом, поэтому каждый пользователь может модифицировать ее для своих целей.

Экспериментальная установка

Задача - рассмотреть формирование пучка нейтрино на ускорителе определить импульсные спектры и определить доли мюонного антинейтрино в пучке Пи-мезона($\pi-$) и К-мезона($K-$) в тестовой модели установки У-70.

Удалить часть основных частей, параметры которых были изменены для удобства измерений:

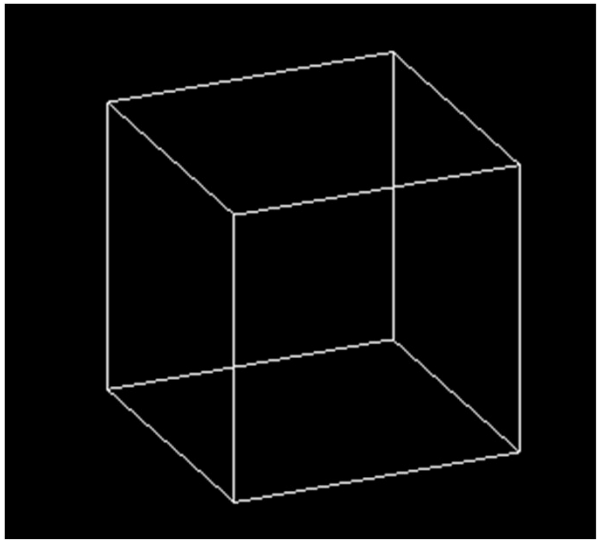
- **ParticleGun - генератор частиц, находящийся в начале координат**
- **Decay Pipe - вакуумная трубка в которой летит сгенерированная частица, длинной 100 м, радиусом 1 м**
- **Shielding - железный слой, длинной 50 м**
- **ND - детектор, для регистрации нейтрино, радусом 1 м, и длинной 1 м, находящийся на расстоянии 150 м от центра**



Визуализация элементов эксперимента

1. **Материнское пространство**

```
G4Box* soli dWo rl d = new G4Box ("World " , 0.5 * world_sizeXY ,
0.5 * world_sizeXY , 0.5 * wo rld_ sizeZ ) ;

G4Material * world_mat = ni s t ->FindO rBuildMa te rial ("
G4_Galactic " ) ;

G4LogicalVolume * logi cWo rl d = new G4LogicalVolume ( solidWo
rld , world_mat , "World " ) ;

G4VPhysicalVolume* physWorld = new G4PVPlacement ( 0 ,
G4ThreeVector ( ) , logicWo rld , "World " , 0 , f a l s e , 0 , t r u e ) ;
```

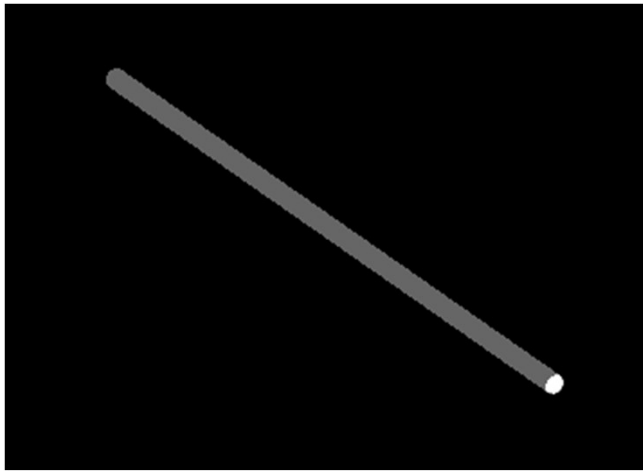


Визуализация элементов эксперимента

2. Источник частиц(Particle Gun)

```
G4int n_ p a r ti cl e = 1 ;
fPa r ti cl eG u n = new G4ParticleGun ( n_ p a r ti cl e ) ;
G4Pa r ti cl eTa bl e ∗ p a r t i c l e T a b l e = G4Pa r ti cl eTa bl e : : G e tPa r ti cl e Ta
bl e ( ) ;
G4String pa r ticleName ;
G 4 P a r t i c l e D ef i n i t i o n ∗ p a r t i c l e = p a r ti cl e T a bl e −>Fi n dP a r ti cl e
( pa r ticleName="pi −");
fPa r ti cl eG u n−>S e t P a r t i c l e D e f i n i t i o n ( p a r t i c l e ) ;
fPa r ti cl eG u n−>Se tPa r ticleMomen tumDi rec tion ( G4ThreeVector ( 0 . , 0 . , 1 . )
) ; fPa r ti cl eG u n−>S e tP a r ti cl eE n e r g y (10 + 5 . G4UniformRand ( ) ) ∗GeV;
```

Визуализация элементов эксперимента



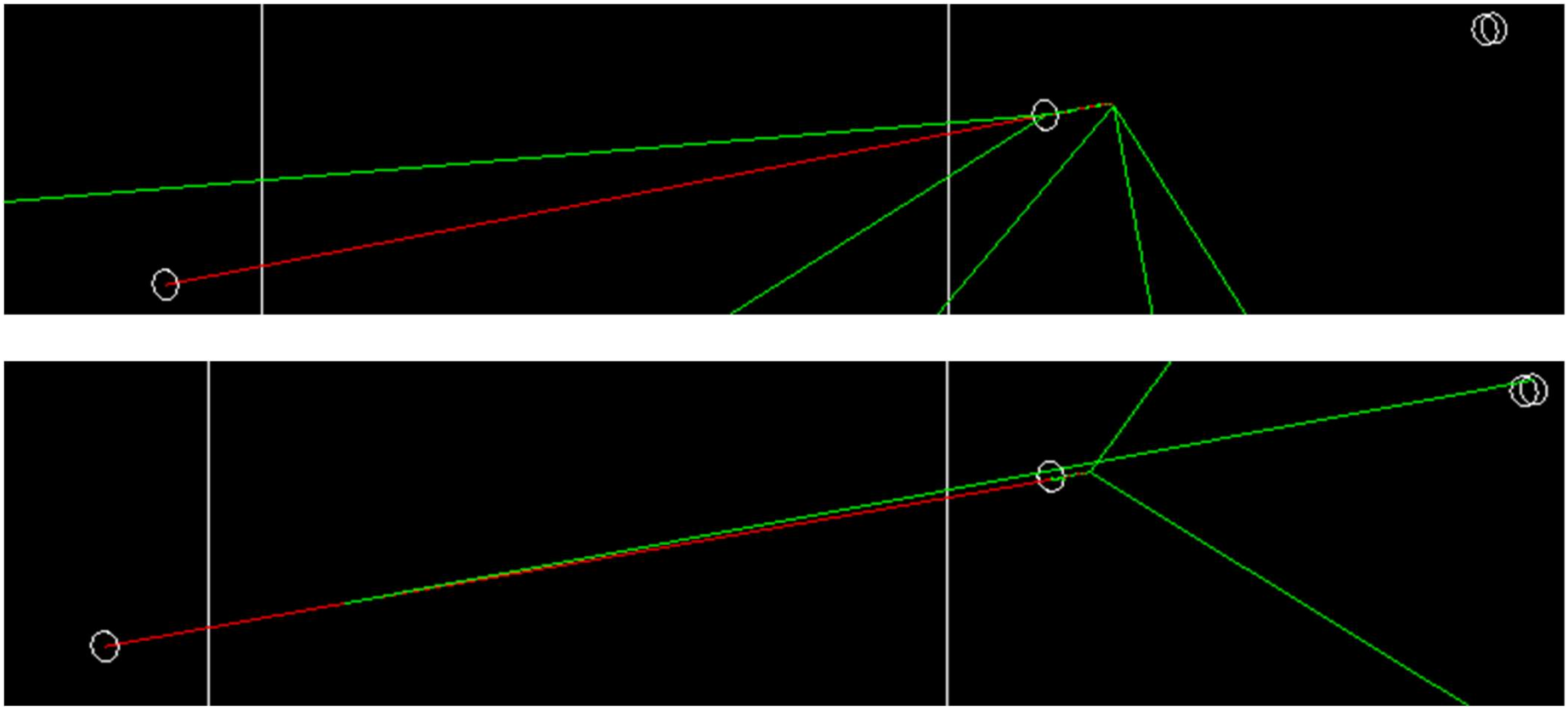
3. Тормозной слой

Тормозной слой, также как распадный и детектор нейтрино реализованы в виде цилиндра различных длин, материалов и радиусов.

```
G4NistManager∗ n i s t = G4NistManager : : I n s t a n c e ( ) ;

G4Material ∗tubeMatFe = ni s t −>FindO rBuildMa te rial ("G4_Fe " ) ;

 G4Tubs∗ s oli d T a r g e t L a y e r 1 = new G4Tubs ( " s oli d T a r g e t L a y e r 1 " , 0. ∗m, 1.
∗m, 25. ∗m, 0 ∗ deg ree , 360∗ d eg r e e ) ;

fLogi cTa rg e tLa y e r1 = new G4LogicalVolume ( soli dTa rg e tLa y e r1 , tubeMatFe , " fLogi
cTa rg e tLa y e r1 " , 0 , 0 , 0 ) ;

fPhy sTa rge tLaye r1 = new G4PVPlacement ( 0 , G4ThreeVector (0 ,0 ,75 ∗m) , " physTa
rgetLayer1 " , fLogi cTa rge tLa ye r1 , fPh y sE xpe rimen talHall , f a l s e , 0 , chec kO ve rlap s
) ;
```

Визуализация элементов эксперимента

Аналогичным образом создается вакуумный цилиндр и детектор.



Получение и обработка данных

Для наглядности полученых данных из каждого шага(G4Step), был использован макрофайл из примера B1, под названием run.mac.

```
*********************************************************************************************************
* G4Track Information:   Particle = pi-,   Track ID = 1,   Parent ID = 0
*********************************************************************************************************

Step#    X(mm)    Y(mm)    Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng  NextVolume ProcName
    0        0        0   -5e+04  9.86e+03        0        0         0     expHall initStep
    1        0        0 2.86e+04  9.86e+03 2.64e-21 7.86e+04  7.86e+04     expHall Decay

*********************************************************************************************************
* G4Track Information:   Particle = mu-,   Track ID = 3,   Parent ID = 1
*********************************************************************************************************

Step#    X(mm)    Y(mm)    Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng  NextVolume ProcName
    0        0        0 2.86e+04  7.11e+03        0        0         0     expHall initStep
    1    -31.4     78.2    5e+04  7.11e+03 7.19e-22 2.14e+04  2.14e+04 physTargetLayer1 Transportation
    2     -105      261    1e+05  7.11e+03 1.68e-21    5e+04  7.14e+04 physTargetLayer2 Transportation
    3     -106      264 1.01e+05  7.11e+03 3.35e-23    1e+03  7.24e+04  OutOfWorld Transportation

*********************************************************************************************************
* G4Track Information:   Particle = anti_nu_mu,   Track ID = 2,   Parent ID = 1
*********************************************************************************************************

Step#    X(mm)    Y(mm)    Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng  NextVolume ProcName
    0        0        0 2.86e+04  2.79e+03        0        0         0     expHall initStep
    1     81.4     -203    5e+04  2.79e+03        0 2.14e+04  2.14e+04 physTargetLayer1 Transportation
    2      271     -675    1e+05  2.79e+03        0    5e+04  7.14e+04 physTargetLayer2 Transportation
    3      275     -685 1.01e+05  2.79e+03        0    1e+03  7.24e+04  OutOfWorld Transportation
```

Использование библиотеки Root для построения гистограмм

Были созданы функции различных зависимостей, которые были использованы при построении различных графиков.

```
co n s t G4double mom = theStep−>GetPreStepPoint ()−>GetMomentum ( ) . mag ( ) ;

co n s t G4double zPos = theStep−>Ge tPos tS tepPoin t ()−>G e tPo si tio n ( ) . z ( ) ;

co n s t G4double mu_coor = theStep−>GetPreStepPoint ()−>G e tPo si tio n ( ) . z ( ) ;

co n s t G4double a ngl e = 57.29∗ s t d : : a co s ( theStep−>Ge tPos tS tepPoin t ( )
−>GetMomentumDirection ( ) . z ( ) ) ;

G4AnalysisManager ∗man = G4AnalysisManager : : I n s t a n c e ( ) ;

man−>FillNtupleDColumn ( 0 , zPos ) ; man−>AddNtupleRow ( 0 ) ;
```

Результаты моделирования

Исходя из табличных значений, масса и время жизни для пи-мезона($\pi -$), составляет:

1. **Mass m = 139.57018 ± 0.00035 MeV;**
2. **Lifetime τ = 2.6033 ± 0.0005 × 10−8 s;**
3. **Схема распада для $\pi -$: $\pi - \rightarrow \mu + \nu$.**

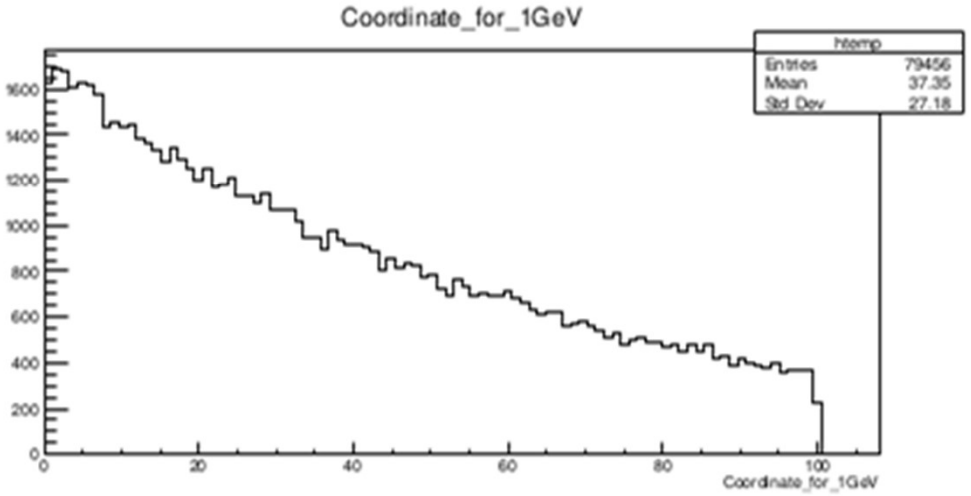
Для К-мезона($K-$):

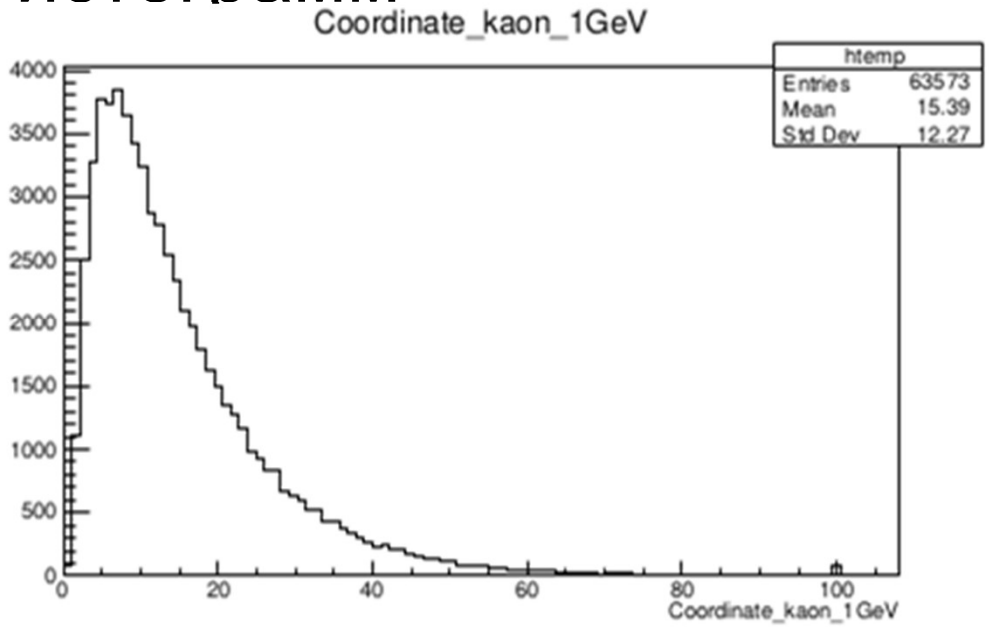
1. **Mass m = 493.677 ± 0.005 MeV;**
2. **Lifetime τ = 1.2380 ± 0.0020 × 10−8 s;**
3. **Из всех возможных распадов $K-$, 63% состоявляет: $K- \rightarrow \mu - + \bar{}\nu\mu$.**

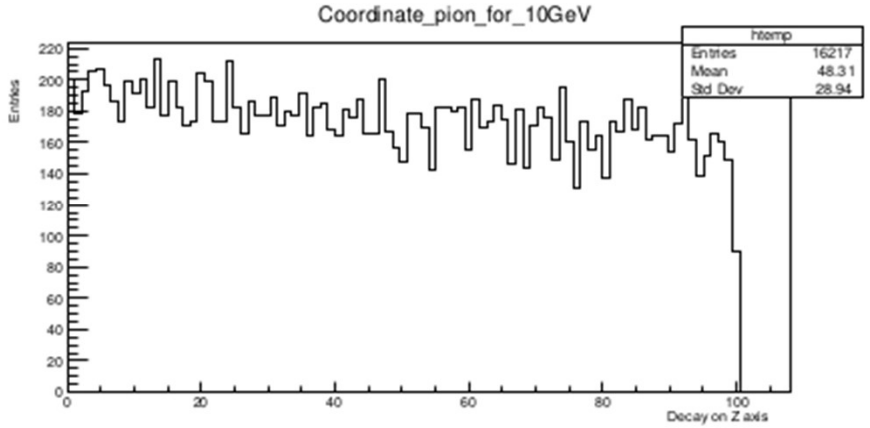
Координату распада можно вычислить по формуле:

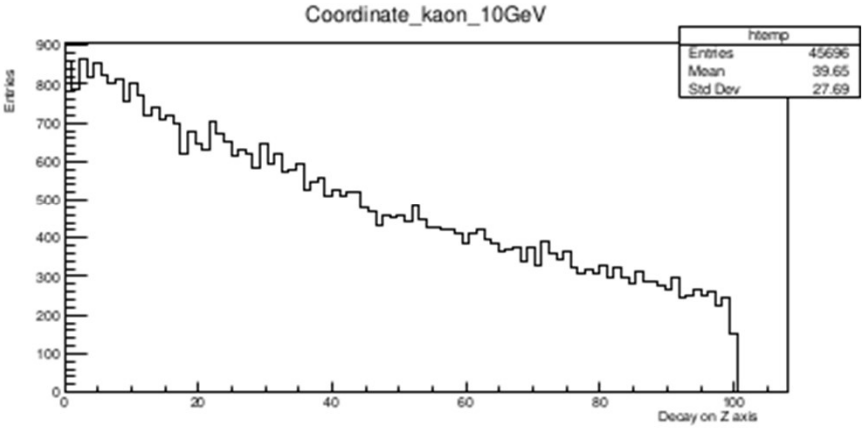
$$Z\text{рас} = c \cdot (\gamma\text{^(2) − 1)^(0.5)} \cdot \tau \approx 7\text{м}.$$

Построение гистограмм

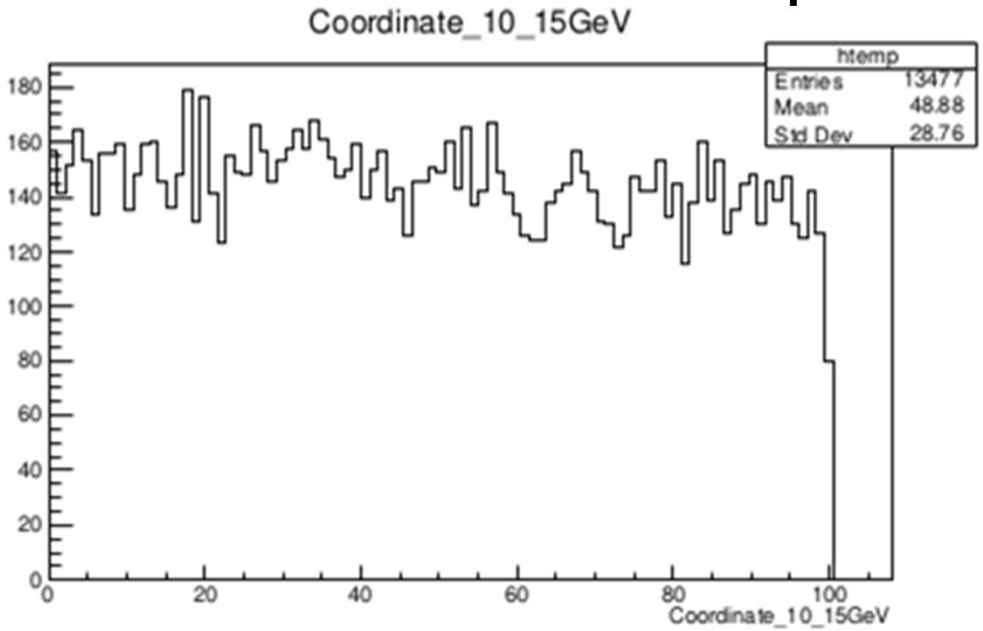


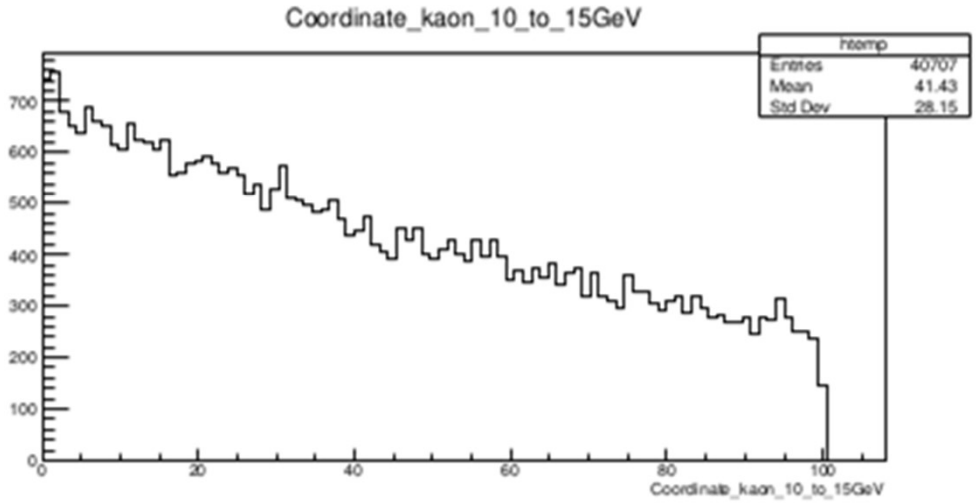


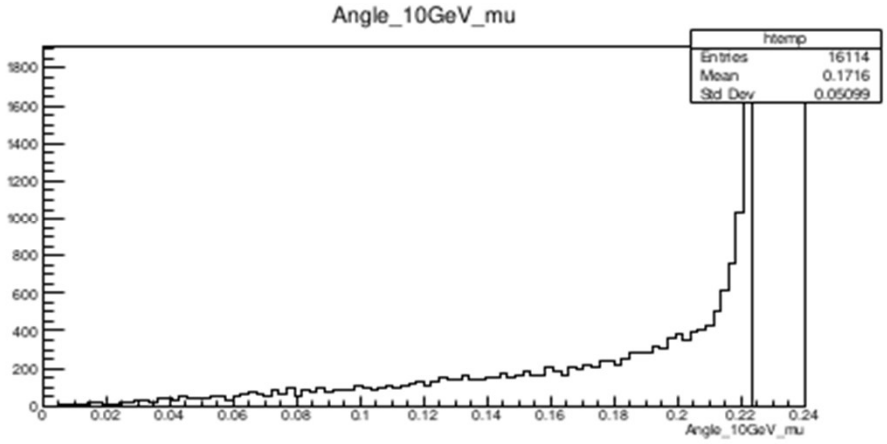


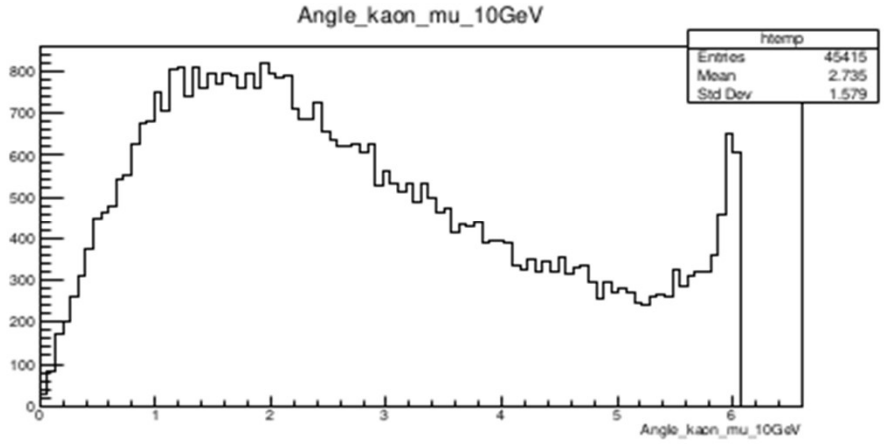


Построение гистограмм

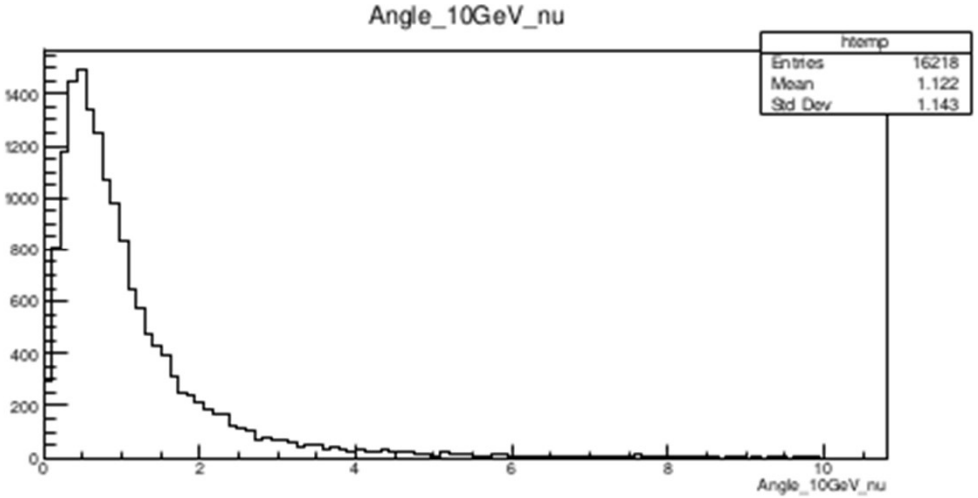


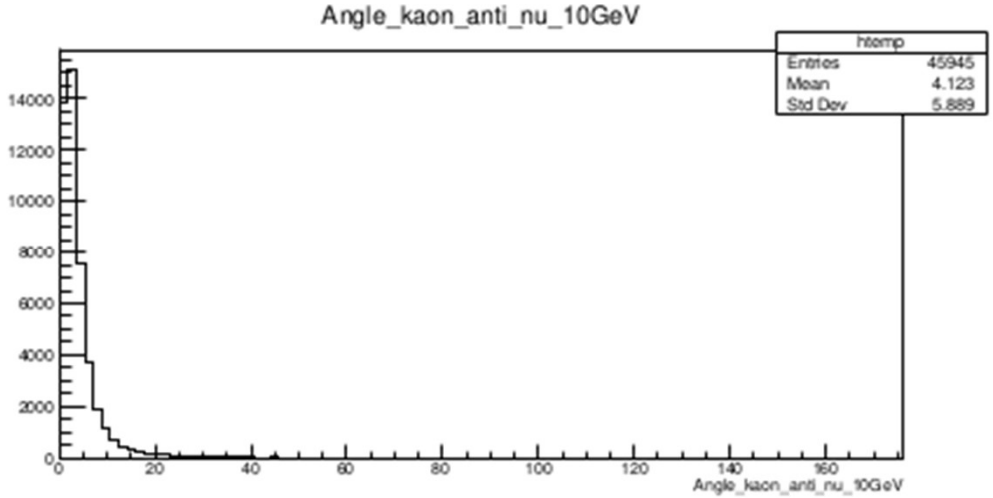


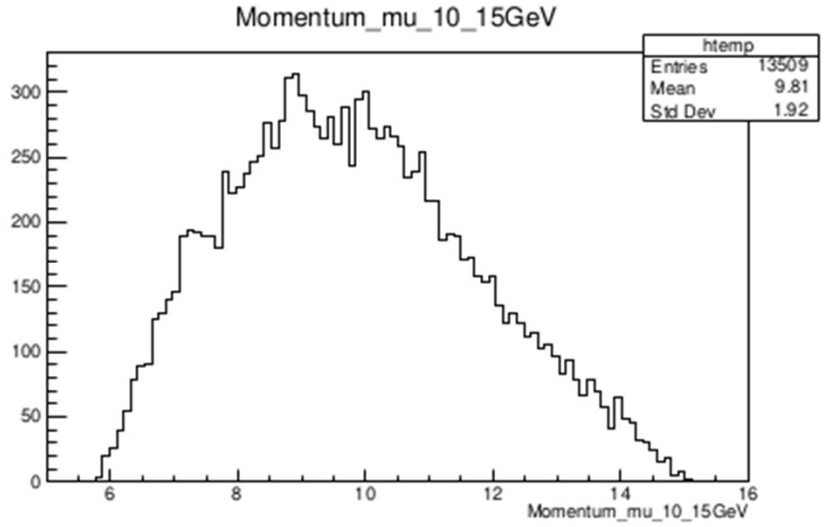


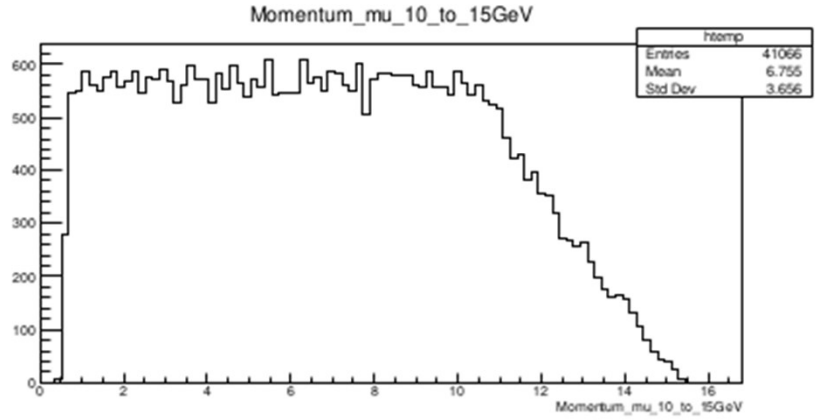


Построение гистограмм

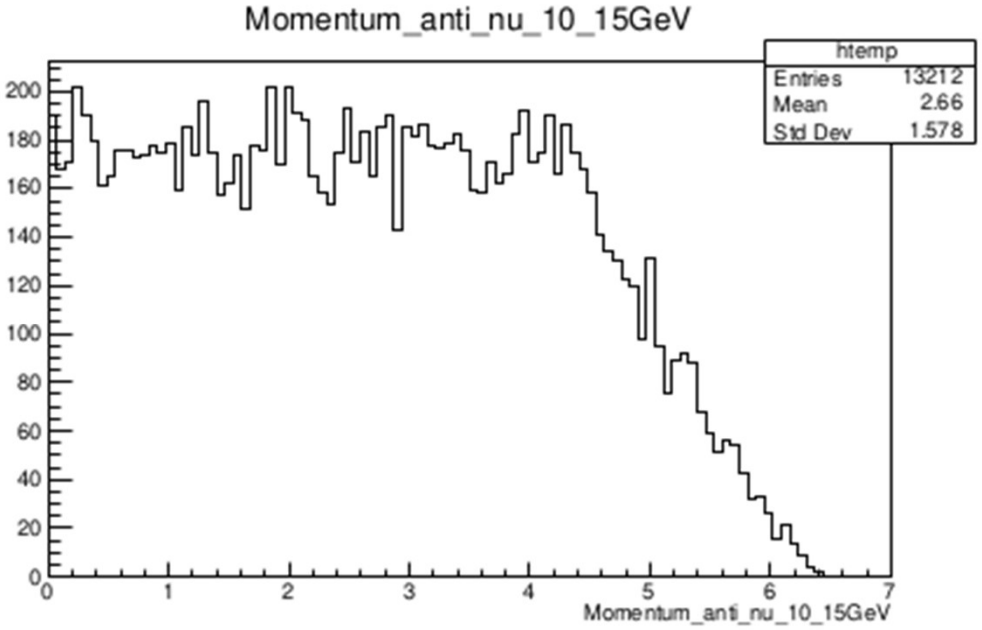


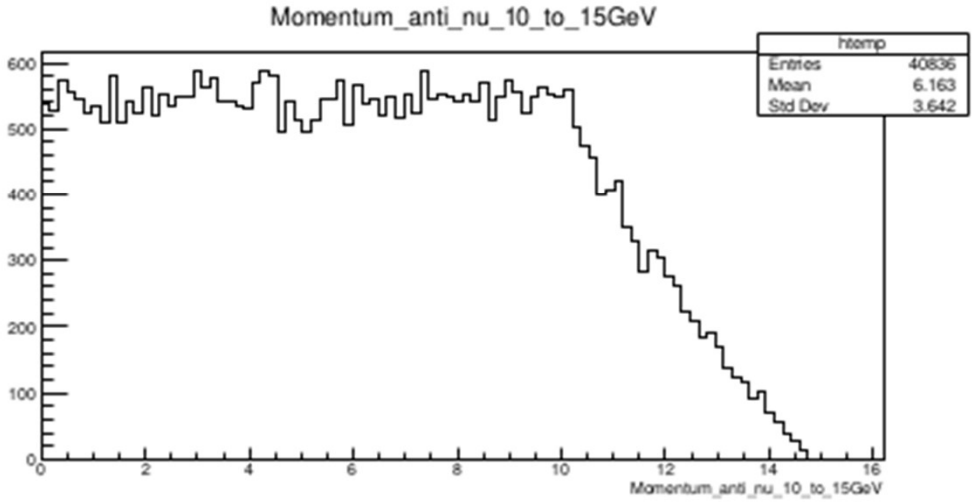






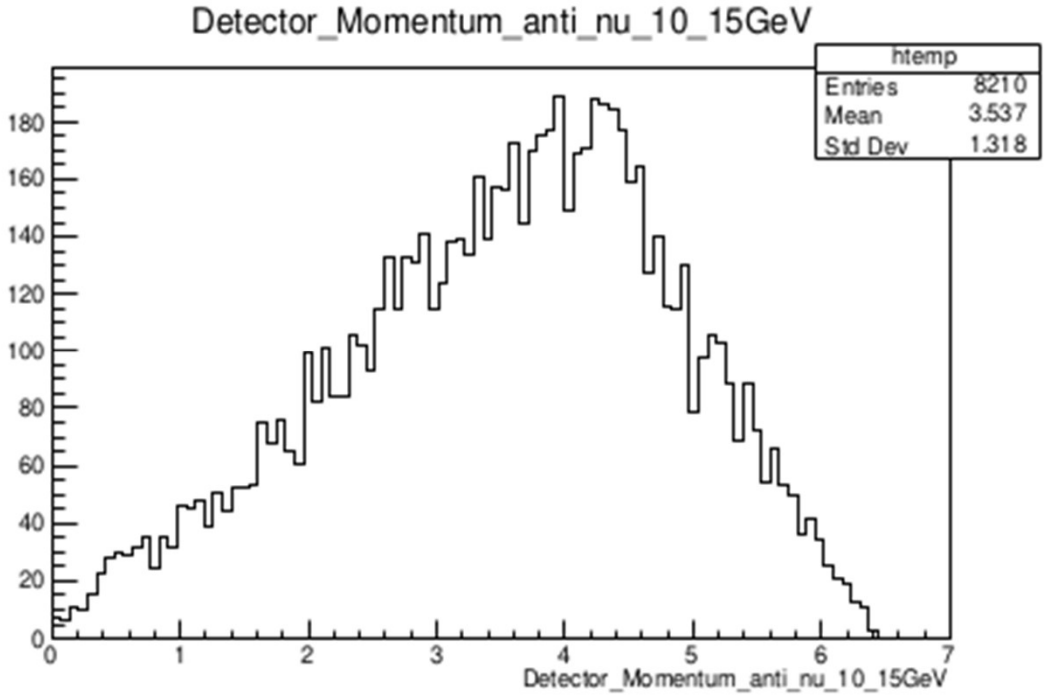
Построение гистограмм

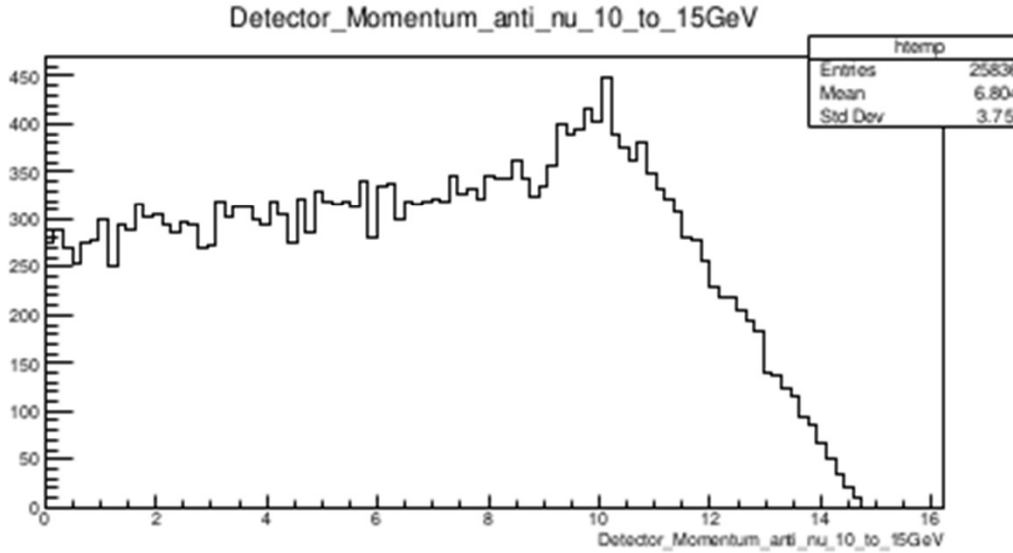




На рисунке построено распределения импульсов для мюонного антинейтрино после распада частиц с энергиями от 10 до 15 GeV на оси Z для Пи-мезона(π −)(a), К-мезона(K−)(b).

Построение гистограмм





На рисунке построен спектр импульсов для мюонного антинейтрино попавшего в чуствительную область детектора в результате распада Пи-мезона(π −) и К-мезона(K−) с энергиями в диапазоне от 10 до 15 GeV. Импульсный спектр для К-мезона(K−) является более жёстким.

Заключение

В данной работе были изучены:

- **Формирование нейтринных пучков на ускорителе**
- **Принципы работы с программным пакетом Geant4**
- **Принципы построения гистограмм в библиотеке Root**
- **Построенна модель, аналог ускорителя У-70**
- **Произведен импульсный расчет нейтринных пучков в ускорителе**

В ходе тестового моделирования было рассмотрено формирование пучка нейтрино на ускорителе. Средние значения для импульсов мюонного антинейтрино в результате распада составляет 6.163 GeV, для распада К-мезона, и 2.66 GeV Пи-мезона. В прогоне 100000 частиц, доля распавшихся родительских частиц составляет 41% и 13%, а доля мюонного антинейтрино попавших в область детектора в результате распада, составляет 26% и 8%, для К и Пи мезонов, соответсвенно.