



Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Кафедра физики элементарных частиц №40



Выпускная квалификационная работа студента на тему:

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ ЛЕГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Научный руководитель:
Тимошенко С.Л.

Работа
студента 4-ого курса
Захарова Арсения
Михайловича
ИЯФиТ

г. Москва 2022

Цель работы

- Изучение рождения легких векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов;
- Моделирование канала распада векторного мезона ϕ в условиях эксперимента ATLAS на два нейтральных каона $\phi \rightarrow K_L^0 K_S^0$ с последующим распадом на противоположно заряженные пионы $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$;
- Полное моделирование полученных данных в условиях эксперимента ATLAS;
- Сравнение с независимым MC генератором и экспериментальными данными, полученными при столкновениях релятивистских ядер свинца при энергии $\sqrt{s} = 5,02 \text{ TeV/нуклон}$ на БАК в эксперименте ATLAS.

Введение

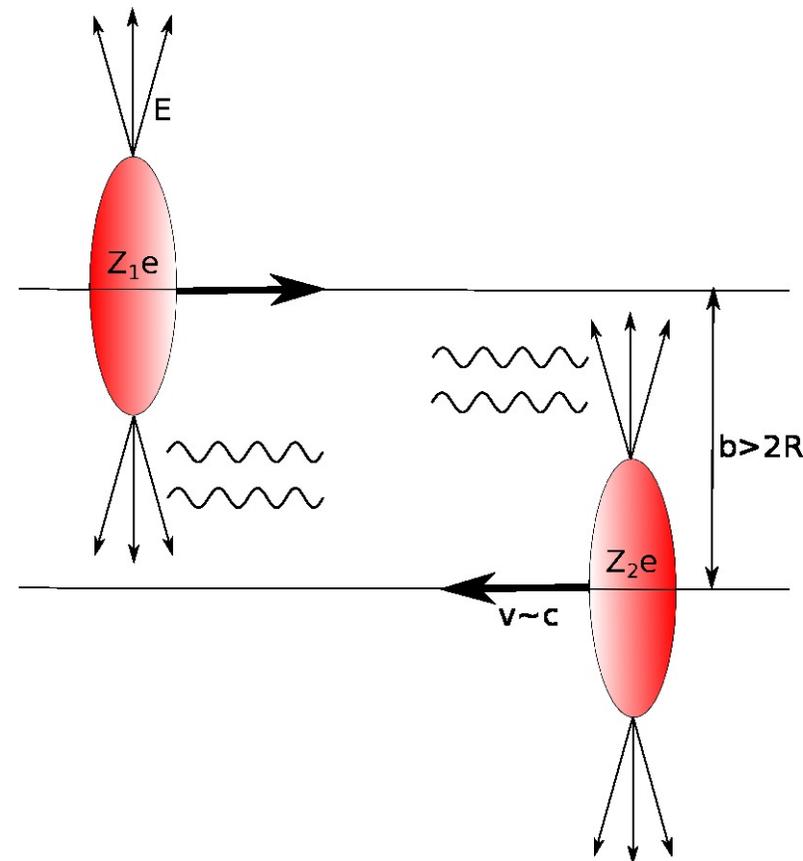
Классификация реакций при релятивистских столкновениях тяжелых ионов:

- центральные ($b \sim 0$ или $b < R$);
- периферические ($b \sim R$);
- ультрапериферические ($b > 2R$).

При ультрапериферических столкновениях происходят:

- когерентные фотон-фотонные ($\gamma - \gamma$) взаимодействия;
- фотон-померонные ($\gamma - P$) взаимодействия;
- померон-померонные ($P - P$) взаимодействия.

При ультрапериферических взаимодействиях возможно образование лептонных пар, векторных мезонов, струй и т.д.



Ультрапериферическое взаимодействие

Монте-Карло генераторы

- В настоящее время для моделирования столкновений частиц с частицами, частиц с ядрами и ядер с ядрами максимально близкого к действительности разработано большое количество программ, основанных на Монте-Карло методе случайных испытаний.

Для моделирования событий на ATLAS используются генераторы:

- генераторы PYTHIA, включая его версию PYTHIA8;
- HERWIG;
- Sherpa;
- STARLight и многие другие.

STARLight - Монте-Карло генератор, моделирующий двухфотонное и фотон-померонное взаимодействие между релятивистскими ядрами и протонами.

Программа была разработана для изучения образования частиц в ультрапериферических взаимодействиях при энергиях RHIC в эксперименте STAR.

С развитием физики тяжелых ионов и открытием более масштабных проектов, программный пакет STARLight был расширен до энергий, используемых на БАК.

STARLight

Two-Photon Channels

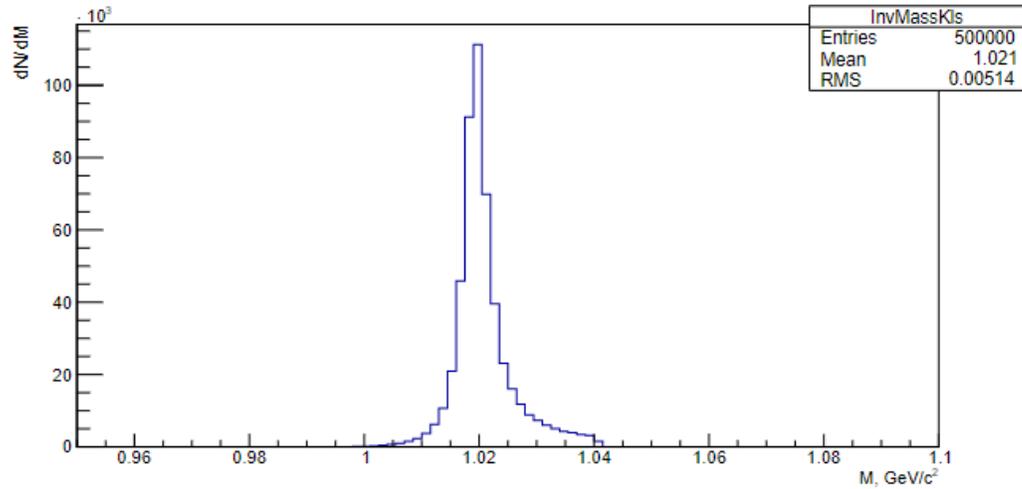
Particle	Jetset ID
e^+e^- pair	11
$\mu^+\mu^-$ pair	13
$\tau^+\tau^-$ pair	15
$\tau^+\tau^-$ pair, polarized decay	10015*
ρ^0 pair	33
$a_2(1320)$ decayed by PYTHIA	115
η decayed by PYTHIA	221
$f_2(1270)$ decayed by PYTHIA	225
η' decayed by PYTHIA	331
$f_2(1525) \rightarrow K^+K^-(50\%), K^0\bar{K}^0(50\%)$	335
η_c decayed by PYTHIA	441
$f_0(980)$ decayed by PYTHIA	9010221

Vector Meson Channels

Particle	Jetset ID
$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	113
$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ and direct $\pi^+\pi^-$ production, including the interference.	913
$\omega \rightarrow \pi^+\pi^-$	223
$\phi \rightarrow K^+K^-$	333
$J/\psi \rightarrow e^+e^-$	443011
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	443013
$\Psi(2S) \rightarrow e^+e^-$	444011
$\Psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	444013
$Y(1S) \rightarrow e^+e^-$	553011
$Y(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	553013
$Y(2S) \rightarrow e^+e^-$	554011
$Y(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	554013
$Y(3S) \rightarrow e^+e^-$	555011
$Y(3S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	555013
$\rho' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	999

За основу моделирования $\phi \longrightarrow K_S^0 K_L^0$ был взят 333 канал

Результаты генерации событий с помощью STARLight



Распределение по инвариантной массе пары каонов

Параметры:

Среднее время жизни каонов

Долгоживущий: $t = (5.116 \pm 0.021) \times 10^{-8}$ sec

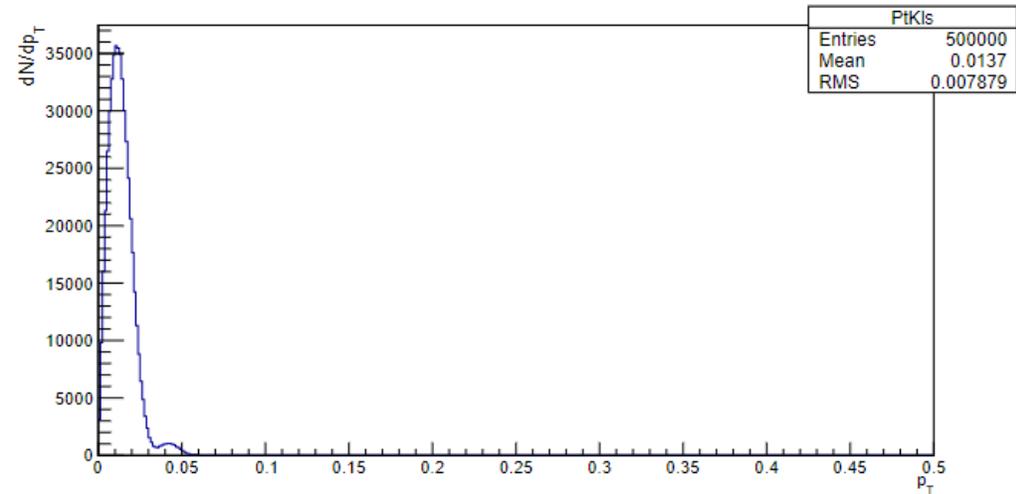
Короткоживущий: $t = (8.954 \pm 0.004) \times 10^{-11}$ sec

Массы каонов: $M(K_L^0) = M(K_S^0) = 0.497614$ GeV/c²

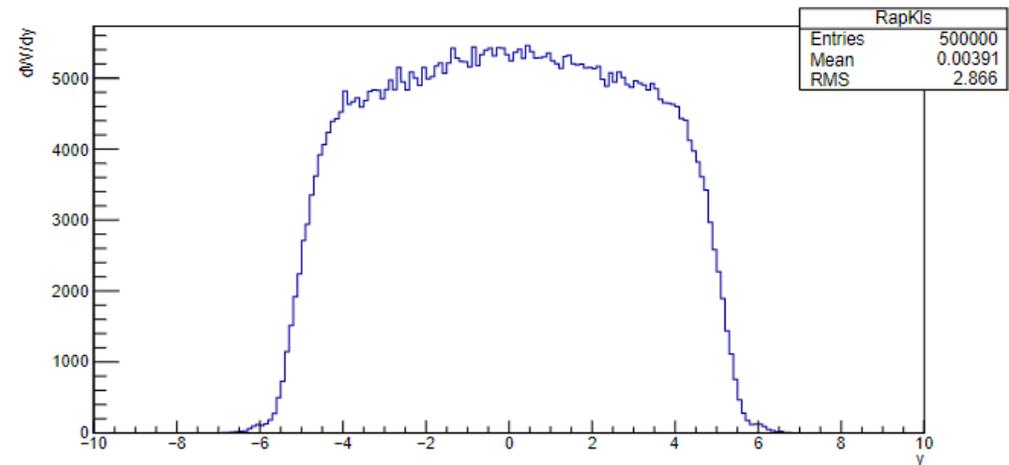
Масса ϕ -мезона : $M(\phi) = 1.019461$ GeV/c²

Ширина ϕ -мезона : $\Gamma(\phi) = 0.004266$ GeV/c²

Branching ratio: $\text{PhiBrKLKS} = 0.342$



Распределение по поперечному импульсу пары каонов



Распределение по быстроте пары каонов

Полное моделирование

- Процесс полного моделирования можно разделить на несколько основных этапов:
 - Генерация событий

Выходной файл сгенерированных событий содержит в себе информацию о сгенерированных частицах. Для stand-alone версии STARLight сгенерированные данные имеют формат ASCII, и представляются в формате:

```
...
EVENT: n ntracks nvertices
VERTEX: x y z t nv nproc nparent ndaughters
TRACK: GPID px py nev ntr stopv PDGPID
...
```

```
#based on 420252
evgenConfig.description = "Starlight gamma + gamma UPC collisions at 5020 GeV to continuum -> 2 e, 3.6 GeV < m < 8 GeV, pT(e)>1.8GeV, |eta(e)|<2.6"
evgenConfig.keywords = ["2photon", "2lepton"]
#evgenConfig.weighting = 0
evgenConfig.contact = ["mateusz.dyndal@cern.ch"]

# TODO: Sort out proper param setting based on runArgs.ecmEnergy
if int(runArgs.ecmEnergy) != 5020:
    evgenLog.error("This JO can currently only be run for a beam energy of 5020 GeV")
    sys.exit(1)

include("Starlight_i/Starlight_Common.py")

genSeq.Starlight.Initialize = \
["beam1Z 82", "beam1A 208", #Z,A of projectile
 "beam2Z 82", "beam2A 208", #Z,A of target
 # TODO: Calculate this from runArgs.ecmEnergy
 "beam1Gamma 2705", #Gamma of the colliding ion1, for sqrt(nn)=5.02 TeV
 "beam2Gamma 2705", #Gamma of the colliding ion2, for sqrt(nn)=5.02 TeV
 "maxW 4", #Max value of w
 "minW 0.6", #Min value of w
 "nmbWBins 200", #Bins n w
 "maxRapidity 3", #max y
 "nmbRapidityBins 200", #Bins n y
 "accCutPt 0", #Cut in pT? 0 = (no, 1 = yes)
 "minPt 0", #Minimum pT in GeV
 "maxPt 10.0", #Maximum pT in GeV
 "accCutEta 0", #Cut in pseudorapidity? (0 = no, 1 = yes)
 "minEta -2.7", #Minimum pseudorapidity
 "maxEta 2.7", #Maximum pseudorapidity
 "productionMode 2", #(1=2_phot,2=vmeson(narrow),3=vmeson(wide))
 "nmbEventsTot 1", #Number of events
 "prodParticleId 334", #Channel of interest
 "beamBreakupMode 5", #Controls the nuclear breakup
 "interferenceEnabled 0", #Interference (0 = off, 1 = on)
 "interferenceStrength 1.", #% of interference (0.0 - 0.1)
 "coherentProduction 1", #Coherent=1, Incoherent=0
 "incoherentFactor 1.", #percentage of incoherence
 "maxPtInterference 0.24", #Maximum pt considered, when interference is turned on
 "nmbPtBinsInterference 120", #Number of pt bins when interference is turned on
 "xsecMethod 1", #Set to 0 to use old method for calculating gamma-gamma luminosity
 "nThreads 1", #Number of threads used for calculating luminosity (when using the new method)
 "pythFullRec 1" #Write full pythia information to output (vertex, parents, daughter etc)
]
```

```
EVENT: 1 2 1
VERTEX: 0 0 0 0 1 0 0 2
TRACK: 0 0.124297 0.0562912 -14.1068 1 0 0 310
TRACK: 10 -0.0649924 -0.033287 -18.2177 1 1 0 130
EVENT: 2 2 1
VERTEX: 0 0 0 0 1 0 0 2
TRACK: 10 0.00863557 0.0637147 11.5942 2 0 0 130
TRACK: 0 -0.102671 -0.0125661 8.55472 2 1 0 310
EVENT: 3 2 1
VERTEX: 0 0 0 0 1 0 0 2
TRACK: 0 0.0948404 0.0129457 -0.253868 3 0 0 310
TRACK: 10 -0.0993462 0.00168524 -0.232482 3 1 0 130
EVENT: 4 2 1
VERTEX: 0 0 0 0 1 0 0 2
TRACK: 0 0.00606019 -0.0517015 -3.02633 4 0 0 310
TRACK: 10 -0.0263082 0.0337192 -1.82674 4 1 0 130
EVENT: 5 2 1
VERTEX: 0 0 0 0 1 0 0 2
TRACK: 0 0.0350755 0.0909863 -9.4007 5 0 0 310
TRACK: 10 -0.00774562 -0.0731236 -7.17847 5 1 0 130
```

Полное моделирование

- Симуляция

На данном этапе происходит симуляция детектирования частиц с помощью Athena реальным детектором: получающиеся адроны проходят через детектирующую среду, и эти взаимодействия моделируются с помощью GEANT4.

Входной файл для симуляции – HepEVNT, не ASCII. Требуется перевод сгенерированных событий в нужный формат.

- Реконструкция

Алгоритмами реконструкции и оцифровки являются те же программные пакеты, которые используются для реконструкции реальных данных ATLAS, кластеризации областей потенциально интересной физики на основе отклика детектора и применения критериев для определения различных типов частиц.

- Задача: Перевод ASCII в HepEVNT
- Решения:
 - Написание конфига по переводу (может быть потеря событий);
 - Сшивка stand-alone и внутреннего STARLight.

Сшивка stand-alone и внутреннего STARLight

- Git — самая популярная современная система управления версиями. Данный проект развивается много лет и имеет миллионы пользователей, многие из которых являются профессиональными разработчиками ПО. Система используется для управления версиями большого числа проектов по разработке программного обеспечения.

Workflow Overview – возможность скопировать Athena/Generators/Starlight_i и подключить локальные библиотеки.

Таким образом, проводится генерация событий внутренним STARLight, выдающего выходной файл формата HerEVNT, но библиотеки, при генерации, принадлежат stand-alone версии STARLight.

The screenshot shows the ATLAS Software Documentation website. The main content area is titled "Workflow Overview" and includes an introduction, a reminder about one-time steps, and instructions on how to set up a basic environment and clone the code. A sidebar on the left contains navigation links for various sections like Basics, Detailed Tutorial, Code Review, and Reference.

Workflow Overview

Last update: 12 Jan 2021 [History] [Edit]

Introduction

This page gives you a quick overview of the ATLAS code development workflow. It is assumed that you worked through the [main git development tutorial](#) at least once. Please refer back to that if you are not clear on any points.

The workflow that ATLAS has adopted is basically [GitLab Flow](#), which offers enough flexibility to manage ATLAS use cases, but is structured enough to avoid a mess.

You may also find it handy to refer to our [git cheat sheet](#) as a quick reference to the most common command and terms.

Reminder: one time steps

You only need to do these steps once, but for completeness we remind you to:

1. Check you have done your [git environment setup](#).
2. Check you have [made a fork](#) of the main ATLAS repository.

⚠ One point to reemphasise is **make sure that `atlasbot` is a developer in your fork** or continuous integration results are not published properly.

Setup your basic environment

Assuming that you will work on an lxplus-like machine you want to start the development workflow by setting up decently modern version of git:

```
ssh lxplus
setupATLAS
leestup git python
```

Clone

Once you have [your fork](#) of the code in GitLab you need to [make a local copy](#) to work with and modify.

Cloning to AFS is slow, so if you have an alternative then we recommend that (e.g., a private local disk area, or even `$TMPDIR` for very short developments).

The screenshot shows the GitHub repository page for 'athena'. It displays the repository's statistics, a recent merge commit, and a table of files with their last commit information.

athena
Project ID: 53790

88,184 Commits | 26 Branches | 2,045 Tags | 110.6 MB Files | 673.8 MB Storage | 230 Releases

The ATLAS Experiment's main offline software repository

DOI: 10.5281/zenodo.2641997 | Doxygen master

master athena

Merge branch 'GeantTruthThinning_re-entrant-cleanup' into 'master' by Johannes Elmsheuser 9 hours ago

Name	Last commit	Last update
.devcontainer	vscode devcontainer: move motd display to ...	4 months ago
.vscode	add vscode setting for gitlab extension	7 months ago
AsgExternal/Asg_Test	Update ASG test inputs	11 months ago
AtlasGeometryCommon	Disable unit test post-processing where not ...	3 weeks ago
AtlasTest	TestTools: fix link to cmake documentation	6 days ago
Build	Removed the excess "--" from the script.	4 months ago
Calorimeter	CaloDepth Tool use enum to avoid too many...	3 days ago
Commission	rename uncalibrated TopoCluster container ...	1 month ago
Control	Merge branch 'jetConfigForReco' into 'master'	5 days ago

Повышение статистики

HTCondor - это высокопроизводительная вычислительная служба. Его задача - решать, как и когда задания, представленные пользователями, должны выполняться с помощью распределенной вычислительной службы. Как только они попадают в начало очереди, они автоматически отправляются на некоторые рабочие узлы службы распределенных вычислений. Затем задания выполняются на узлах, назначенных HTCondor. По завершении каждого из них пользователю возвращаются все результаты, а также все возникшие ошибки.

Ограниченное экранное время lxplus ведет за собой невозможность проведения симуляции и реконструкции более 100 событий, что является слишком малой статистикой;

Преимущества: возможность выполнить практически любую задачу; Большой выбор временных промежутков в течение которых кондор должен провести свою работу.

```
executable = run_reco$(ProcId).sh
universe   = vanilla
output     = output$(ClusterId).$(ProcId)
error      = error$(ClusterId).$(ProcId)
log        = log$(ClusterId)
max_retries = 3
#request_memory = 14000MB
#request_disk = 15000MB
#MAX_TRANSFER_OUTPUT_MB = 14420
+JobFlavour = "workday"

queue arguments from /public/prunTest/condortest/main_100k_simAndReco/sim/amount0to9
```

```
#!/bin/sh

SEED=$RANDOM
echo $SEED
nEvent=10000
echo $nEvent
#setupATLAS
export ATLAS_LOCAL_ROOT_BASE=/cvmfs/atlas.cern.ch/repo/ATLASLocalRootBase
source ${ATLAS_LOCAL_ROOT_BASE}/user/atlasLocalSetup.sh
asetup Athena,21.0.93,here
Sim_tf.py --inputEvgenFile '/afs/cern.ch/user/a/azakharo/public/build/Testing/KLKs_100k.EVNT.pool.root'
--outputHITSFile 'KLKs_10k_Skip10k.HITS.pool.root' --skipEvent=10000
--AMIConfig s3469 --maxEvents $nEvent --randomSeed $SEED
rm -r log.EVNTtoHITS ntuple.pmon.gz
mv KLKs_10k_Skip10k.HITS.pool.root /eos/user/a/azakharo/star_analys is/100k_full/sim
```

```
espresso      = 20 minutes
microcentury  = 1 hour
longlunch     = 2 hours
workday       = 8 hours
tomorrow      = 1 day
testmatch     = 3 days
nextweek      = 1 week
```

ParticleGun

Генератор ParticleGun (PG) является еще одним способом смоделировать несколько событий, отдельную частицу с распадом или без и многие другие интересные реакции, используя при этом программный пакет GEANT4. Его достоинство в том, что PG позволяет передавать генератору общие кинематические и идентификационные образцы частиц, т.е. генератор не использует сечение процесса, а только его кинематику.

PG используется в данной работе как независимый MC генератор для сравнения полученных данных с STARLight.

```
#!/*- python -*-
# Copyright (C) 2002-2017 CERN for the benefit of the ATLAS collaboration

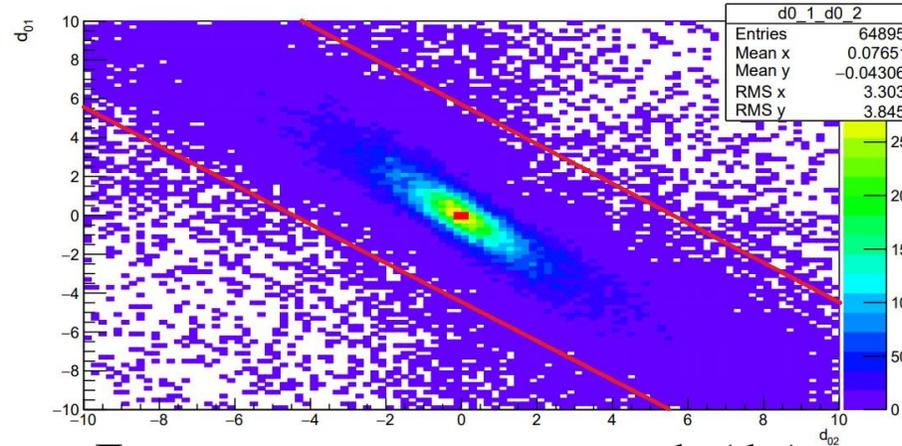
include("GeneratorUtils/StdEvgenSetup.py")
theApp.EvtMax = 10000
import ParticleGun as PG
pg = PG.ParticleGun()
pg.randomSeed = 123456
pg.sampler.pid = {310,130}
pg.sampler.mom = PG.EEtaMPhiSampler(energy=10000, eta=[-2,2])
topSeq += pg
include("GeneratorUtils/postJ0.CopyWeights.py")
include("GeneratorUtils/postJ0.PoolOutput.py")
include("GeneratorUtils/postJ0.DumpMC.py")
```

Несмотря на простоту в использовании, для корректного сравнения необходимо использовать кинематику, полученную из STARLight. Для реконструкции использовались официальные образцы симуляции PG (с учетом геометрии gun 2).

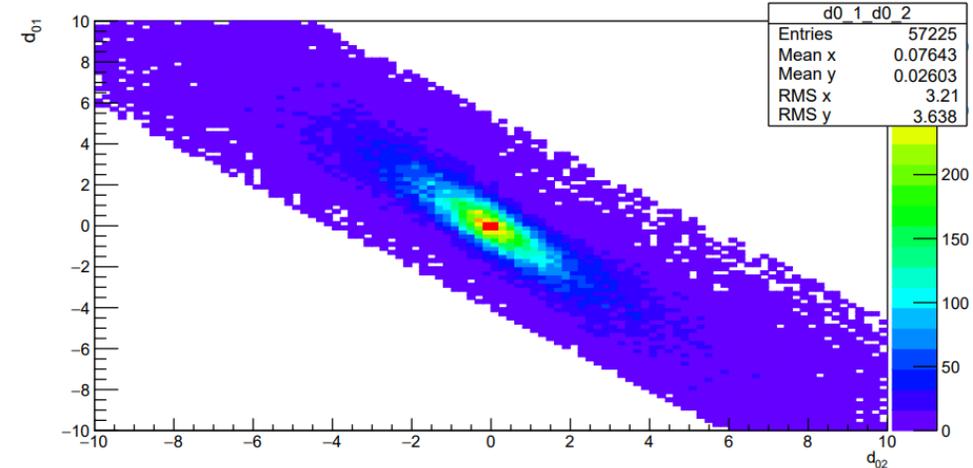
Критерии отбора (STARLight)

Критерии отбора:

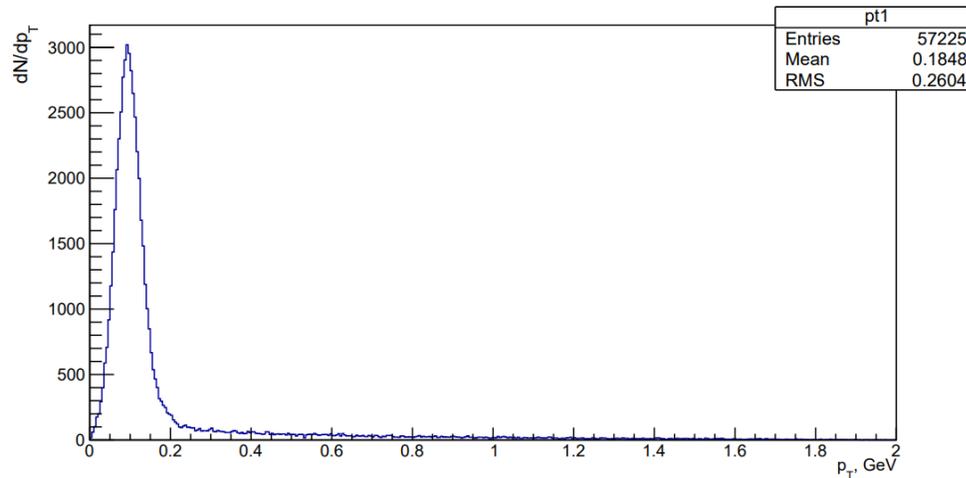
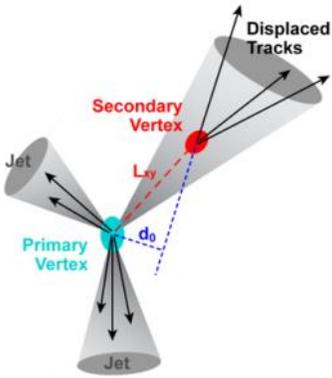
- $N_{\text{tracks}} = 2$;
- $\Sigma Q = 0$;
- $|\eta| < 2.5$;
- $\alpha < 0.9$;
- отбор «коридор» (d_{01} , d_{02});
- Track Seeding



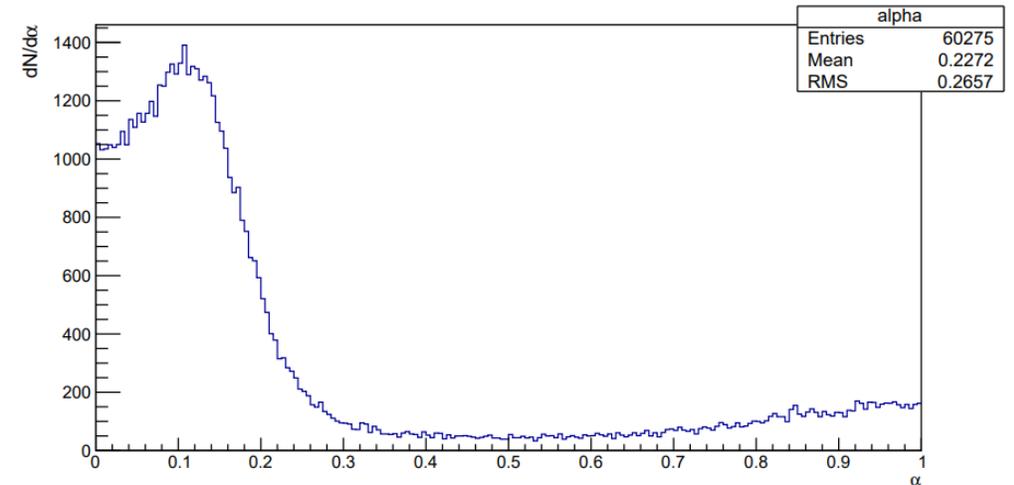
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$,
красным – границы «коридора»



Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$



Распределение по поперечному импульсу двух пионов

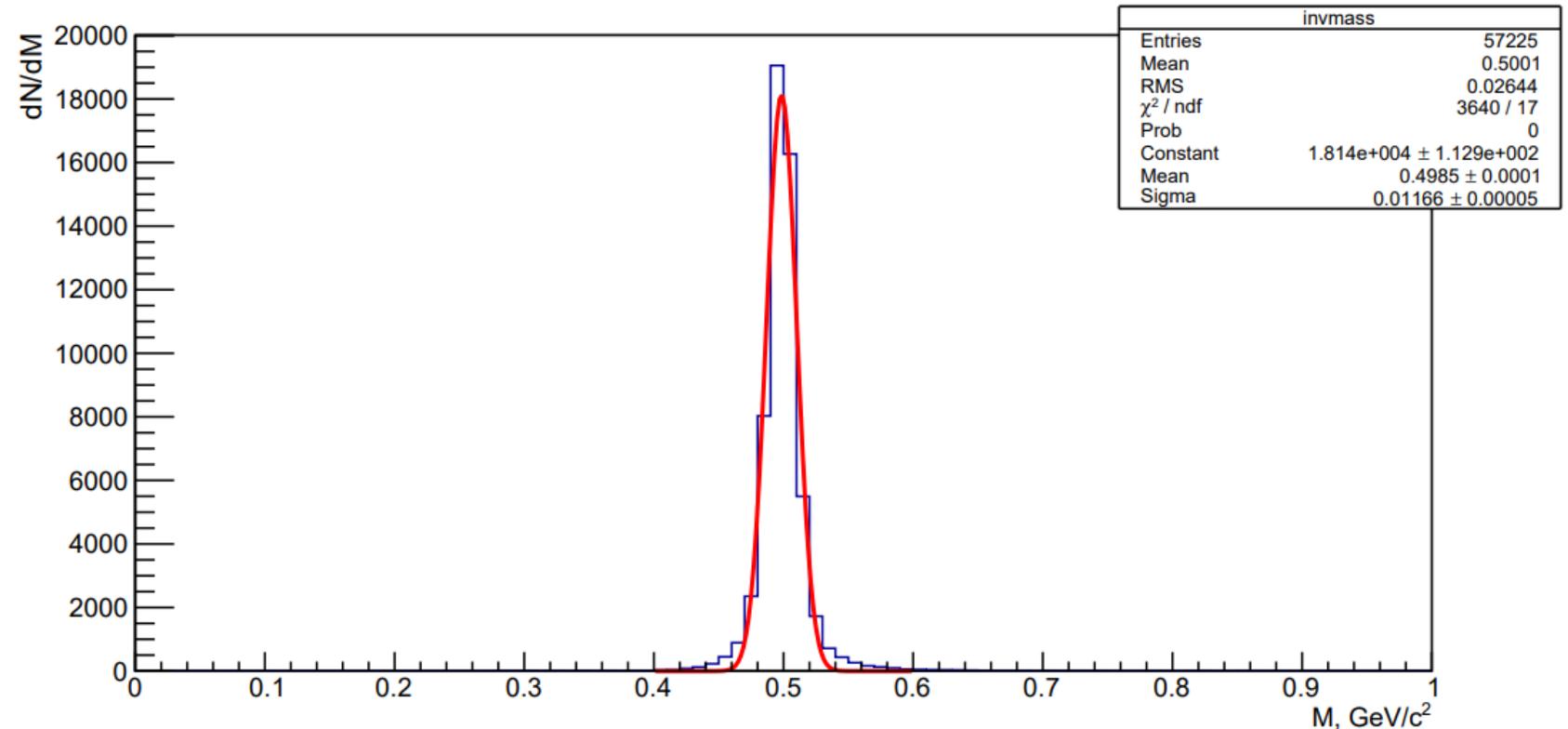


Распределение по переменной α

Распределения (STARLight)

Критерии отбора:

- Ntracks = 2;
- $\Sigma Q = 0$;
- $|\eta| < 2.5$;
- $\alpha < 0.9$;
- отбор «коридор» (d_{01}, d_{02});
- Track Seeding



Распределение по инвариантной массе двух пионов

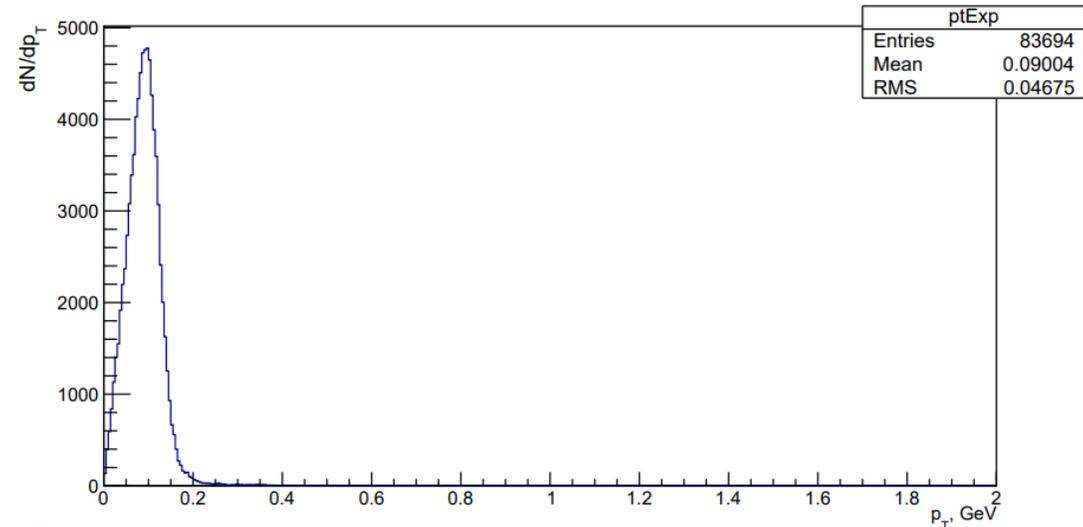
(Mean = $0.4985 \pm 0.0001 \text{ GeV}/c^2$)

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{s} - s\bar{d}), m = 498 \text{ MeV}/c^2, \tau = 0.90 \times 10^{-10} \text{ s}, c\tau = 2.68 \text{ cm}.$$

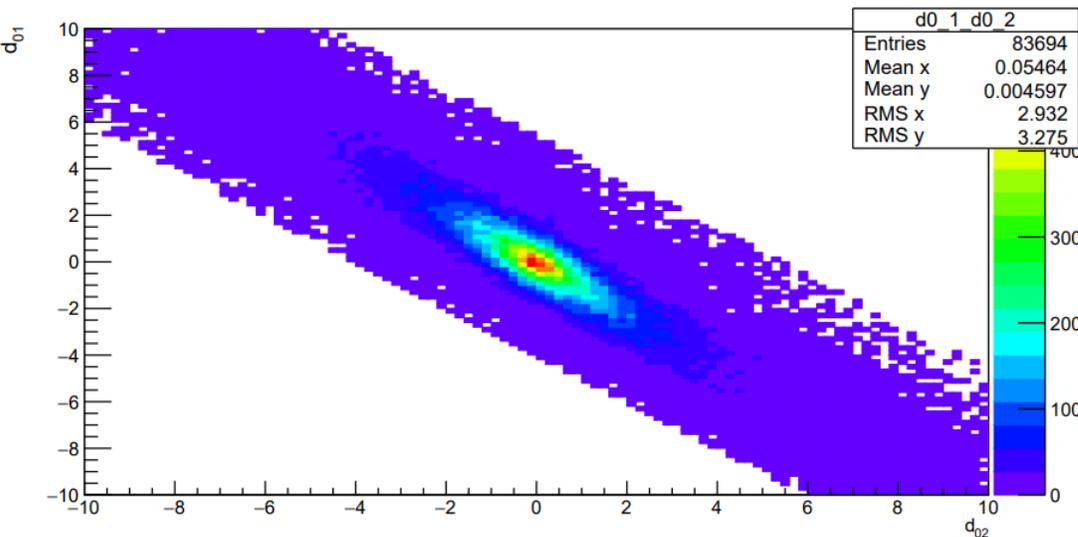
Распределения (ParticleGun)

Критерии отбора:

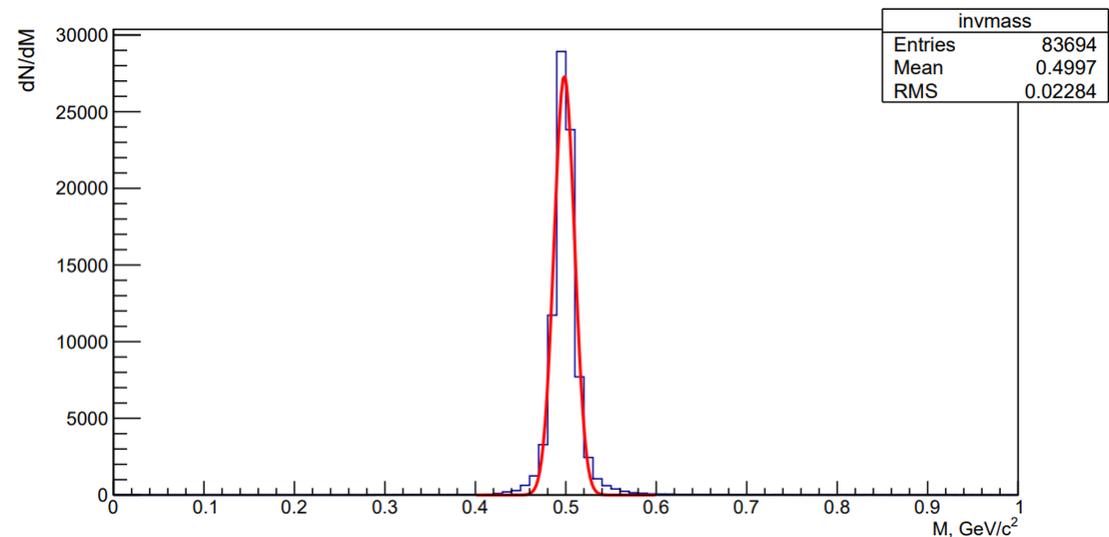
- $N_{\text{tracks}} = 2$;
- $\Sigma Q = 0$;
- $|\eta| < 2.5$;
- $\alpha < 0.9$;
- отбор «коридор» (d_{01} , d_{02});
- Track Seeding



Распределение по поперечному импульсу двух пионов

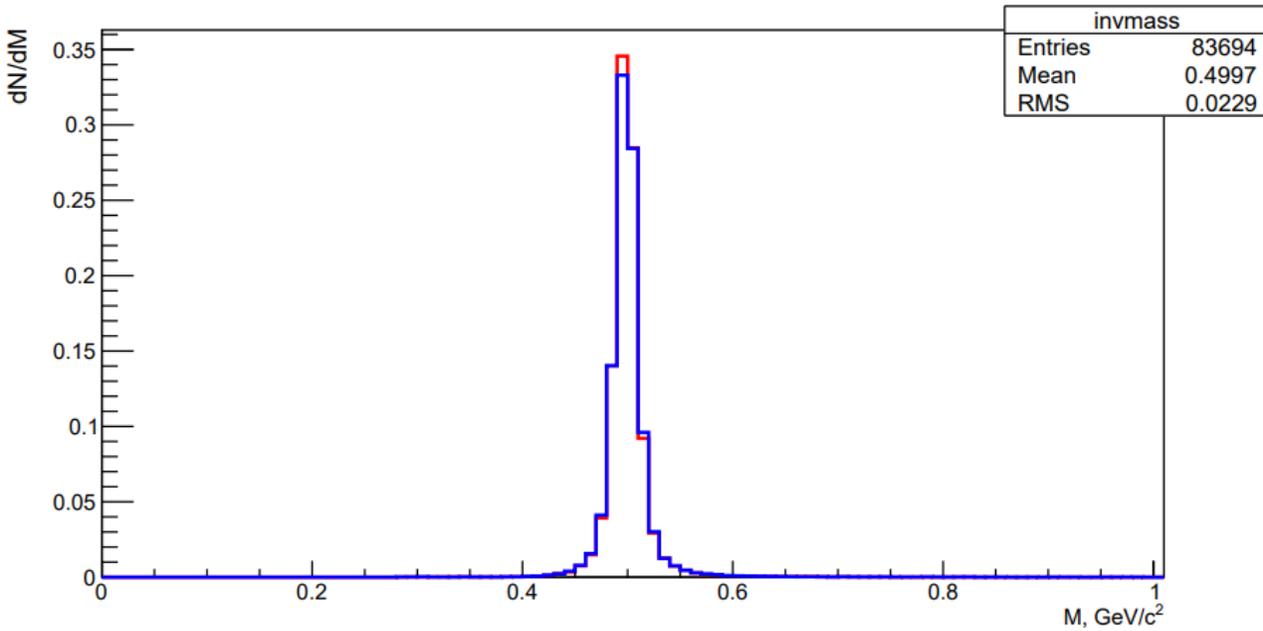


Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

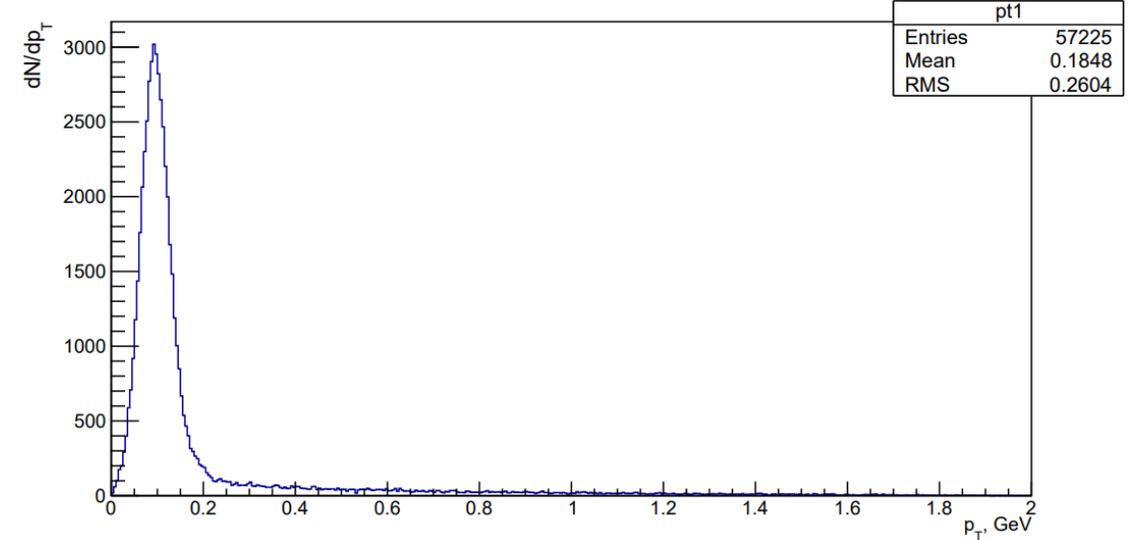


Распределение по инвариантной массе двух пионов
(Mean = $0.498402 \pm 0.000041 \text{ GeV}/c^2$)

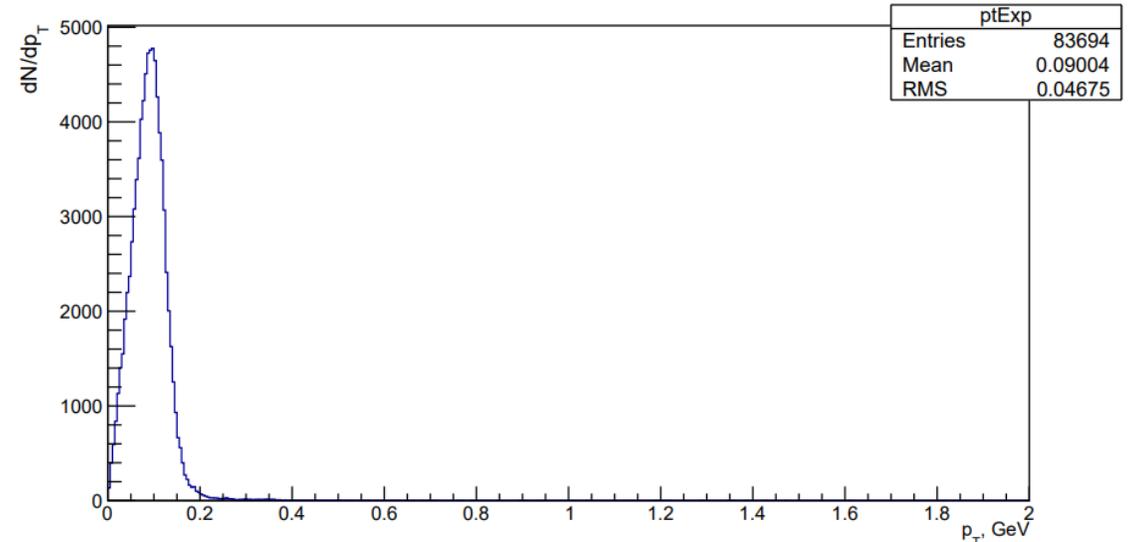
Сравнение STARLight и PG



Распределение по инвариантной массе пионов, отнормированное на 1. Синим — STARLight, красным — PG



Распределение по поперечному импульсу двух пионов STARLight

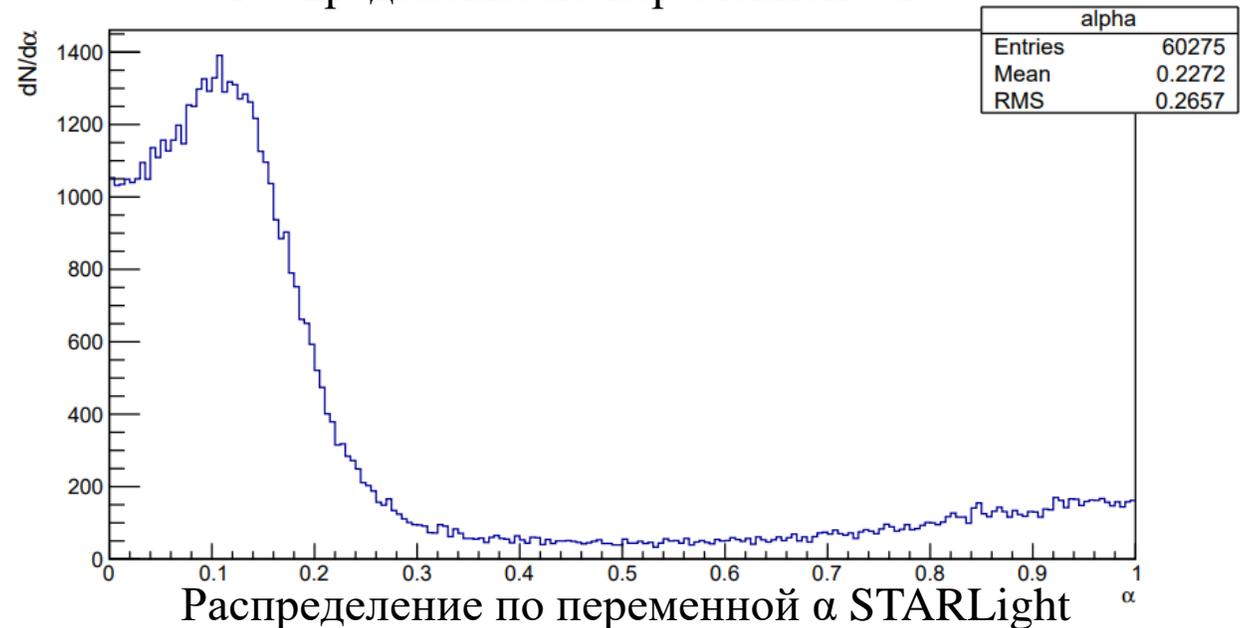
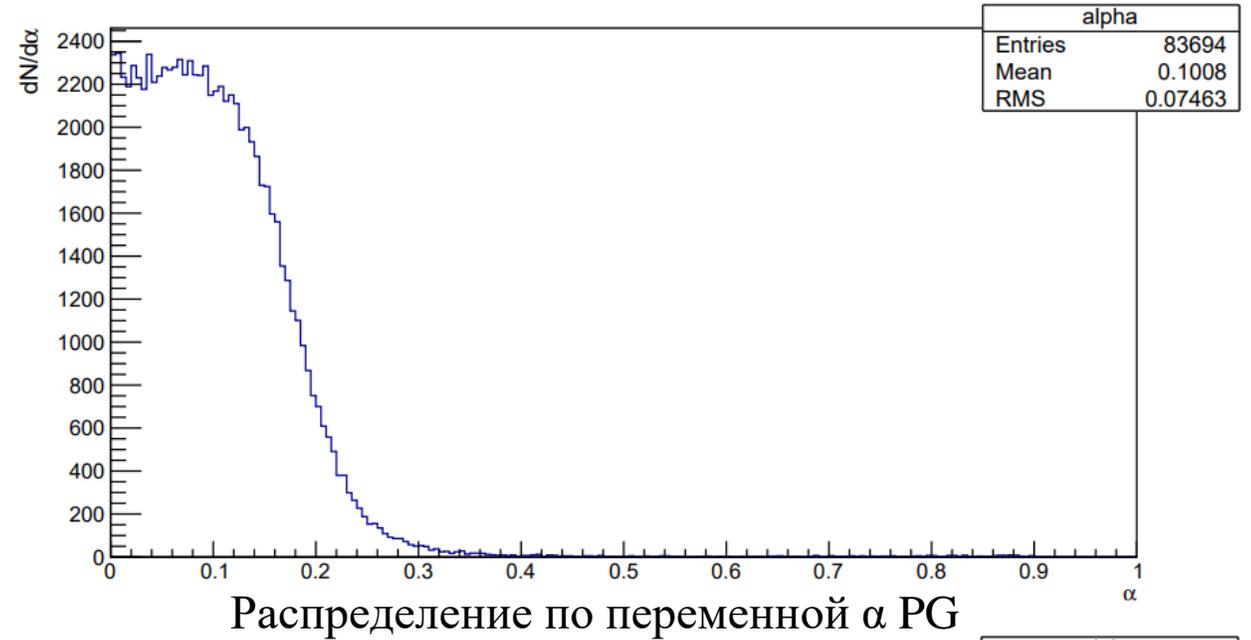


Распределение по поперечному импульсу двух пионов PG

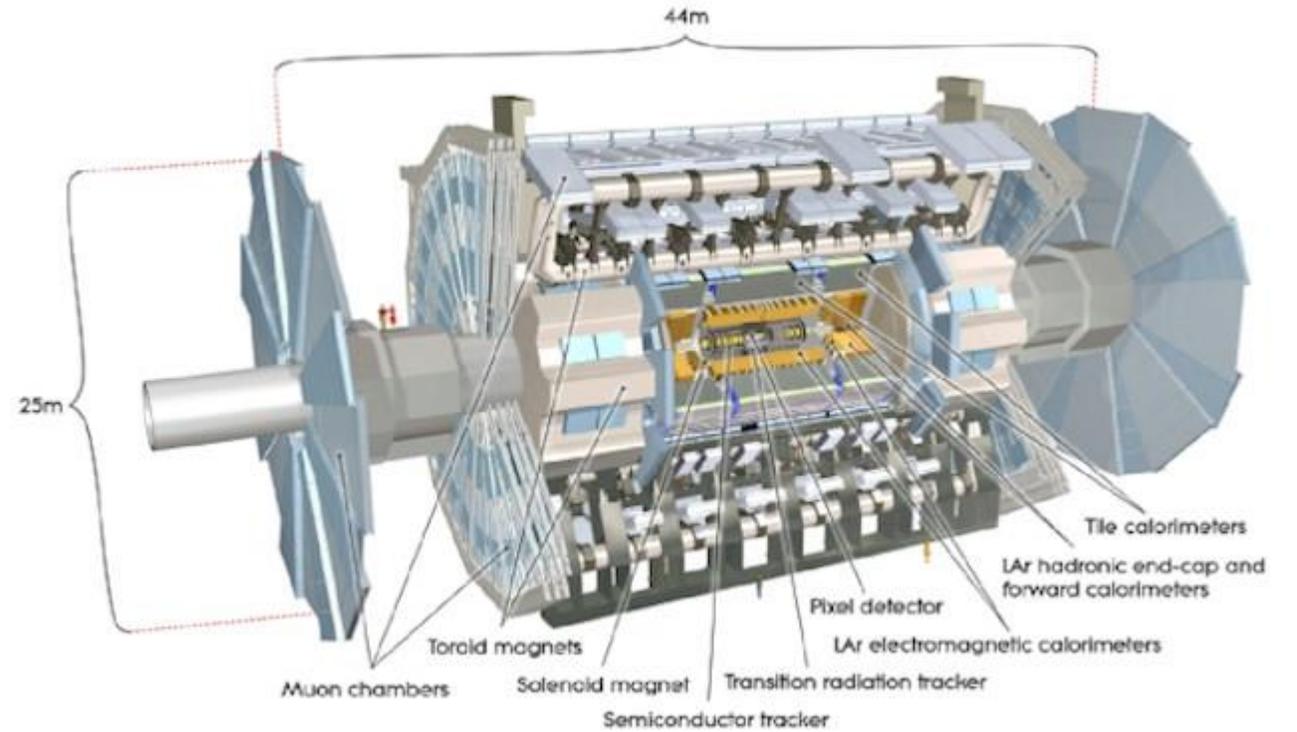
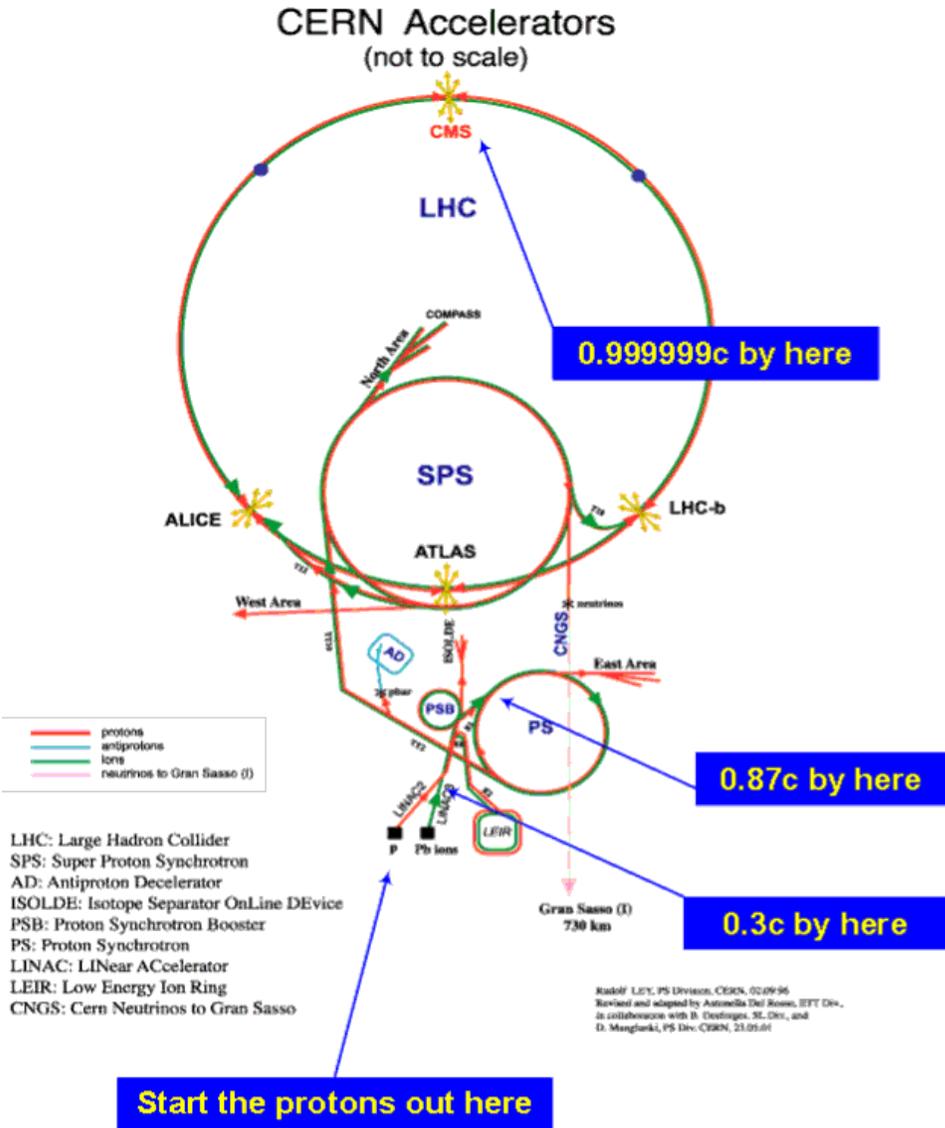
Из распределения по инвариантной массе, отчетливо видно совпадение положения пиков.

Сравнение STARLight и PG

В случае STARLight виден пик в 0.1, а в случае PG - большинство событий расположено практически в 0, т.е. при розыгрыше событий MC PG большинство пионов разлетаются под углом 180 градусов.



Детектор ATLAS



Детектор ATLAS

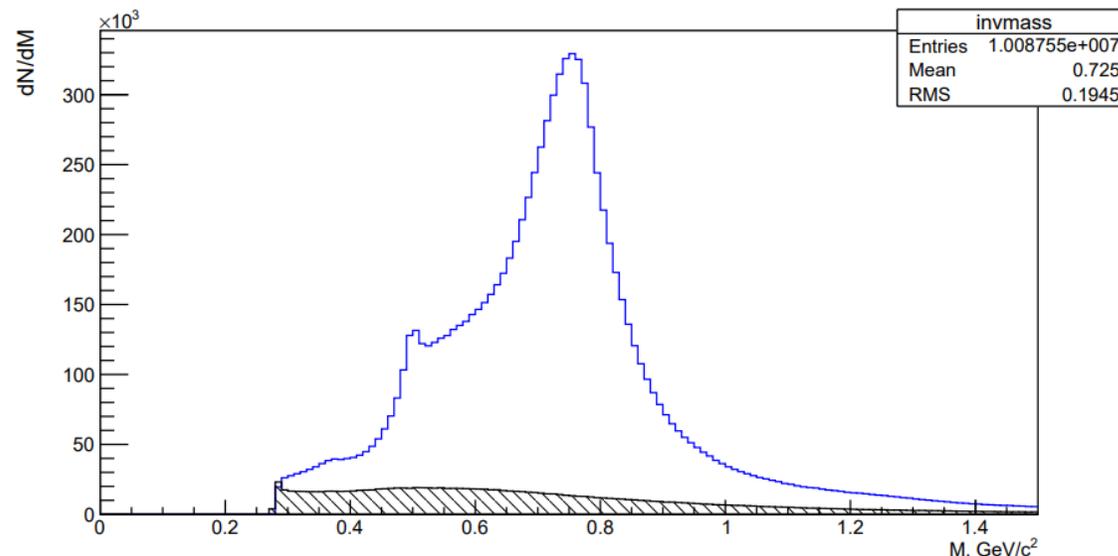
Распределения (экспериментальные данные)

Набор данных:

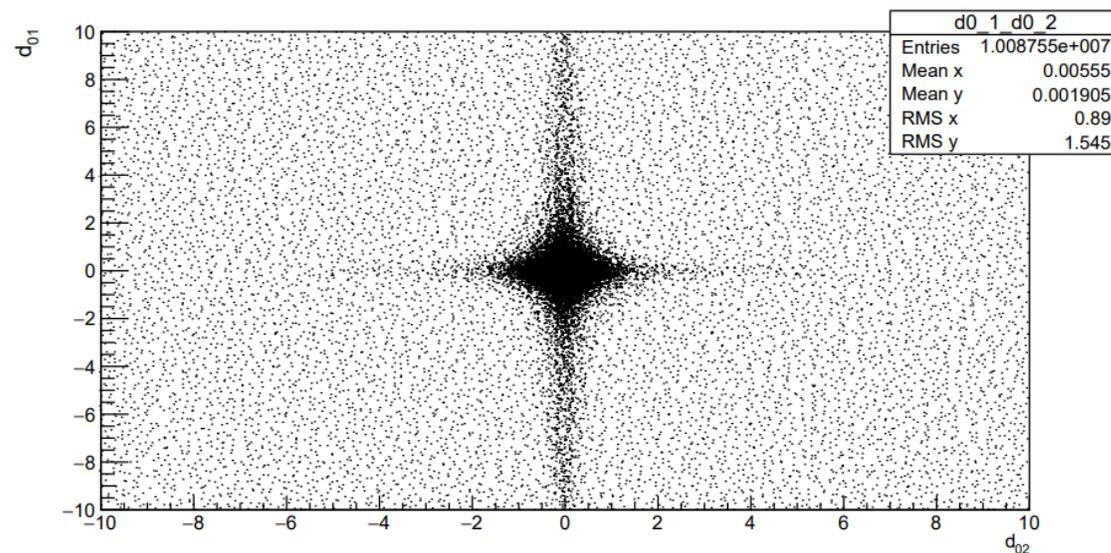
- Pb+Pb run 2018;
- 39 good runs;
- $L_{\text{int}} = 1.44 \text{ nb}^{-1}$;
- $N_{\text{tot}} = 220 \text{ M}$;

Критерии отбора

- Триггер + Lumiblock;
 - HLT_mb_sptrk_exclusiveloose_vetosp1500_L1VTE20
 - $N \sim 42 \text{ M}$
- $N_{\text{tracks}} = 2$;
- $\Sigma Q = 0$;
- Track Seeding

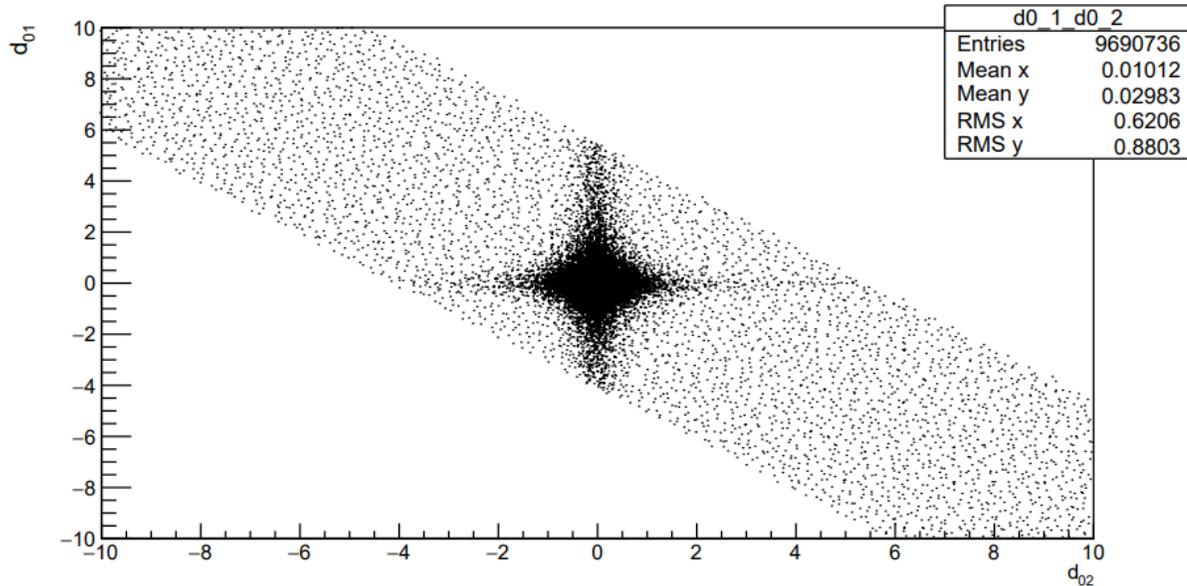


Распределение по инвариантной массе двух пионов, черным - фон



Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

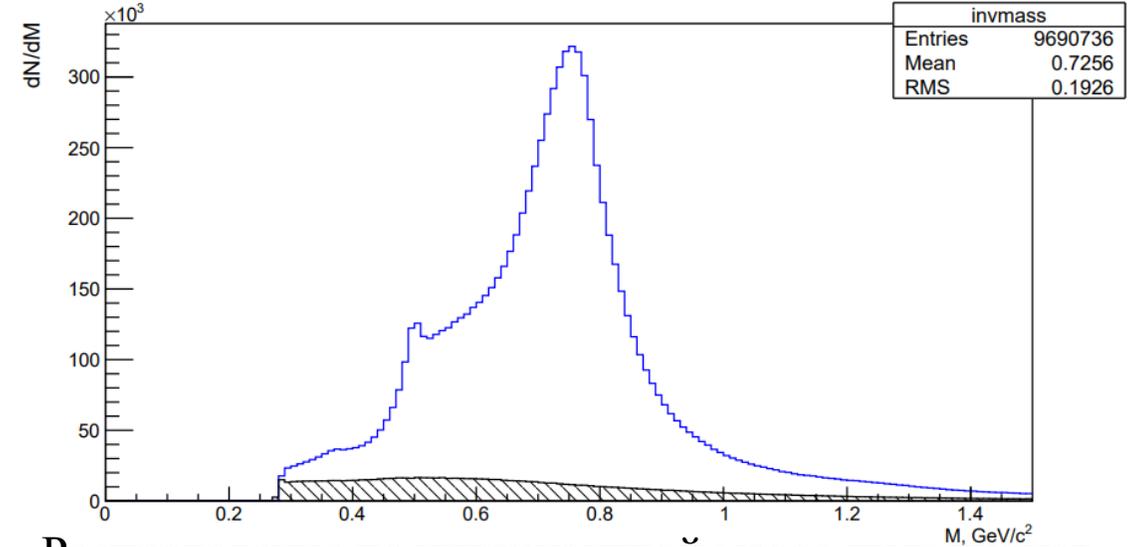
Распределения (экспериментальные данные)



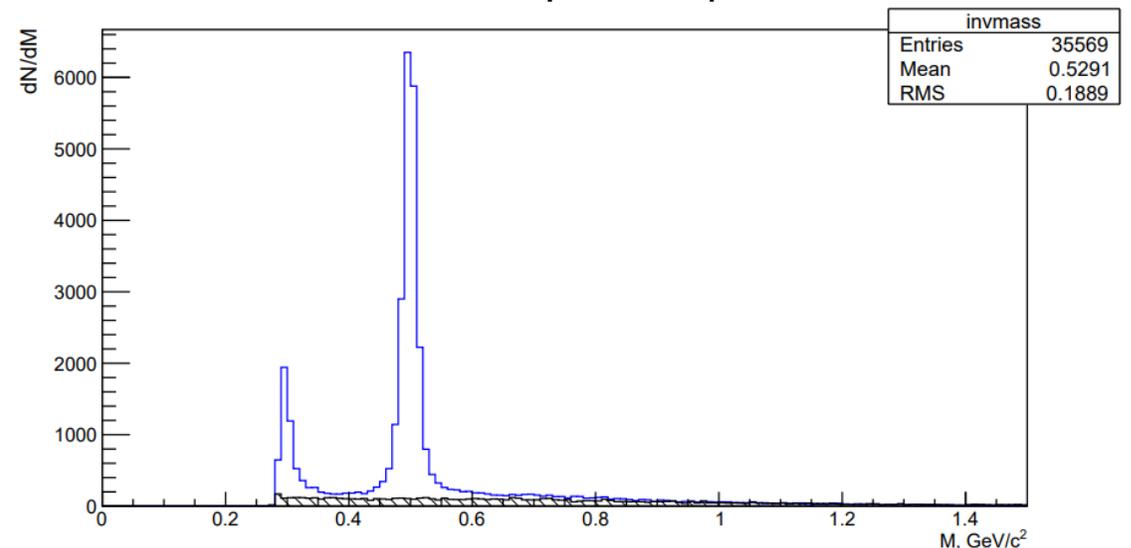
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

Для выделения событий, отвечающих за распад короткоживущего каона, применим условие «коридор», исходя из результатов, полученных при анализе МС.

Используем отбор, задаваемый функцией $d_{01} \cdot d_{02} < -16$



Распределение по инвариантной массе двух пионов, черным - фон

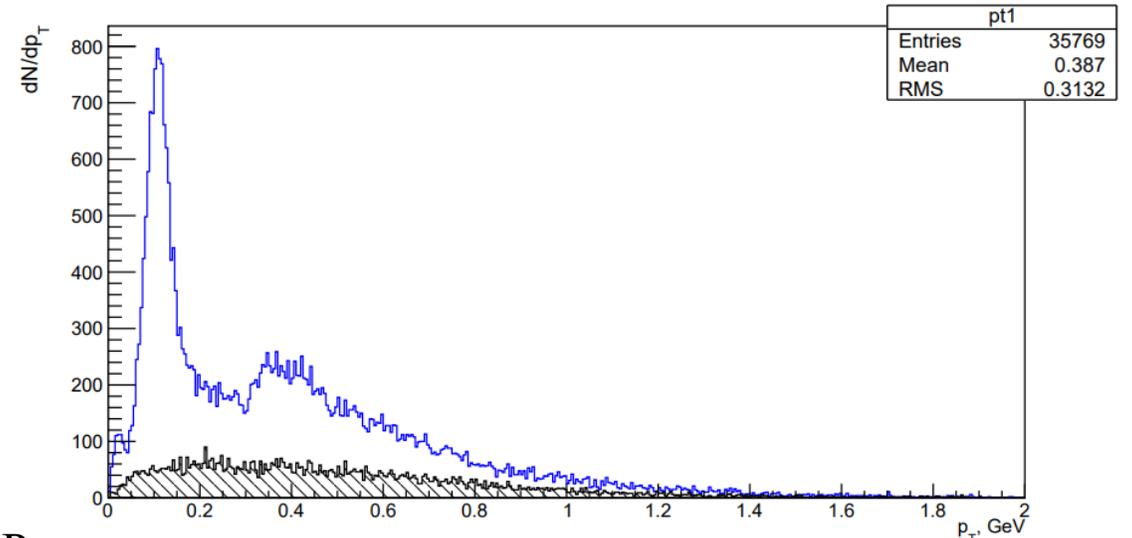


Распределение по инвариантной массе двух пионов, черным - фон

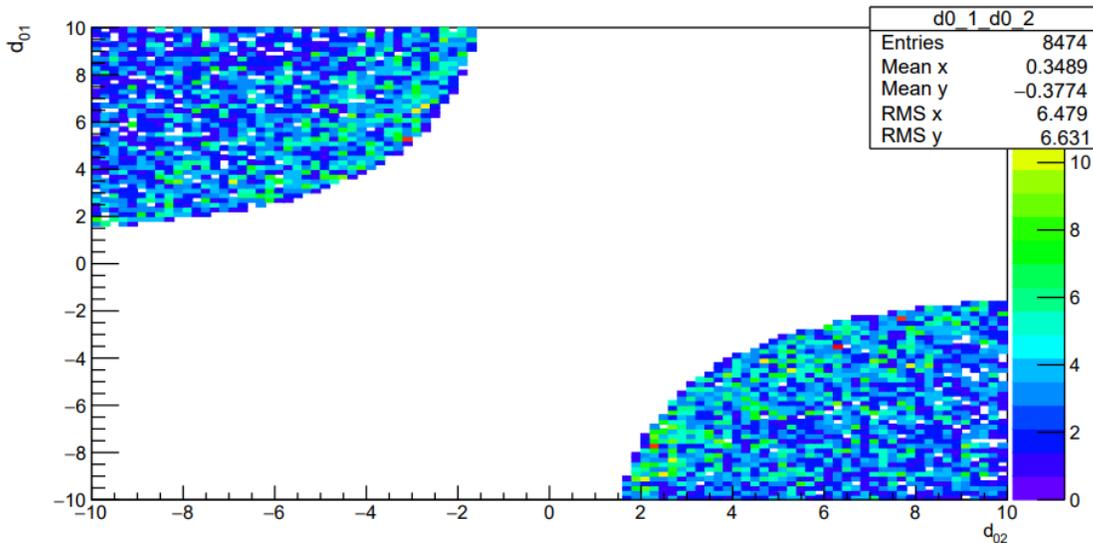
Распределения (экспериментальные данные)

Сравнивая распределения по поперечному импульсу двух пионов для MC данных и экспериментальных данных, а также прошлые и текущие критерии отбора, приходим к выводу о необходимости наложения следующих критериев:

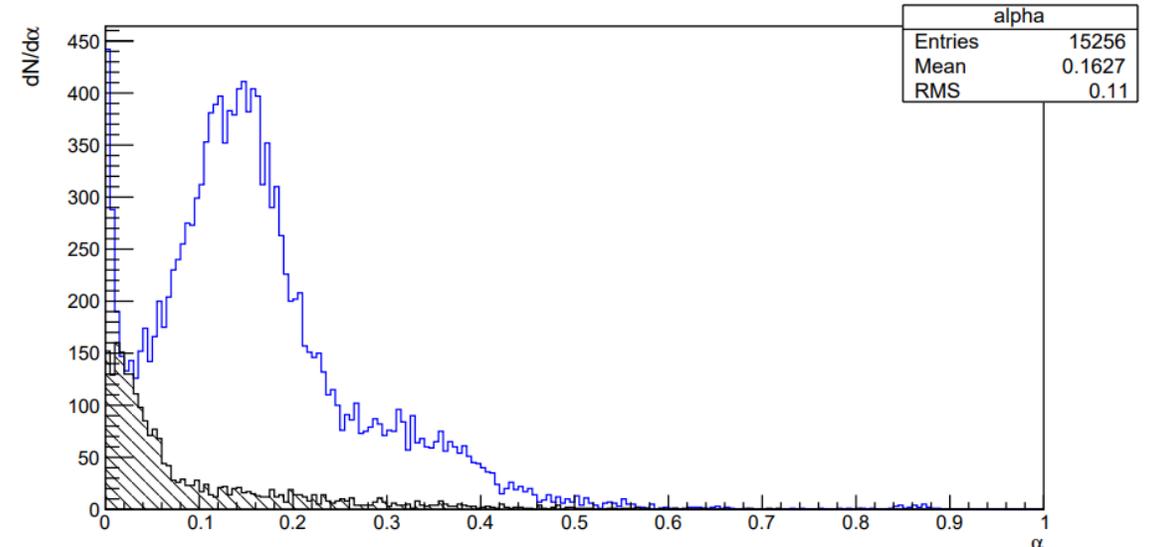
- отбор «коридор» + $d_{01} \cdot d_{02} < -16$;
- $\alpha < 0.9$;
- $p_T < 0.3$;
- $|\eta| < 2.5$.



Распределение по поперечному импульсу двух пионов, черным - фон

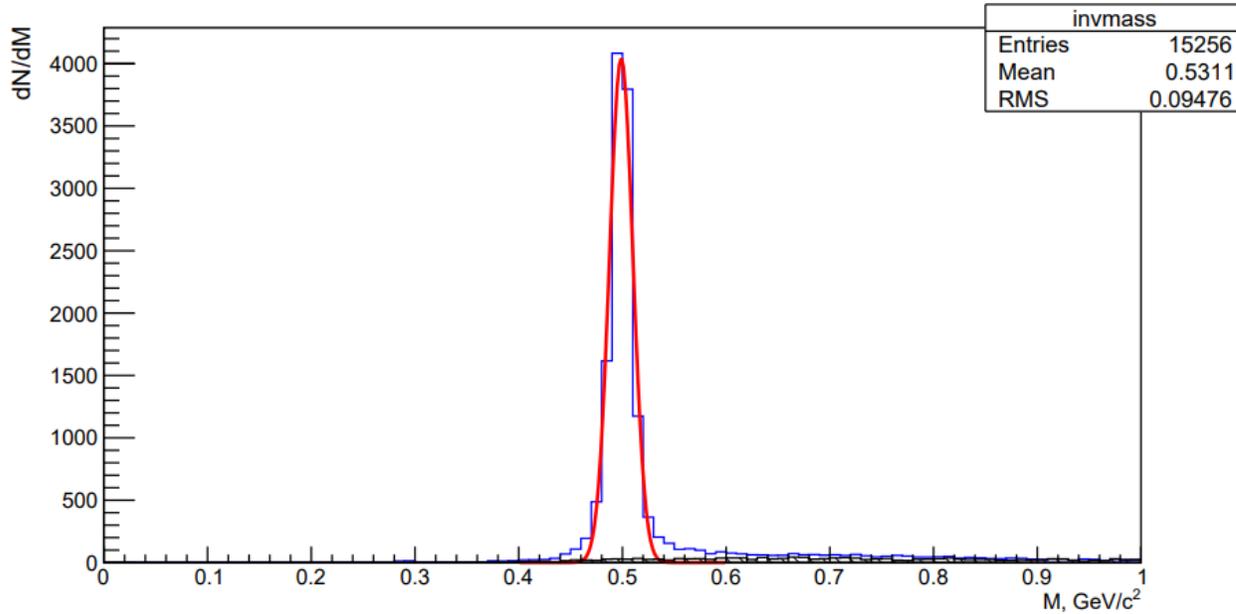


Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

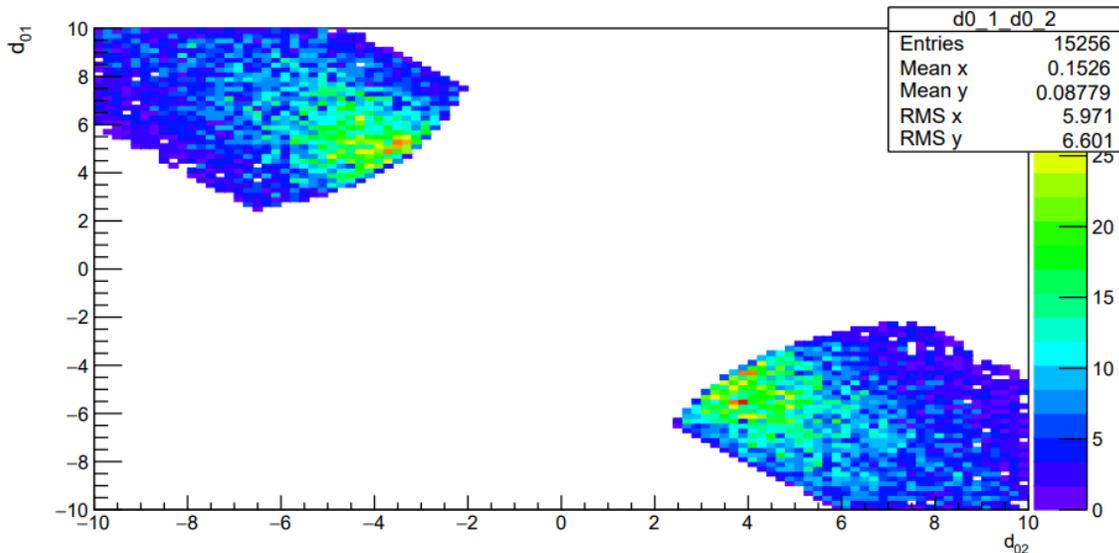


Распределение по переменной α , черным - фон

Сравнение экспериментальных данных и МС



Распределение по инвариантной массе двух пионов, черным - фон



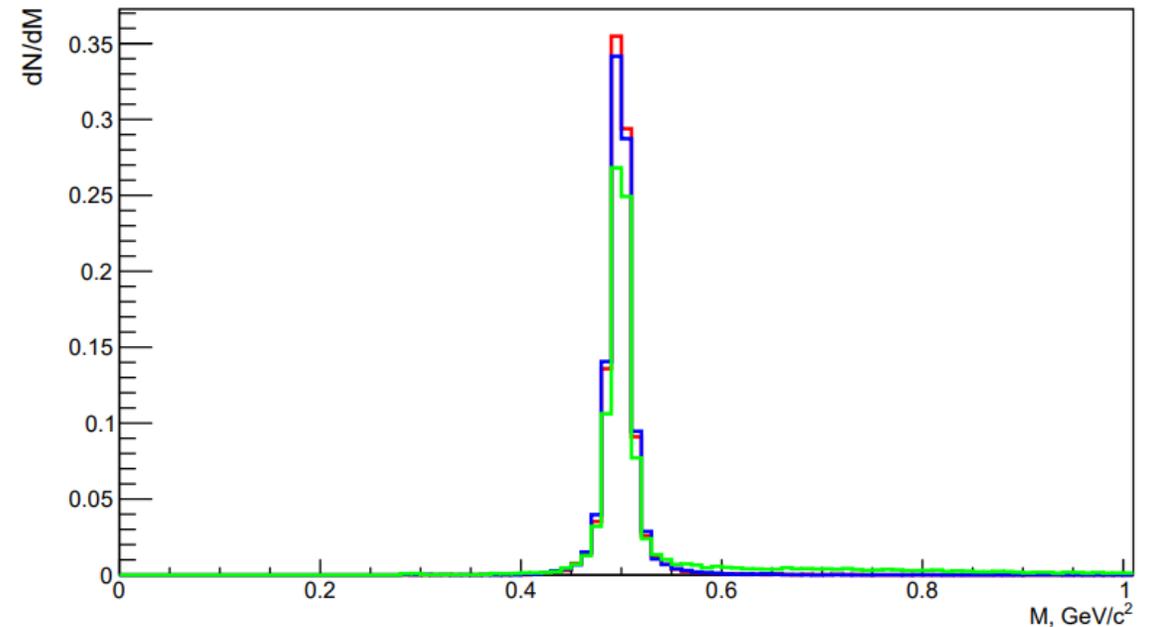
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

Fit(Gauss): Mean = 0.498854 ± 0.000114 GeV/c²

Табличное значение PDG массы каона:

$$M(K_L^0) = M(K_S^0) = 0.497614 \text{ GeV}/c^2$$

Для корректного сравнения, построим распределения STARLight и PG с такими же критериями отбора.



Распределение по инвариантной массе пионов,
Синим — STARLight, красным — PG,
зеленым — экспериментальные данные

Заключение

В данной работе:

- проводилось изучение рождения легких векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов на примере распада векторного мезона ϕ на два нейтральных каона $\phi \rightarrow K_L^0 K_S^0$ с последующим распадом на противоположно заряженные пионы $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$;
- Представлены методы и параметры, с помощью которых был интегрирован новый канал в программный пакет STARLight;
- Представлены методы полного моделирования выходных событий с помощью Athena;
- Представлены методы увеличения статистики при ограниченном экранном времени в случае локальной работы;
- Отражены критерии отбора событий, по которым проводился анализ;
- Представлено сравнение с независимым МС генератором ParticleGun и экспериментальными данными;

В качестве результатов работы приведены полученные распределения и их сравнение, доказывающее исправную работу модифицированного программного пакета STARLight и правильность выбранных критериев отбора.

Спасибо за внимание!

BACK UP

Команды

setupATLAS

1. Генерация: Asetup 21.6.20,AthGeneration

```
Gen_tf.py --ecmEnergy=5020 --jobConfig=421120 --maxEvents=400000 --outputEVNTFile = KIKs_400k.EVNT.pool.root
```

2. Симуляция: asetup Athena,21.0.105,here

```
Sim_tf.py --inputEvgenFile '/afs/cern.ch/user/a/azakharo/public/build/Testing/KIKs_400k.EVNT.pool.root' --outputHITSFile  
'KIKs_10k_Skip120k.HITS.pool.root' --skipEvent=120000 --AMIconfig s3537 --maxEvents $nEvent
```

3. Оцифровка, Реконструкция: asetup Athena,21.0.102,here

```
Reco_tf.py --inputHitsFile star_analysis/sim400k/KIKs_10k_Skip200k.HITS.pool.root --outputAODFile  
AOD_KIKs_10k_Skip200k.pool.root --AMIconfig r11621 --maxEvents $nEvent
```

Рождение легких мезонов

При ультрапериферических взаимодействиях образуются векторные мезоны, сечение образования которых представлены на таблице.

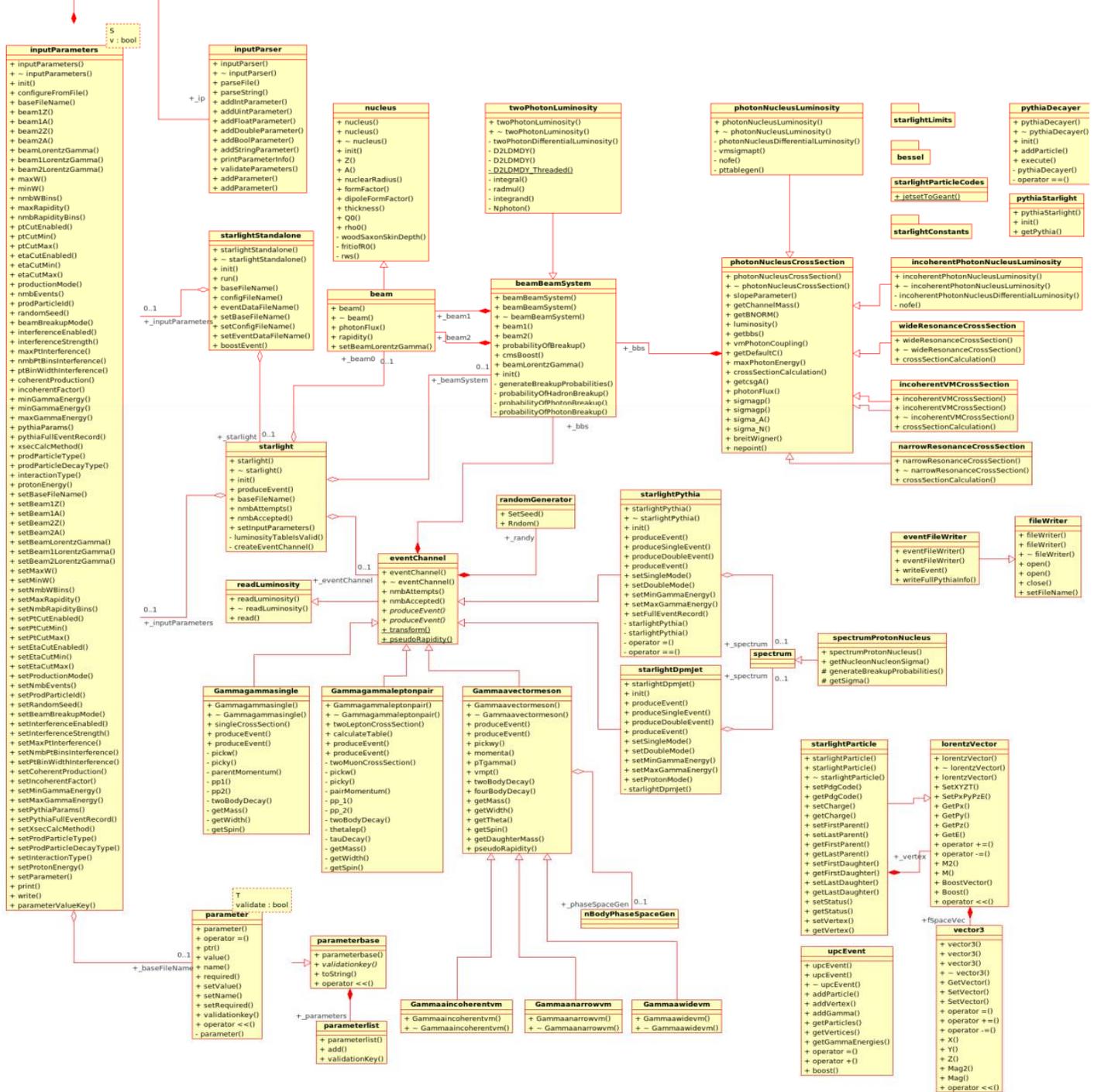
На сегодняшний день, ρ -мезон довольно хорошо исследован в экспериментах STAR, ALICE, J/ ψ — на RHENIX, CMS. ω -мезон, имея близкую к ρ -мезону массу, распадается на два противоположно заряженных пиона и один нейтральный, и, соответственно, при восстановлении будет заметен пик, близкий к ρ -мезону, но его довольно сложно идентифицировать. На данный момент не исследованным остается только образование ϕ -мезона.

Существуют каналы распада ϕ -мезона на положительный и отрицательные каоны, т.е. $\phi \rightarrow K^+K^-$ и на долгоживущий и короткоживущий каоны, т.е. $\phi \rightarrow K_L^0 K_S^0$. В данной работе предполагается детальное исследование по одному из каналов распада — $\phi \rightarrow K_L^0 K_S^0$

Таблица 1.1 — Мезоны и их сечения образования

Meson	Au+Au, RHIC σ (mb)	Pb+Pb, LHC σ (mb)
ρ^0	590	5200
ω	59	490
ϕ	39	460
J/ ψ ,	0.29	32
Υ		150
$\rho^0\rho^0$		8.8
$\omega\omega$		0.073
$\phi\phi$		0.076
$\rho^0\omega$,		1.6
$\rho^0\phi$		1.6
$\rho^0 J/\psi$		0.2

Class Diagram STARLight



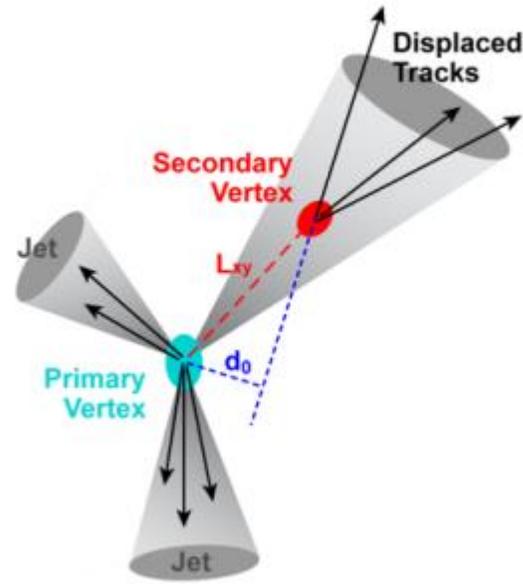
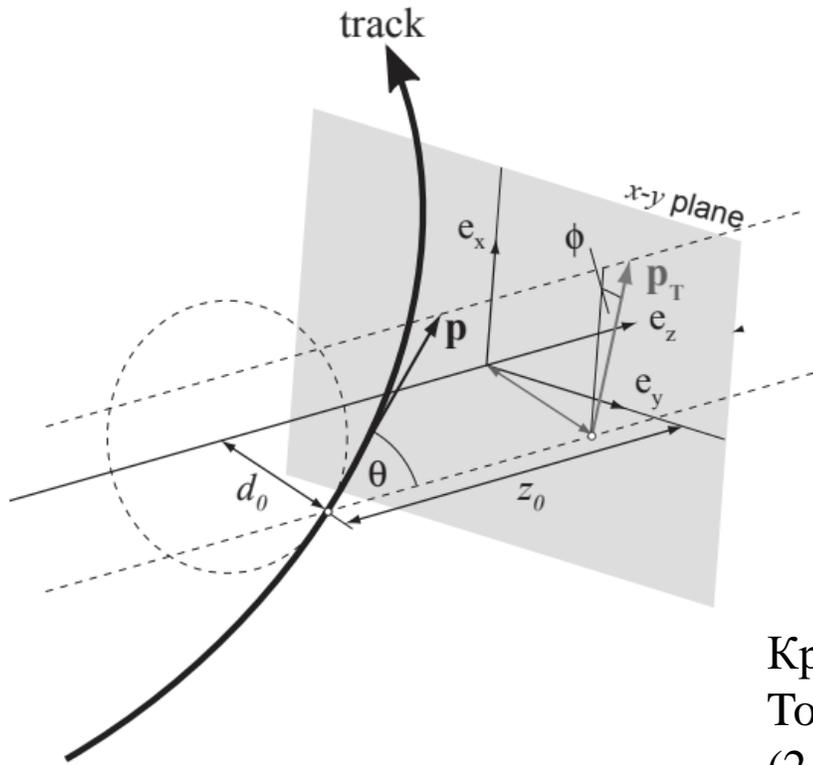
Decay modes

$\phi(1020)$ DECAY MODES			
Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	
Γ_1 $K^+ K^-$	(49.2 \pm 0.5) %	S=1.3	
Γ_2 $K_L^0 K_S^0$	(34.0 \pm 0.4) %	S=1.3	
Γ_3 $\rho\pi + \pi^+ \pi^- \pi^0$	(15.24 \pm 0.33) %	S=1.2	
Γ_4 $\rho\pi$			
Γ_5 $\pi^+ \pi^- \pi^0$			
Γ_6 $\eta\gamma$	(1.303 \pm 0.025) %	S=1.2	

K_S^0 DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level (MeV/c)
Hadronic modes		
$\pi^0 \pi^0$	(30.69 \pm 0.05) %	209
$\pi^+ \pi^-$	(69.20 \pm 0.05) %	206
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	(3.5 $^{+1.1}_{-0.9}$) $\times 10^{-7}$	133

K^+ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level (MeV/c)
Leptonic and semileptonic modes		
$e^+ \nu_e$	(1.582 \pm 0.007) $\times 10^{-5}$	247
$\mu^+ \nu_\mu$	(63.56 \pm 0.11) %	S=1.2 236
$\pi^0 e^+ \nu_e$	(5.07 \pm 0.04) %	S=2.1 228
Called K_{e3}^+ .		
$\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	(3.352 \pm 0.033) %	S=1.9 215
Called $K_{\mu3}^+$.		
$\pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	(2.55 \pm 0.04) $\times 10^{-5}$	S=1.1 206
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	(4.247 \pm 0.024) $\times 10^{-5}$	203
$\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	(1.4 \pm 0.9) $\times 10^{-5}$	151
$\pi^0 \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	< 3.5 $\times 10^{-6}$	CL=90% 135
Hadronic modes		
$\pi^+ \pi^0$	(20.67 \pm 0.08) %	S=1.2 205
$\pi^+ \pi^0 \pi^0$	(1.760 \pm 0.023) %	S=1.1 133
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	(5.583 \pm 0.024) %	125

d_0 и alpha



Критерии отбора:

Total_tracks = 2

(2 трека в событии);

$\Sigma Q = 0$;

$|\eta| < 2.5$ – ограничение на псевдобыстроту треков;

Ограничение на переменную

$\alpha = 1 - (\arccos(\cos(\phi_1 - \phi_2)))/\pi$

$\alpha < 0.9$;

Track Seeding

Синее – первичная вершина ($\phi \rightarrow K_L^0 K_S^0$),
красное – вторичная ($K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$)

Восстановление треков -> экстраполируем
трек до плоскости первой вершины
(смещение относительно перв. Вершины)

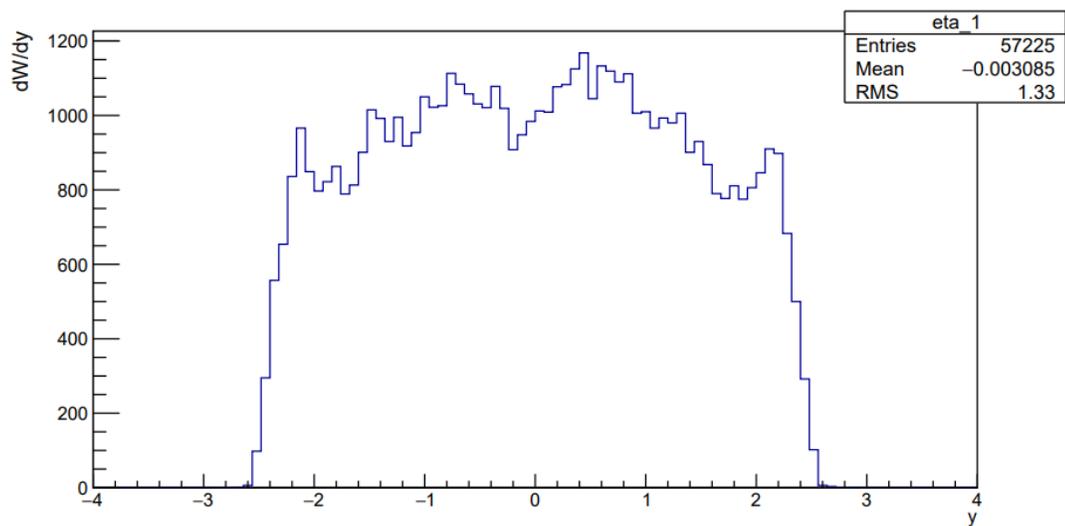
$$\alpha = 1 - (\arccos(\cos(\phi_1 - \phi_2)))/\pi$$

ϕ_1, ϕ_2 – азимутальные углы треков

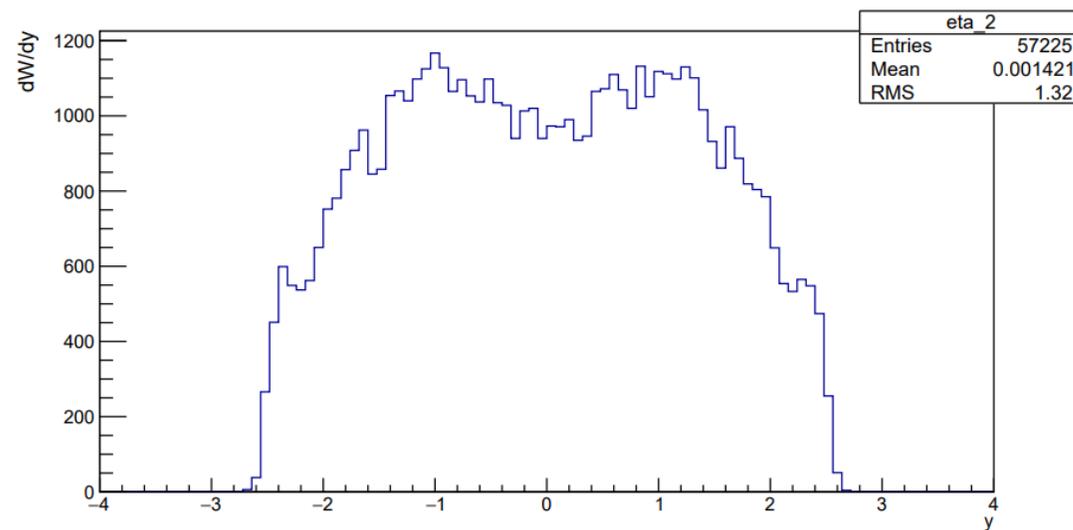
Пик в области 0.1 GeV, связан с практически «стоячим» рождением ϕ -мезона, т.е. у него очень маленький поперечный импульс. При распаде масса ϕ -мезона делится пополам и является вкладом в поперечный импульс дочерних частиц. Таким образом, π -мезоны, образованные после распада короткоживущего каона, имевшего поперечный импульс, будут иметь небольшой поперечный импульс, но больший, чем у ϕ -мезона.

Струи – адронизация высокоэнергетичных глюонов и кварков. d_0 измеряется в мм.

STARLight AOD Corridor selection criteria

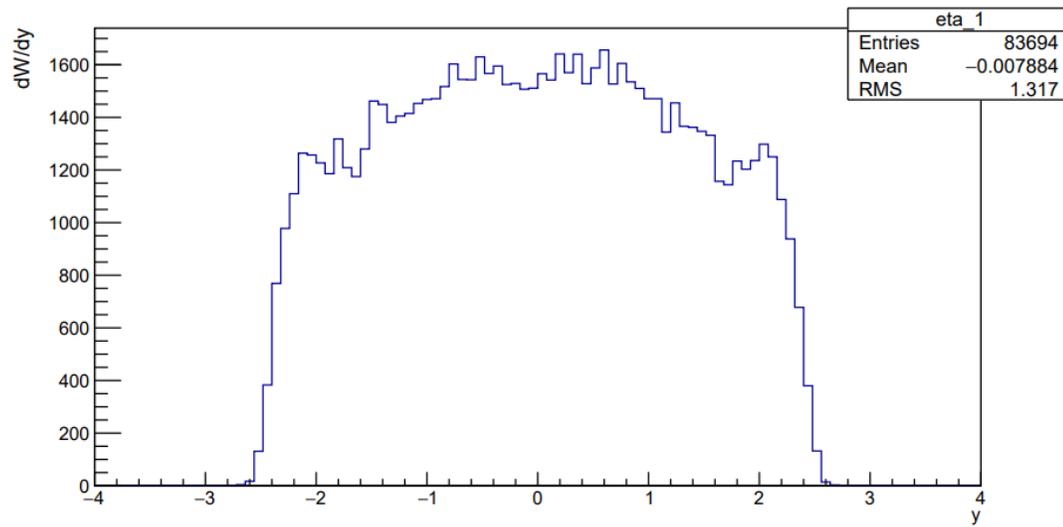


Распределение по псевдобыстроте первого пиона

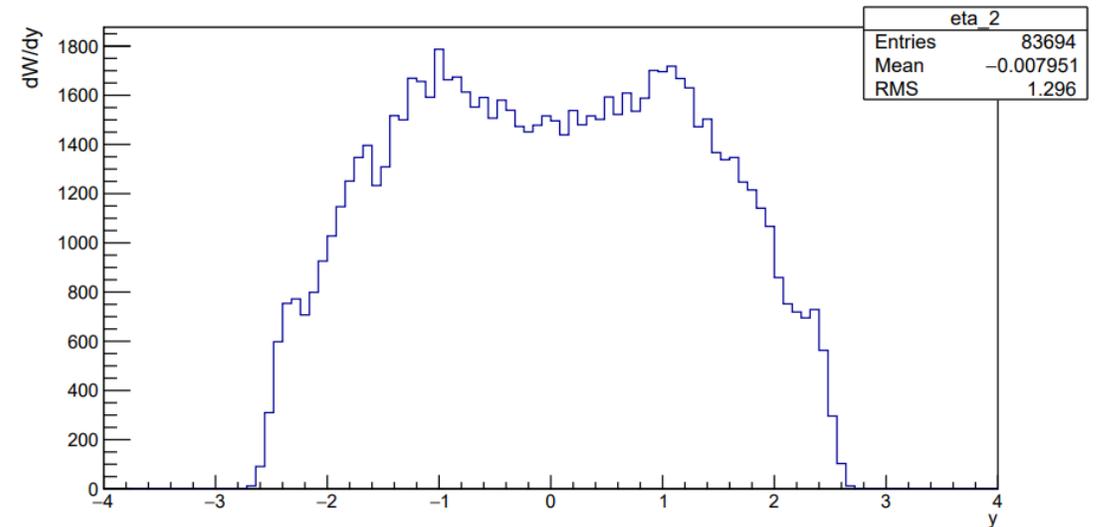


Распределение по псевдобыстроте второго пиона

PG AOD Corridor selection criteria

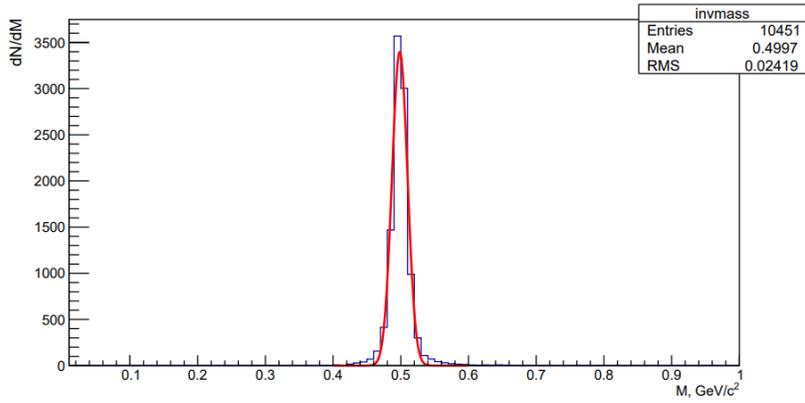


Распределение по псевдобыстроте первого пиона

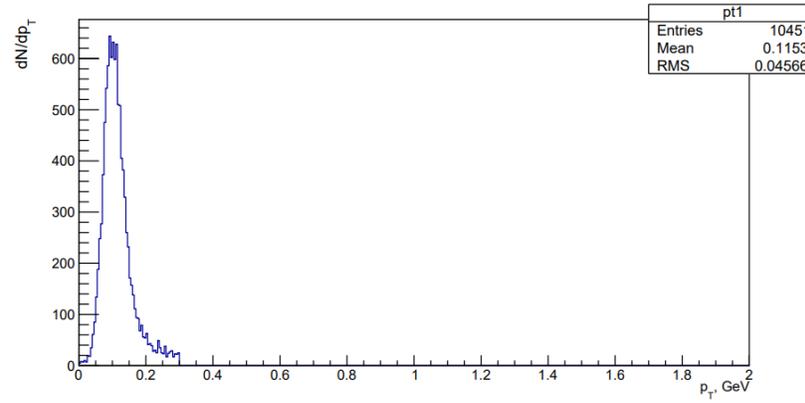


Распределение по псевдобыстроте второго пиона

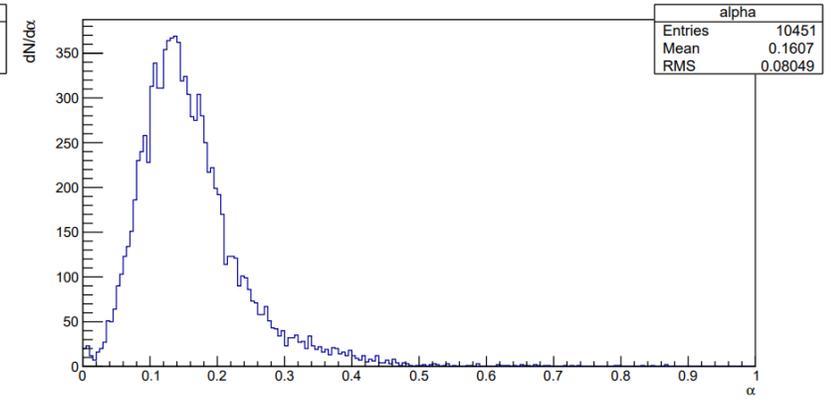
STARLight exp selection criteria



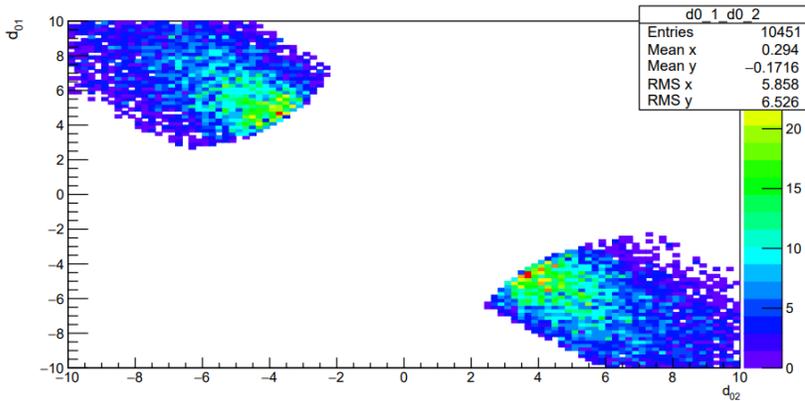
Распределение по инвариантной массе двух пионов
Mean = 0.498468 ± 0.000115 GeV/c²



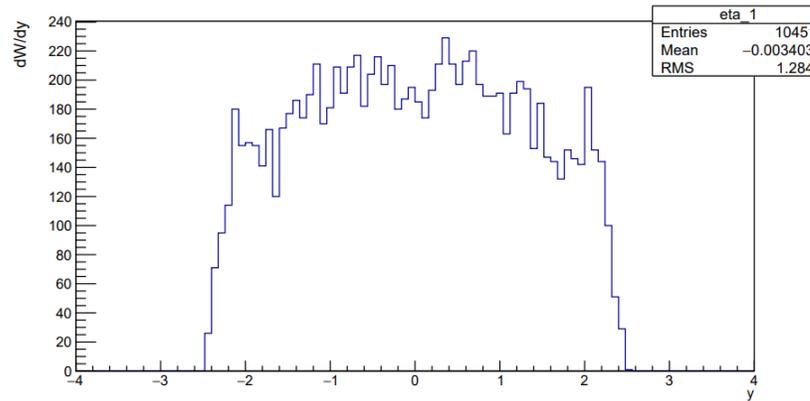
Распределение по поперечному импульсу
двух пионов



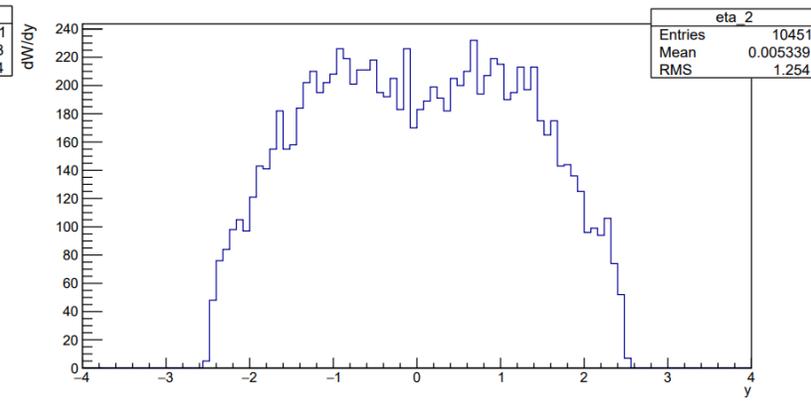
Распределение по переменной α



Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

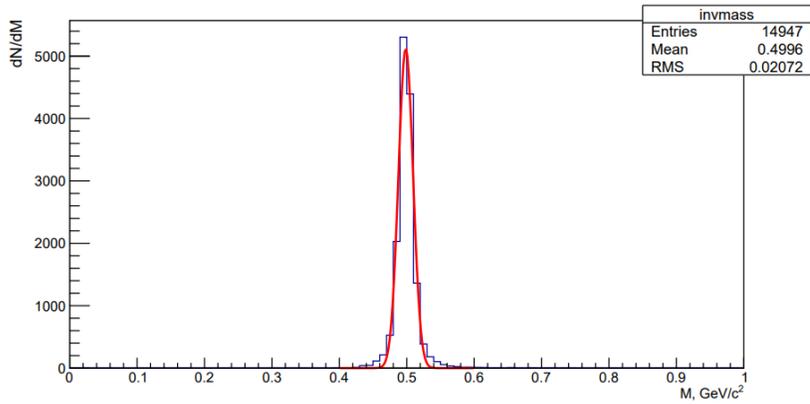


Распределение по псевдобыстроте первого пиона

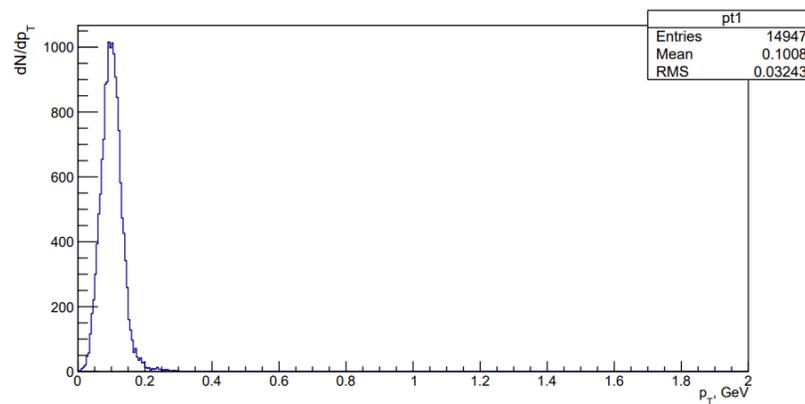


Распределение по псевдобыстроте второго пиона

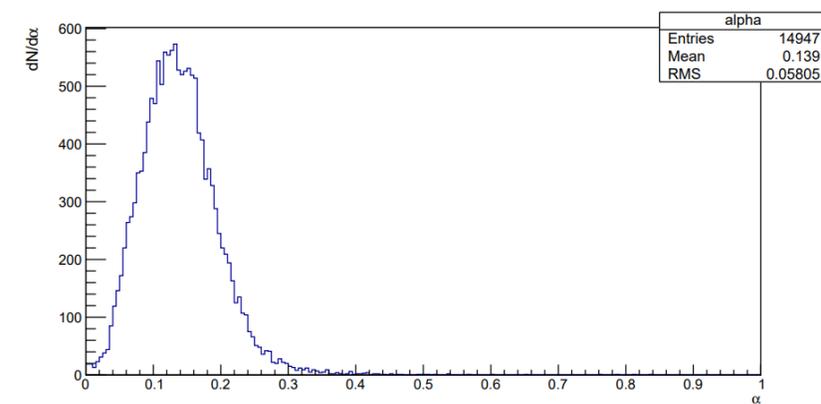
PG exp selection criteria



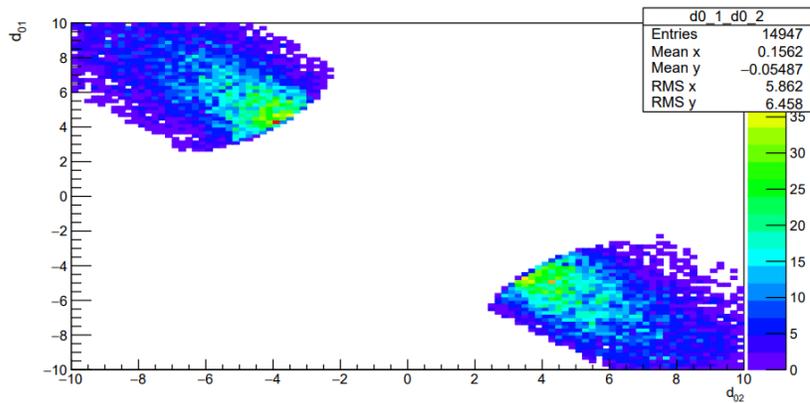
Распределение по инвариантной массе двух пионов
Mean = 0.498402 ± 0.000041 GeV/c²



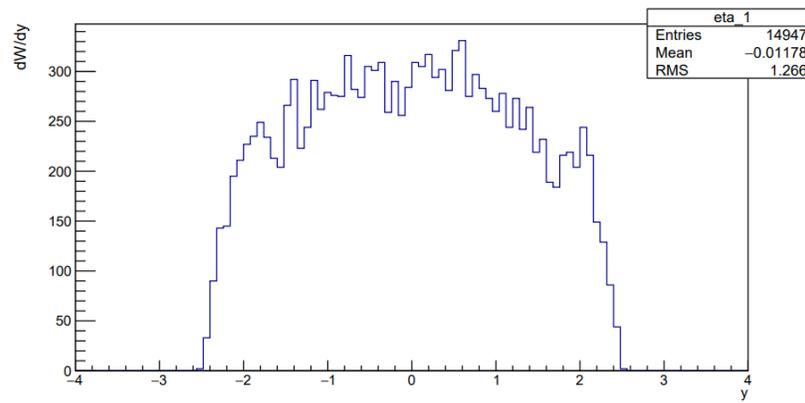
Распределение по поперечному импульсу
двух пионов



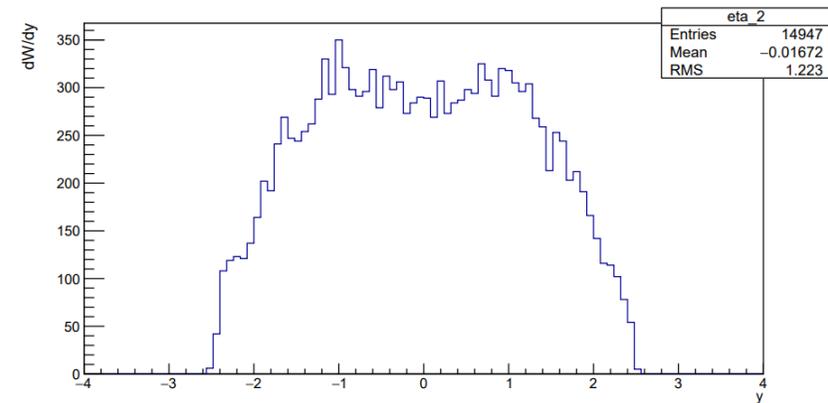
Распределение по переменной α



Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02})$

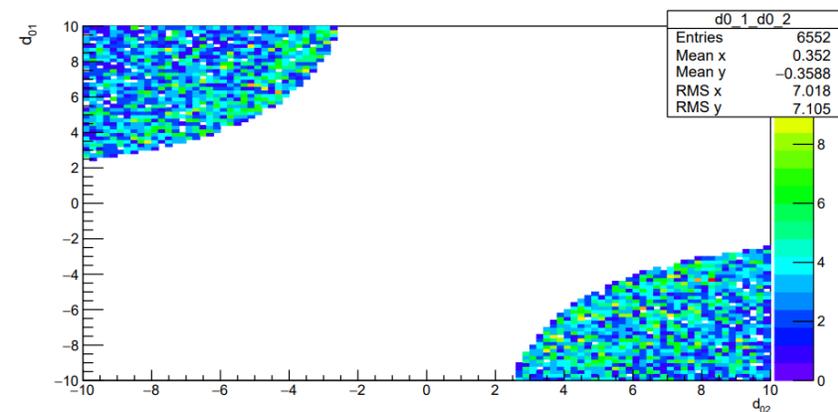


Распределение по псевдобыстроте первого пиона

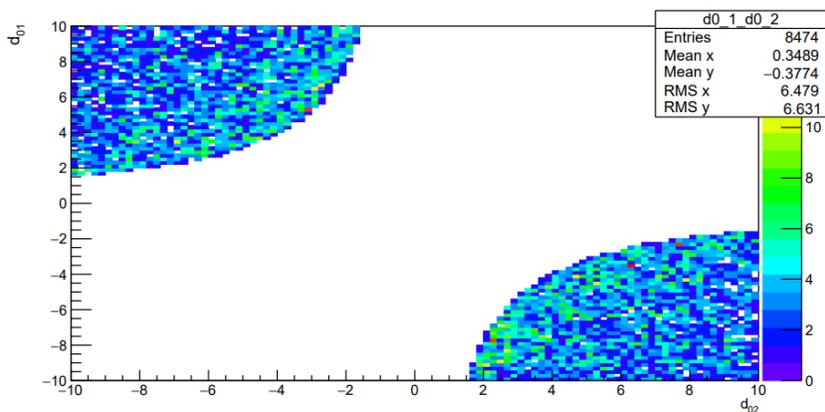


Распределение по псевдобыстроте второго пиона

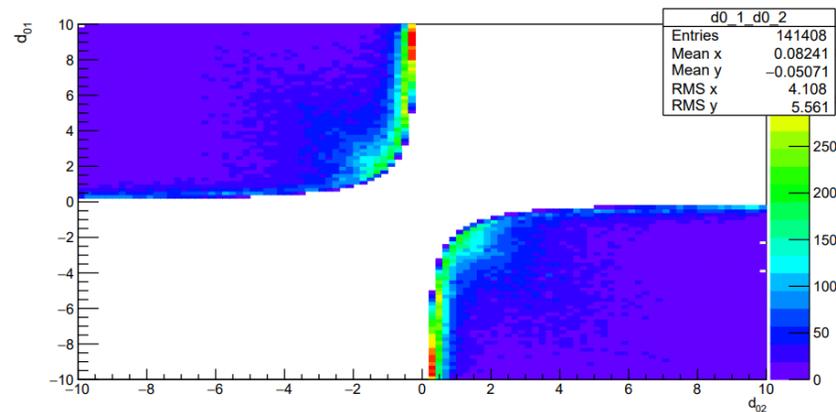
Сравнение $d_{01} \cdot d_{02} < -25; 16; 2$



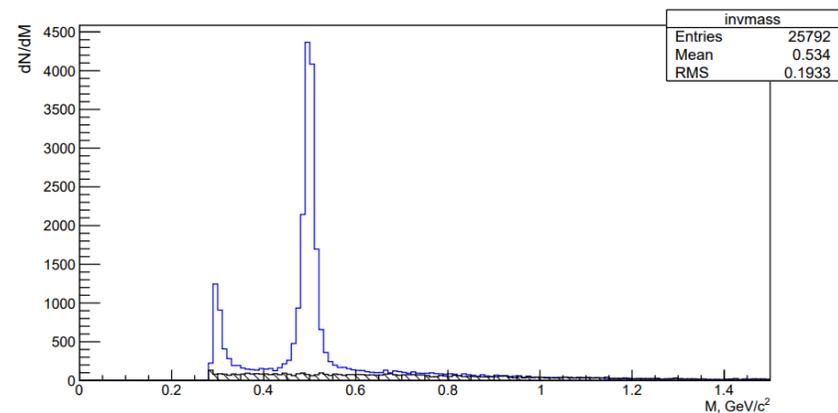
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02}) < -25$



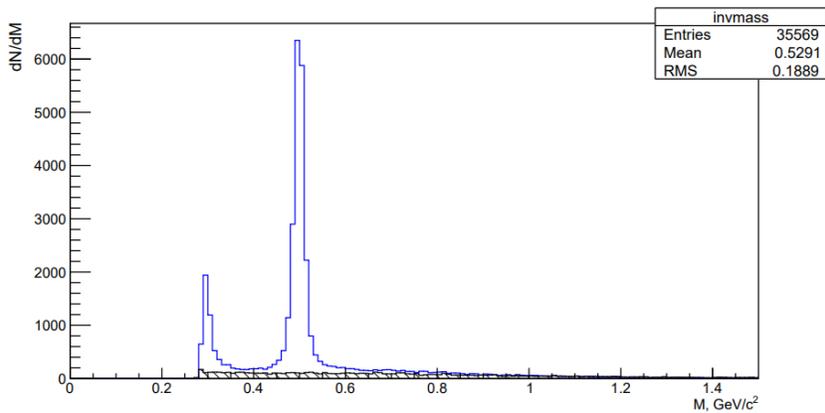
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02}) < -16$



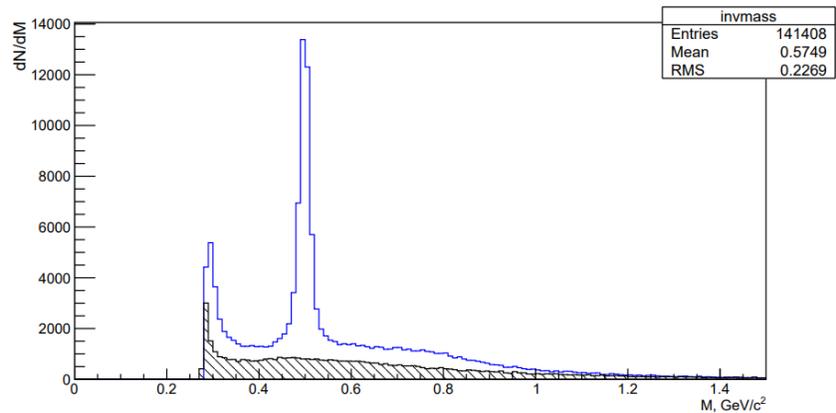
Двухмерное распределение $d_{01}(d_{02}) < -2$



Распределение по инвариантной массе двух пионов при $d_{01}(d_{02}) < -25$



Распределение по инвариантной массе двух пионов при $d_{01}(d_{02}) < -16$



Распределение по инвариантной массе двух пионов при $d_{01}(d_{02}) < -2$