

Министерство образования и науки Российской Федерации  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(государственный университет)  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Власов Иван Сергеевич

АНТИПРОТОН – ПРОТОННЫЕ ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ РЕАКЦИИ НА ВЕС

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Направление подготовки 010900 «Прикладная математика и физика»

Заведующий кафедрой	_____	А.М. Зайцев
Научный руководитель	_____	Ю.А. Хохлов
Студент	_____	И.С. Власов

г. Протвино

2014

## **РЕФЕРАТ**

Дипломная работа: 54 страницы, 67 рисунков, 3 источника литературы

### **АНТИПРОТОНЫ, ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ РЕАКЦИИ, ВЕРШИННЫЙ СПЕКТРОМЕТР**

При отводе отрицательных частиц в канал менее 1% из них (а точнее, 0,02%) – антипротоны. В данной работе исследовались эксклюзивные антипротон – протонные реакции на установке ВЕС (Вершинный Спектрометр). Были выделены 13 основных систем (с наиболее типичными реакциями) с различным числом получившихся положительных, отрицательных и нейтральных частиц. Был проведен анализ и построение гистограмм для всех типов реакций.

## Содержание

Обозначения и сокращения .....	4
Введение .....	5
1. Литературный обзор.....	6
2. Постановка задачи .....	10
3. Полученные системы и их анализ.....	11
3.1 Антипротон .....	11
3.2 Антипротон и 1 $\gamma$ .....	15
3.3 Антипротон и 2 $\gamma$ .....	17
3.4 Антипротон и 3 $\gamma$ .....	19
3.5 Антипротон и 4 $\gamma$ .....	23
3.6 Антипротон и 5 $\gamma$ .....	27
3.7 Антипротон и $\pi^+$ .....	28
3.8 Антипротон, $\pi^+$ и 2 $\gamma$ .....	29
3.9 Антипротон и $\pi^-$ .....	34
3.10 Антипротон, $\pi^-$ и 2 $\gamma$ .....	35
3.11 Положительная частица и 2 отрицательные .....	42
3.12 Положительная частица, 2 отрицательные и 1 $\gamma$ .....	45
3.13 Положительная частица, 2 отрицательные и 2 $\gamma$ .....	49
Выводы и результаты .....	53
Список использованных источников.....	54

### **Обозначения и сокращения**

В данной работе использованы следующие обозначения и сокращения:

МэВ – мегаэлектронвольт

ГэВ – гигаэлектронвольт

ВЕС – Вершинный Спектрометр

## **Введение**

В данный момент ускорители частиц используются повсеместно, начиная с медицины, заканчивая проектами космического вооружения. Однако наиболее частое их применение – исследование законов элементарных частиц и взаимодействий в физике высоких энергий.

Основной принцип современных ускорителей – использование мощных электромагнитов для ускорения различных частиц (ионы, адроны, электроны), подверженных влиянию магнитов, то есть обладающих электрическим зарядом. При столкновении с помощью детекторов измеряются результаты реакции, как то: количество частиц и их заряд, четырёхимпульс. Далее следует обработка, использующая различные программные методы при помощи ЭВМ.

## 1. Литературный обзор

Частицы и излучение не могут быть зарегистрированы непосредственно, а лишь через их взаимодействие с веществом. Взаимодействие заряженных частиц отличается от взаимодействия нейтральных (например, фотонов). Каждый процесс взаимодействия может быть основой для некоторого вида детектирования. Основные типы взаимодействия заряженных частиц с веществом – ионизация и возбуждение атомов вещества. Нейтральные частицы должны сначала посредством некоторого взаимодействия образовать заряженные, которые далее регистрируются благодаря некоему характерному для них процессу.

Энергетические потери на ионизацию и возбуждение описываются формулой Бете – Блоха. Основное выражение для потери энергии ( $dE/dx$ ) имеет следующий вид [1]:

$$-\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{ион}} \propto z^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left\{ \ln a \cdot \gamma^2 \beta^2 - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right\},$$

где

- $z$  — заряд налетающей частицы;
- $Z, A$  — атомный номер и атомный вес материала мишени;
- $\beta, \gamma$  — скорость и Лоренц-фактор налетающей частицы;
- $\delta$  — параметр, описывающий эффект плотности;
- $\alpha$  — параметр, зависящий от масс налетающей частицы и электрона, а также от энергии ионизации вещества.

Имеется большое количество различных детекторов. Для трековых и ионизационных измерений используются:

- 1) Ионизационные камеры – измерение энергетических потерь и энергии. Постоянное однородное электрическое поле, постоянная скорость дрейфа электронов и ионов. Носители заряда собираются электрическим полем, индуцируя зарядовый сигнал на электродах.
- 2) Пропорциональные счётчики – рентгеновская спектроскопия, детектирование нейтронов ( $BF_3$  счётчики). Аналогичны цилиндрическим ионизационным камерам, но характеризуются большими напряжённостями поля и меньшими диаметрами анодной проволоки. Развиваются лавины, сигнал, в основном, определяется движением ионов в сторону катода. Может быть использован для детектирования достаточно малого уровня первичной ионизации.
- 3) Счётчики Гейгера – подсчёт пролетевших частиц. Конструкция аналогична пропорциональным счётчикам, но большие напряжённости полей.

- 4) Многопроволочные пропорциональные камеры – трековые детекторы с возможностью измерения энергетических потерь. Состоит из плоских слоёв пропорциональных счётчиков без разделяющих стенок.
- 5) Плоские дрейфовые камеры – трековые детекторы с измерением энергетических потерь. Используется гораздо меньше проволочек, чем в предыдущем пункте.

Временные измерения:

- 1) Фотоумножители – измерение слабых световых сигналов, времени. Представляет собой фотокатод из металла с низкой работой выхода.
- 2) Сцинтилляторы – гамма-спектроскопия и магнитная калориметрия в органических; временные измерения в пластмассовых; элементы триггера в калориметрах. В них энергия заряженных частиц или фотонов конвертируется в фотоны в видимом диапазоне.

Также используются детекторы для идентификации частиц. Задача детекторов для идентификации частиц состоит в определении из массы и заряда. Обычно цель достигается комбинированием информации с различных детекторов. Основные входные параметры:

- а) импульс  $p$  определяется с помощью магнитного поля:  $p = \gamma m_0 \beta c$ ; ( $\beta$  — скорость;  $\gamma$  — лоренц-фактор);
- б) время пролета частицы:  $\tau = s/(\beta c)$ ; ( $s$  — длина пролета);
- в) средние потери энергии на единицу длины:  $-\frac{dE}{dx} \propto \frac{z^2}{\beta^2} \log \gamma$ ;
- г) кинетическая энергия в калориметрах:  $E = (\gamma - 1)m_0 c^2$ ;
- д) выход черенковского света:  $\propto z^2 \sin^2 \theta$ ; ( $\theta = \arccos(1/n\beta)$ ;  $n$  — показатель преломления);
- е) выход фотонов переходного излучения:  $\propto \gamma$ .

Измерение и идентификация нейтральных частиц происходит посредством их конверсии в заряженные частицы на подходящих мишенях или внутри объёма детекторов.

[1,2]

Для этого используются:

- 1) Нейтронные счётчики
- 2) Детекторы нейтрино
- 3) Черенковские счётчики – определение массы в пучках, разделённых по импульсу (пороговые); определение скорости (дифференциальные).
- 4) Детекторы переходного излучения – измерение Лоренц-фактора частиц.

Для измерения энергии используют:

- 1) Электромагнитные калориметры
- 2) Адронные калориметры
- 3) Криогенные калориметры

Применения детекторов частиц охватывает много областей. Приведём некоторые из них [2]:

- Медицина – использование радиоактивных нуклидов для определения размеров и функций внутренних органов
- Геофизика – используются естественные или искусственные гамма-излучатели в качестве индикаторов при поиске газа и нефти
- Космос – измерение потоков заряженных частиц и гамма-излучения важно как для изучения астрофизических процессов, так и для того, чтобы помочь космонавтам избежать получения излишней доли радиации

Для рассмотрения трёхчастичных распадов удобно использовать так называемые диаграммы Далитца. К примеру в [3], для  $K^- + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \Lambda$ . (4.36) получим

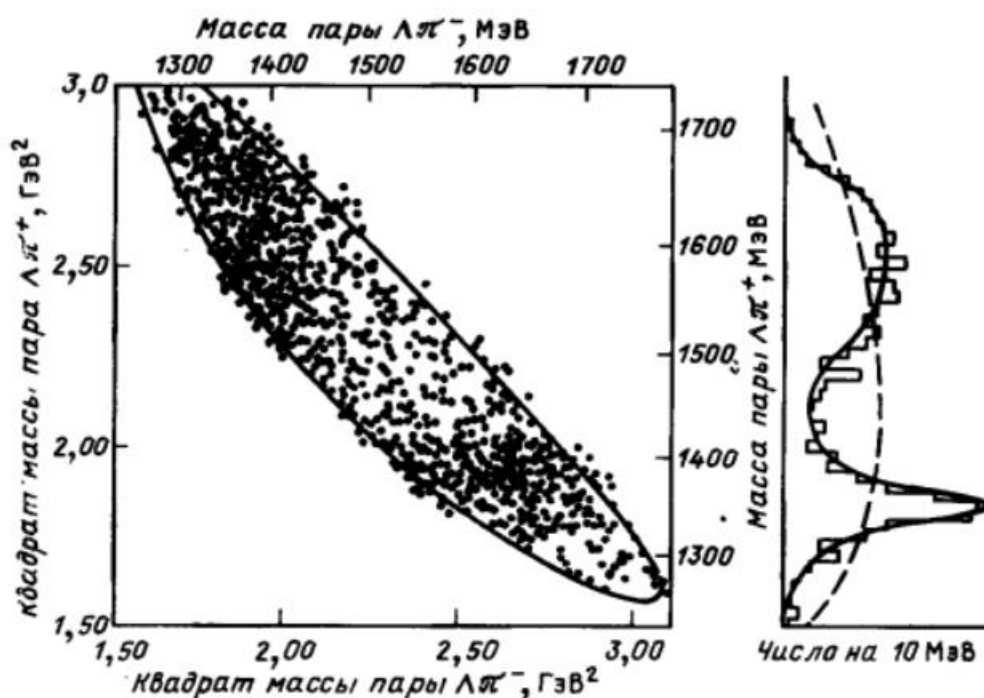


Рис. 4.8. Диаграмма Далитца событий  $\Lambda\pi^+\pi^-$  от реакции (4.36), полученная Shaier et al., 1963 г., при импульсе налетающего  $K^-$ -мезона 1,22 ГэВ/с. Эффективный спектр масс  $\Lambda\pi^+$  показан справа. Штриховая кривая соответствует фазовому распределению (ордината равна интервалу в  $M_{\Lambda\pi}^2$  – в пределах диаграммы Далитца), сплошная кривая — подгонке брейт-вигнеровской формы кривой для  $\Lambda\pi^+$ - и  $\Lambda\pi^-$ -систем

Рисунок 1. Пример диаграммы Далитца



Обычно, если нет сильных корреляций в конечном состоянии, то плотность точек должна быть однородна. На рисунке видны сильные отклонения от однородной плотности, что выражается в горизонтальной и вертикальной полосах заселённости диаграммы. Следовательно, реакция протекает как двухчастичная, когда возникает один пион и резонансное состояние  $\Lambda$  с другим пионом, с более-менее фиксированной массой  $M_{\Lambda\pi}=1385$  МэВ. Причём видно, что, так как наблюдаются и вертикальная и горизонтальная полосы, то резонанс в обоих случаях: в системе  $\Lambda\pi^+$  и в системе  $\Lambda\pi^-$ .

## **2. Постановка задачи**

В поставленной задаче требовалось выделить реакции, в которых в качестве пучка частиц участвует пучок антипротонов. Кроме этого, было необходимо отобрать несколько реакций, которые были бы наиболее часто встречающимися (в них участвует наибольшее число частиц из всего количества) и типичными. Выбранные реакции требовалось обработать с помощью имеющихся программных средств и проанализировать результаты.

### 3. Полученные системы и их анализ

Был проведён анализ системы на наличие частиц различного заряда в каждом эксперименте. Графики, на основе которых сделан анализ, приведены ниже. По их итогам были выбраны 13 систем для детального изучения.

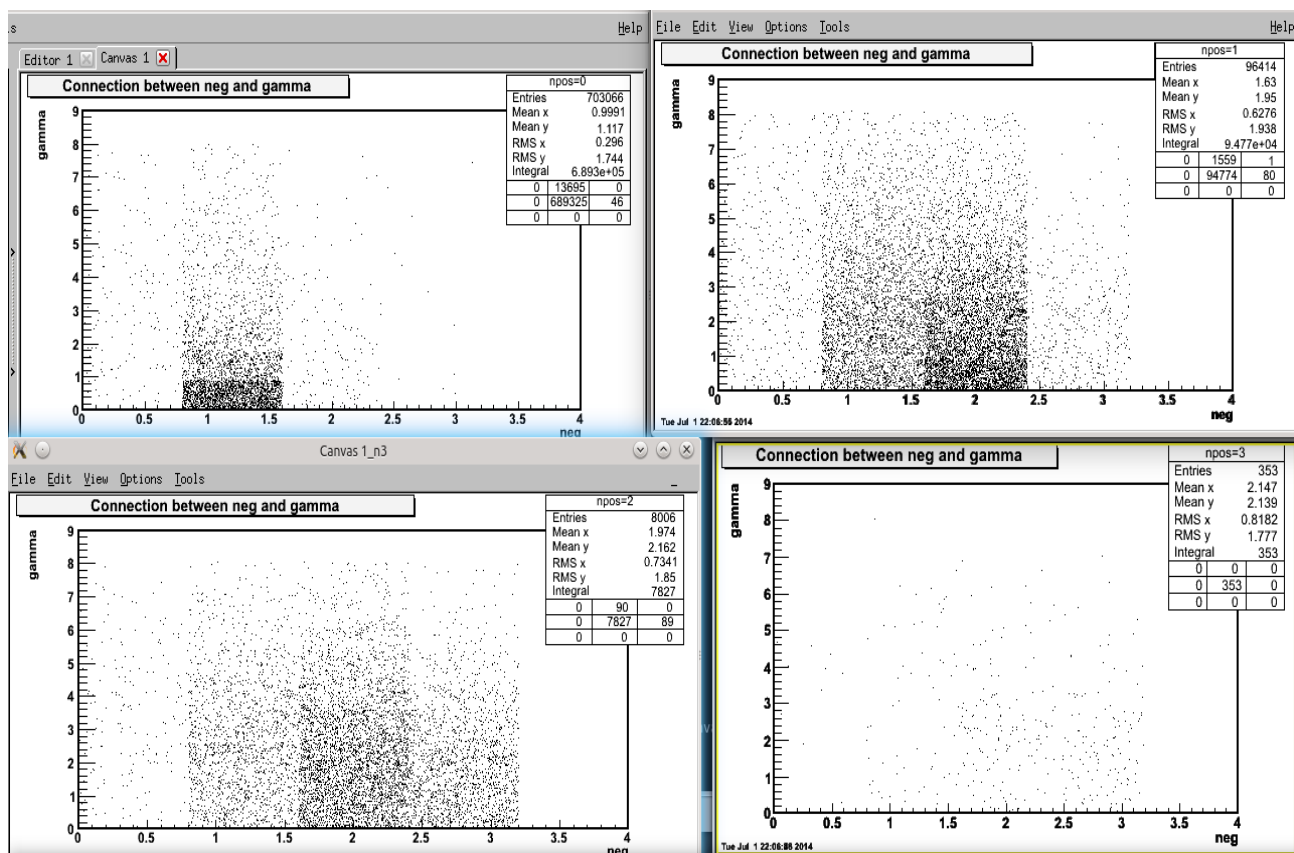


Рисунок 2. Количество нейтральных и отрицательных частиц при 0, 1, 2 и 3 положительных

В итоге были выбраны системы с 1 отрицательной частицей (которой, очевидно, является антипротон) и 0-5  $\gamma$ -квантами. Также взяты системы с 2 отрицательными частицами (которыми являются антипротон и  $\pi^-$ ) с 0 и 2  $\gamma$ -квантами. Далее были исследованы системы с 1 положительно заряженной частицей ( $\pi^+$ ) и 1 отрицательной, а также 0 и 2  $\gamma$ -квантами. И, наконец, были изучены системы с 1 положительной частицей, 2 отрицательными и 0-2  $\gamma$ -квантами.

#### 3.1. Антипротон

В этой реакции антипротон сохраняется в своём изначальном состоянии, либо вообще не взаимодействуя с нуклонами, либо взаимодействуя недостаточно сильно для порождения иных частиц.

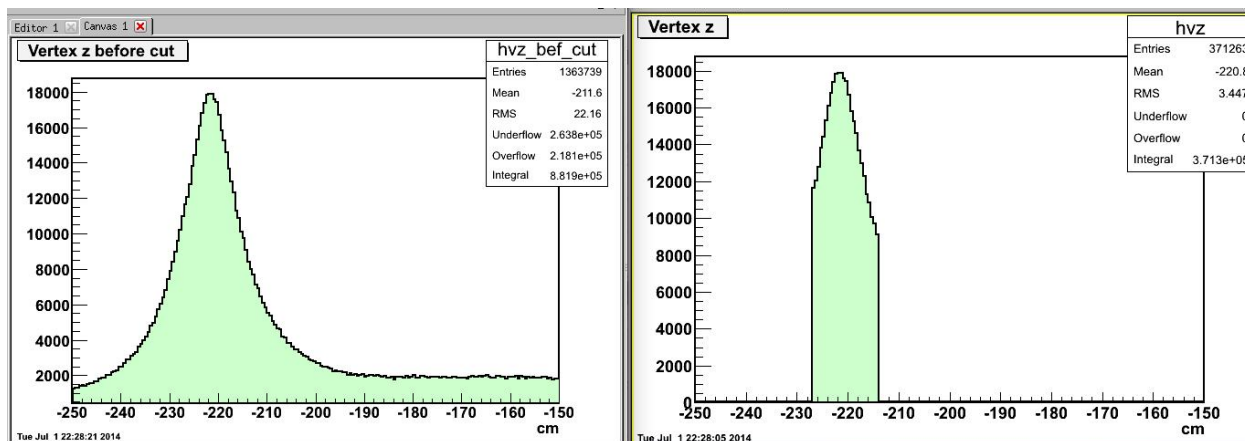


Рисунок 3. Вершина по оси z до и после обрезания

Можно увидеть, что гистограмма имеет значительную подложку, что, скорее всего, означает пролёт антипротона мимо. При обрезании теряется примерно миллион реакций. В последующих рассмотренных системах имеем дело не с таким большим количеством реакций, а также с меньшей подложкой (в большинстве случаев).

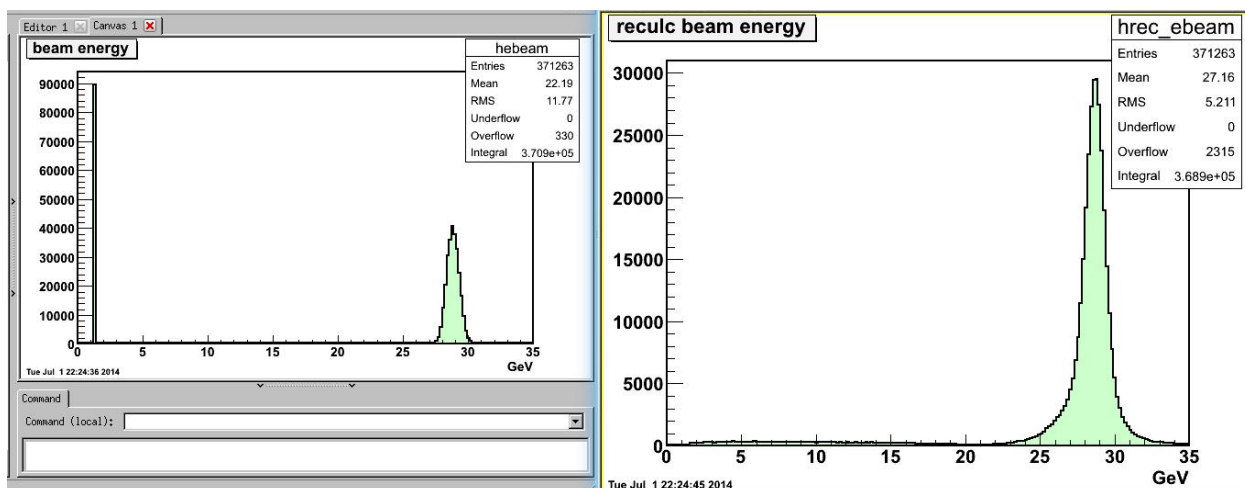


Рисунок 4. Энергия пучка, рассчитанная автоматически (слева) и пересчитанная (справа)

На гистограмме виден огромный пик на 1 ГэВ, что означает, что энергия (импульс) частицы не была зафиксирована и поставлена «по умолчанию» 1 ГэВ. Это было исправлено при помощи перерасчёта энергии пучка в программе. В остальных исследуемых системах графики пучка и рассчитанного пучка выглядят практически так же, поэтому тут они не вставлены для экономии места и по той причине, что не несут никакой дополнительной информации.

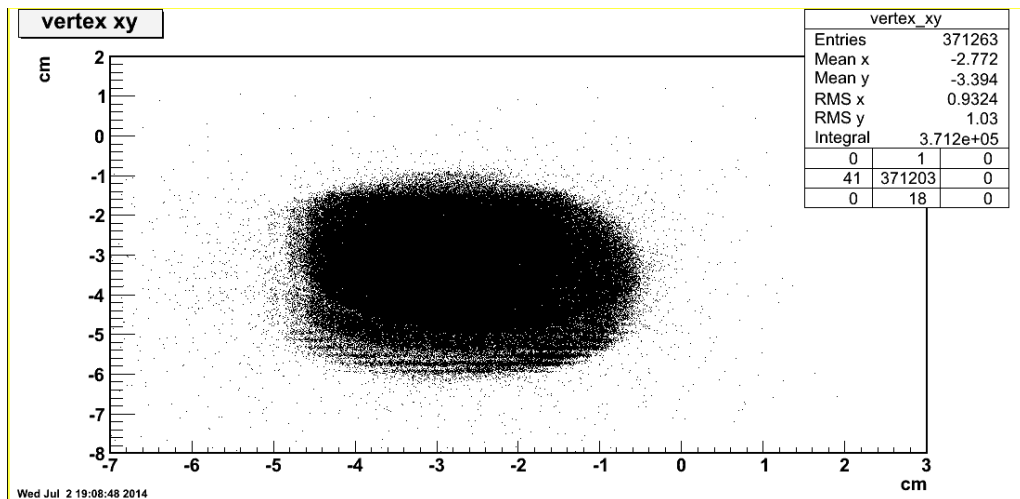


Рисунок 5. Вершина по осям ху

Видно, что по этим осям вершина очень хорошо укладывается в овал мишени. В остальных случаях ситуация абсолютно аналогично, поэтому не будем указывать остальные гистограммы подобного типа в этой работе.

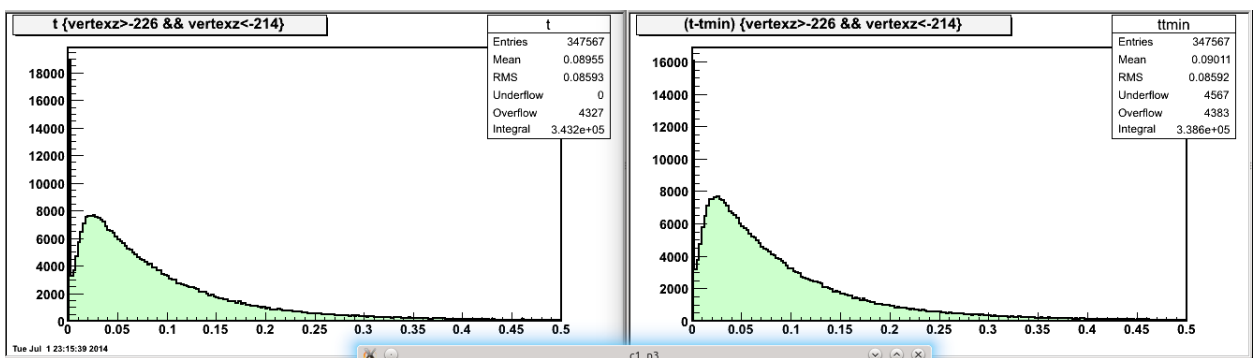


Рисунок 6. t и t-tmin для реакции антипротон –  $0 \gamma$

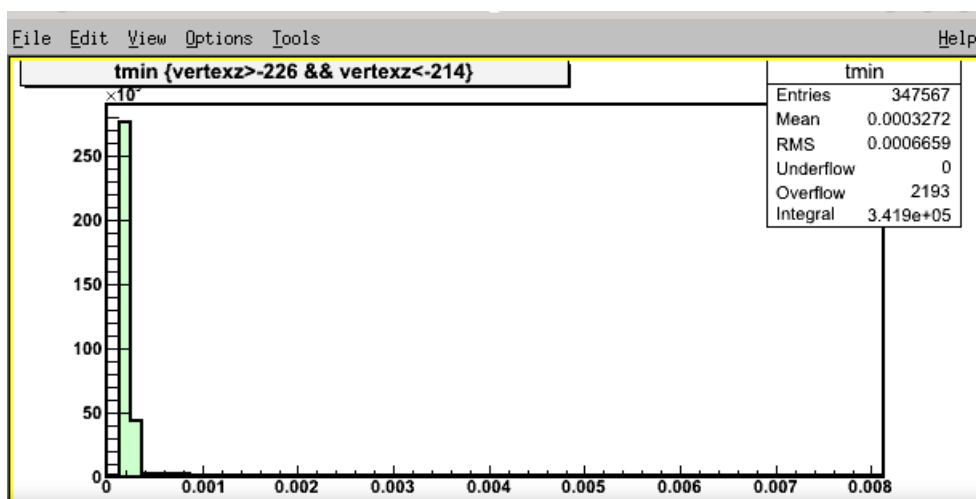


Рисунок 7. tmin для реакции антипротон –  $0 \gamma$

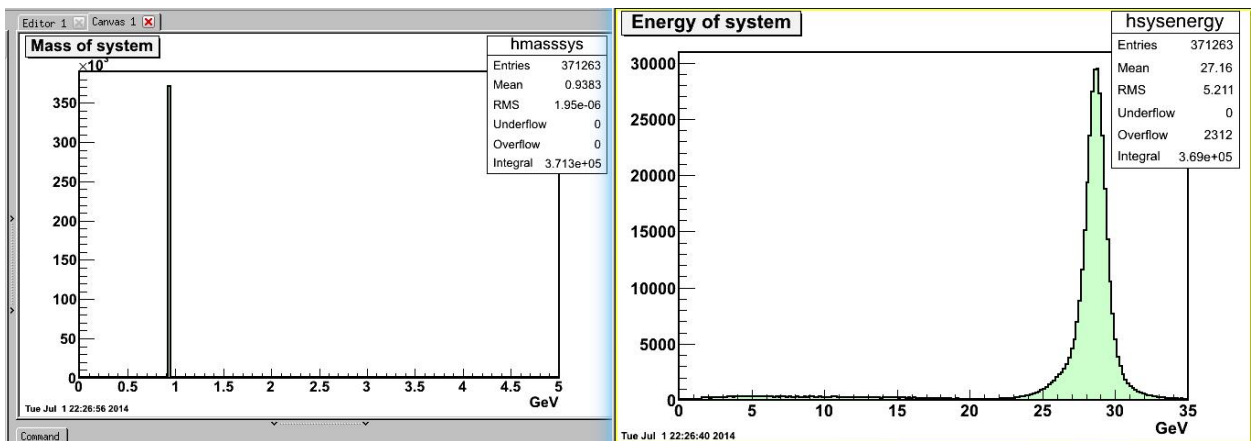


Рисунок 8. Масса и энергия системы полученных частиц (в данном случае только антипротон)

По предыдущим рисункам можно увидеть, что в результате реакции и правда получается только антипротон (масса системы соответствует его массе). Энергия системы сохраняется, то есть столкновение (если оно было) было упругим, как видно из рисунка 8. Однако можно видеть, что довольно весомый импульс передаётся в перпендикулярной плоскости, что приводит к появлению большого  $t$ . Однако этот импульс не приводит к появлению новых частиц. Что означает, что он приводит лишь максимум к возбуждению нуклонов ядра.

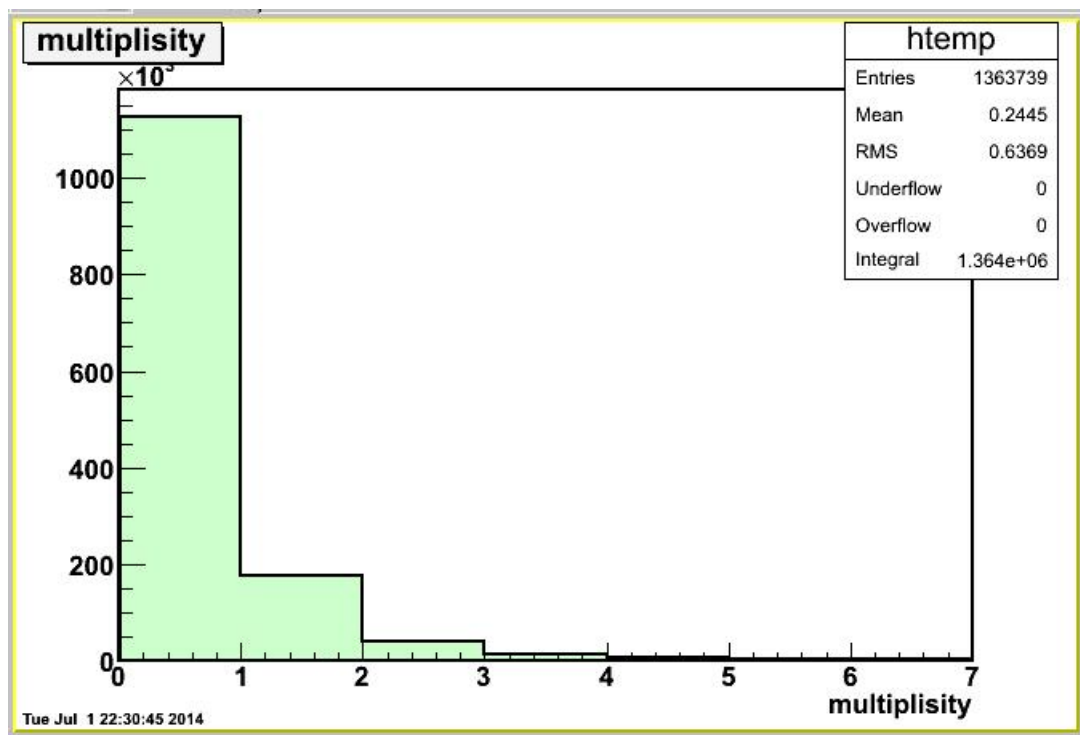


Рисунок 9. Реакция «охранки»

Как видно из рисунка 9, преимущественно идут реакции, не вызывающие никаких дополнительных реакций «охранки». При убирании реакций, которые вызывают отклик, существенно ничего не меняется. В остальных системах будет аналогичная ситуация, поэтому не будем указывать в них графики этого типа.

### 3.2. Антипротон и 1 $\gamma$

Система, на выходе которой получаются антипротон и 1  $\gamma$ -квант.

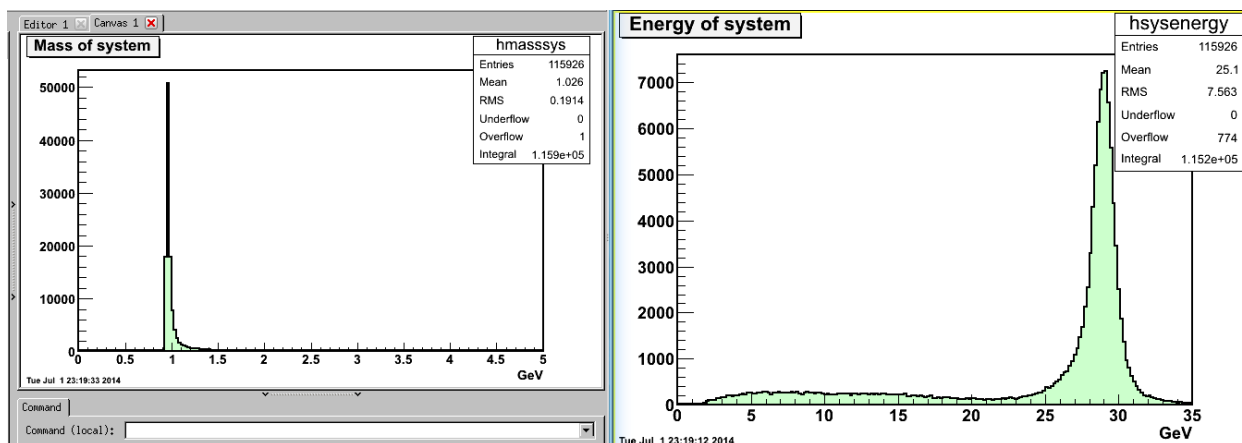


Рисунок 10. Суммарная масса и энергия системы антипротон – 1  $\gamma$ -квант

Можно заметить, что масса не сильно отличается от предыдущей системы, так же как и энергия – видно, что столкновение упругое.

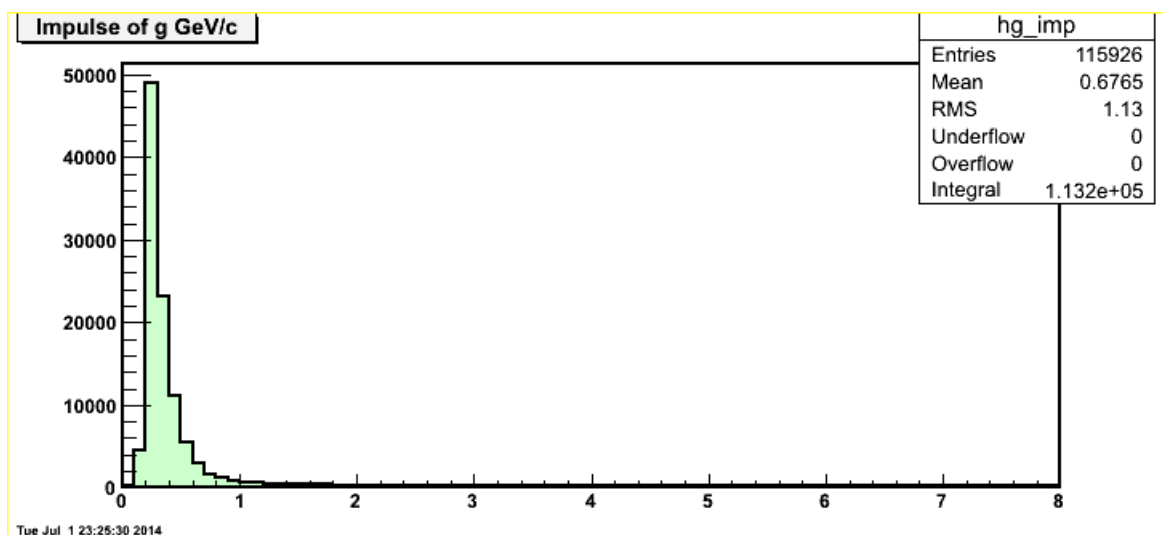


Рисунок 11. Импульс  $\gamma$ -кванта

Импульс  $\gamma$ -кванта чуть около 1 ГэВ, что описывает такую небольшую прибавку к суммарной массе.

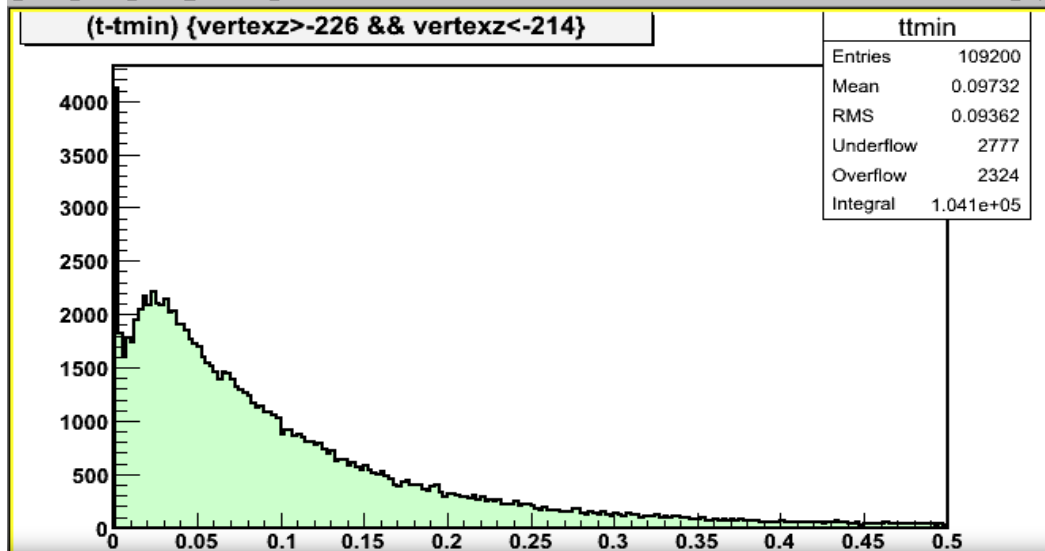
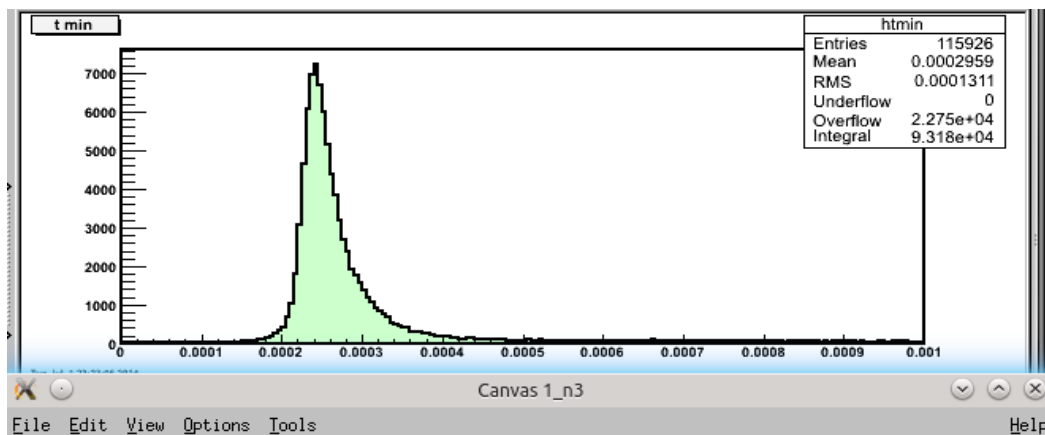
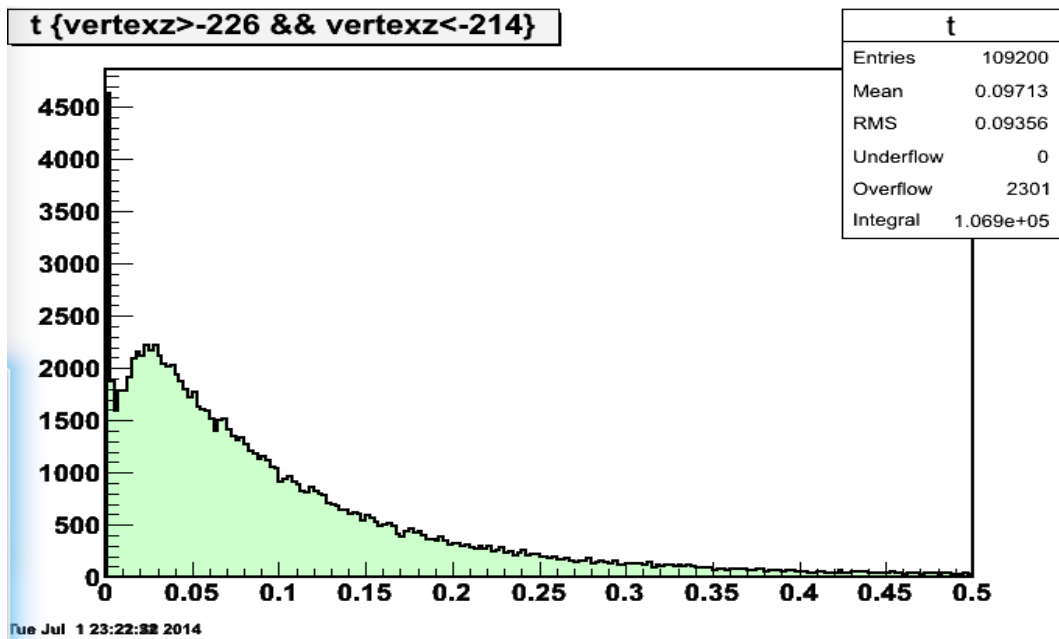


Рисунок 12. t, tmin и t-tmin для системы антипротон – 1  $\gamma$ -квант

Как и в предыдущем случае, видно, что передаётся довольно большой импульс в поперечном направлении. Это как раз может служить достаточным поводом для возбуждения нуклонов и излучения фиксируемого  $\gamma$ -кванта.



### 3.3. Антипротон и 2 $\gamma$

Здесь имеет место появление 2  $\gamma$ , что говорит о возможности их образования при распаде  $\pi^0$  или  $\eta$ -мезона.

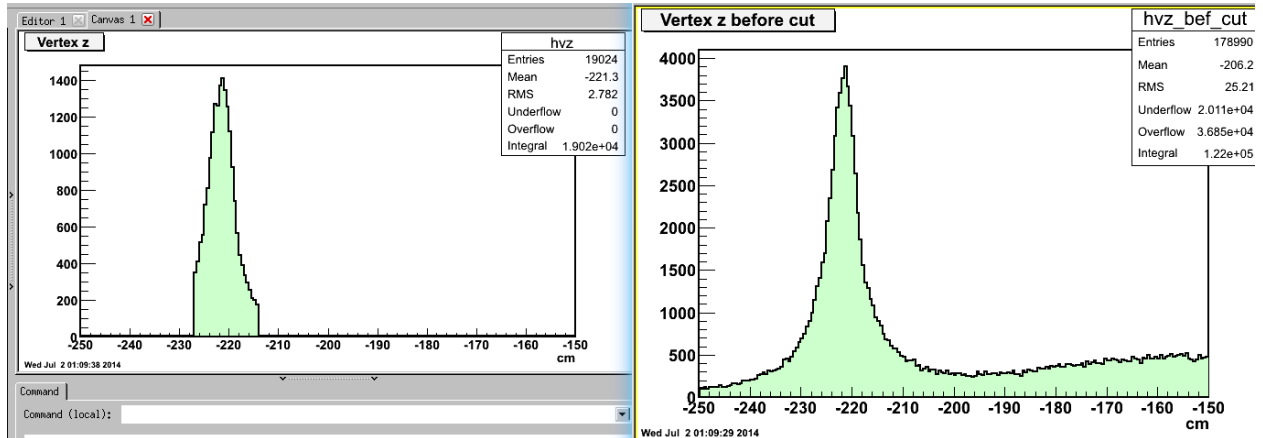


Рисунок 13. Вершина по оси z до и после обрезания

Видна большая подложка, её обрезание приводит к потере 160 тысяч реакций.

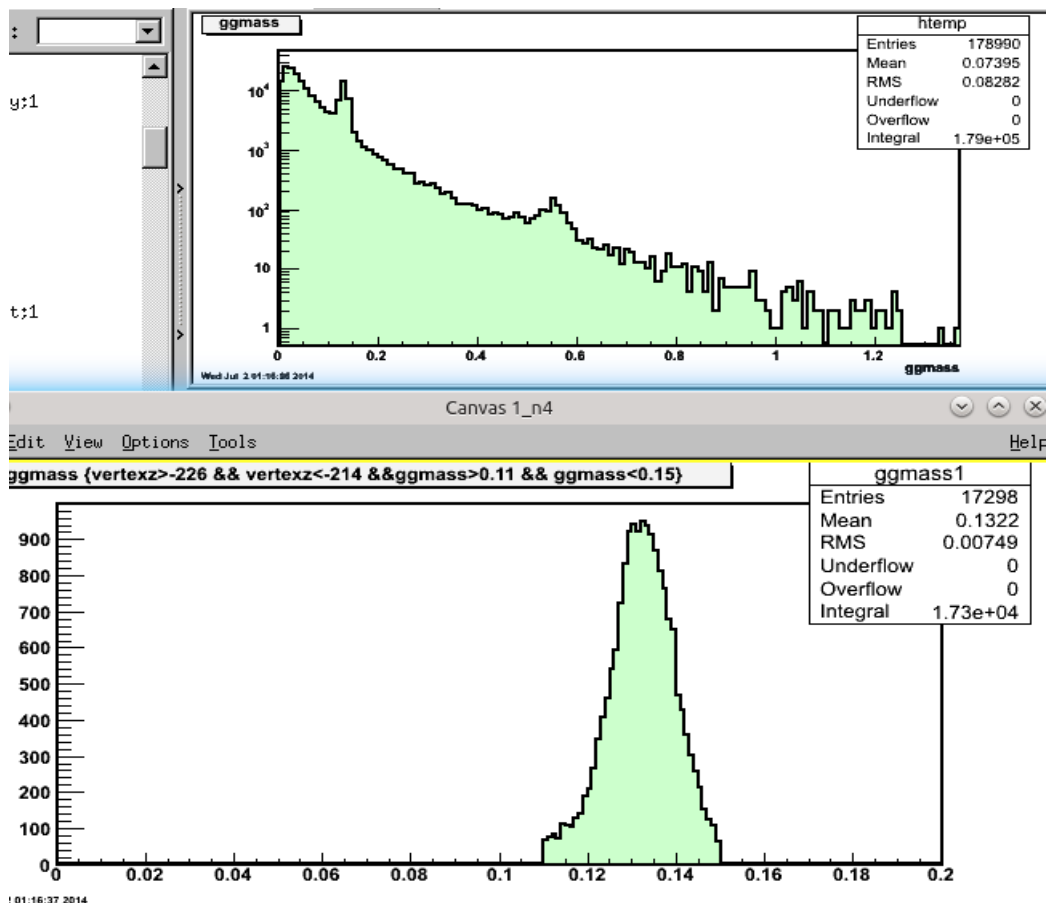


Рисунок 14. Суммарная масса 2  $\gamma$  в логарифмическом масштабе (сверху), масса 2  $\gamma$  после обрезания по  $\pi^0$

Можно явно увидеть пики примерно на 0.139 и 0.53 ГэВ, что соответствует  $\pi^0$  и  $\eta$ -мезону. Рассмотрим эти варианты подробнее: построив гистограммы для импульса и

массы системы в этих двух случаях. Очевидно из рисунков 14 и 15, что пи-мезона во много раз больше, что, естественно, скажется на дальнейших гистограммах.

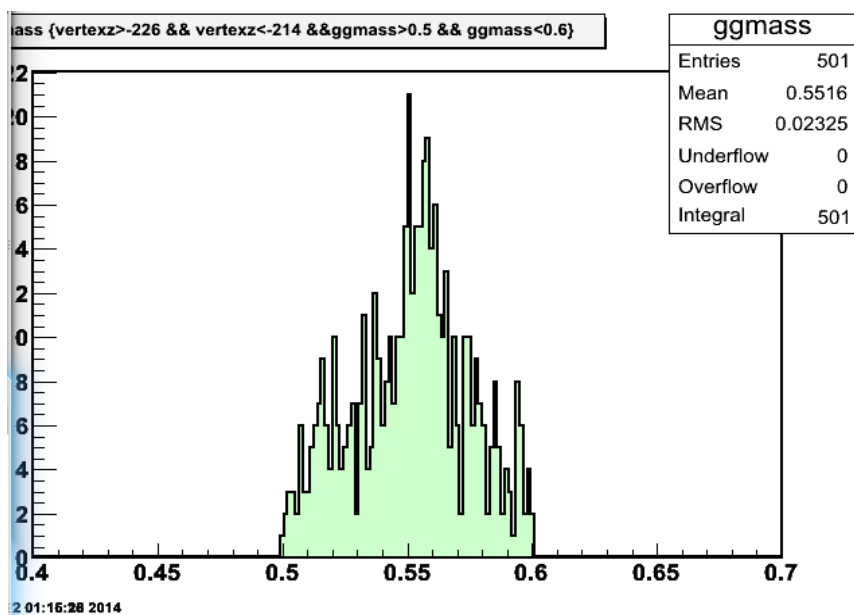


Рисунок 15. Суммарная масса 2  $\gamma$  после обрезания по  $\eta$ -мезону

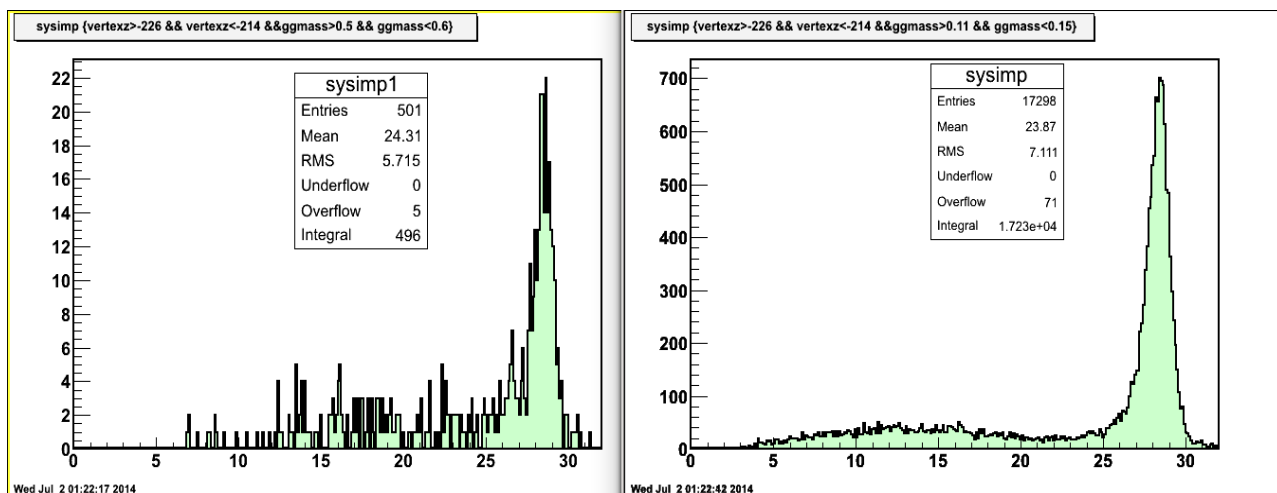


Рисунок 16. Импульс системы при гипотезах  $\eta$ -мезона (слева) и  $\pi$ -мезона (справа)

Обе системы показывают упругий пик в гистограмме импульса системы. Причём для  $\pi$ -мезона пик явно лучше. На рисунке 18 видно, что довольно большой импульс уходит в поперечном направлении, причём в случае  $\eta$  он явно тянется дальше и в процентном отношении  $\eta$  сильно проигрывает, так как почти 10% выходит за  $0.5 \text{ ГэВ}^2/c^2$ . На рисунке 17 видны суммарные массы в обоих случаях. В случае  $\pi$  имеются довольно явные пики на примерно 1380 и 1700 МэВ, что может соответствовать  $\Sigma(1385)$ , а также  $\Delta(1700)$  или  $N(1700)$ . В случае  $\eta$  резонансы более тяжёлые, примерно в 1600 и 1950 МэВ.

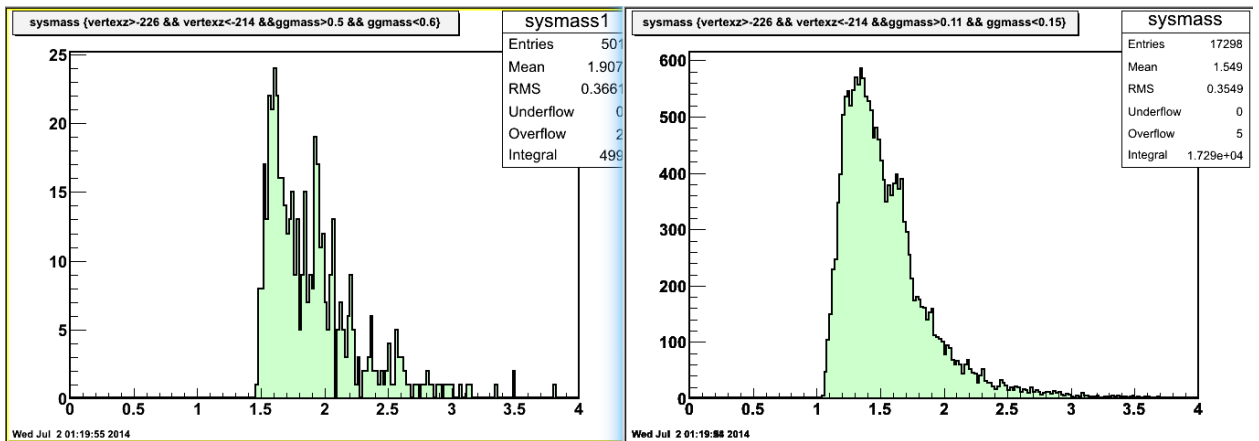


Рисунок 17. Суммарная масса системы при гипотезах  $\eta$ -мезона (слева) и  $\pi$ -мезона (справа)

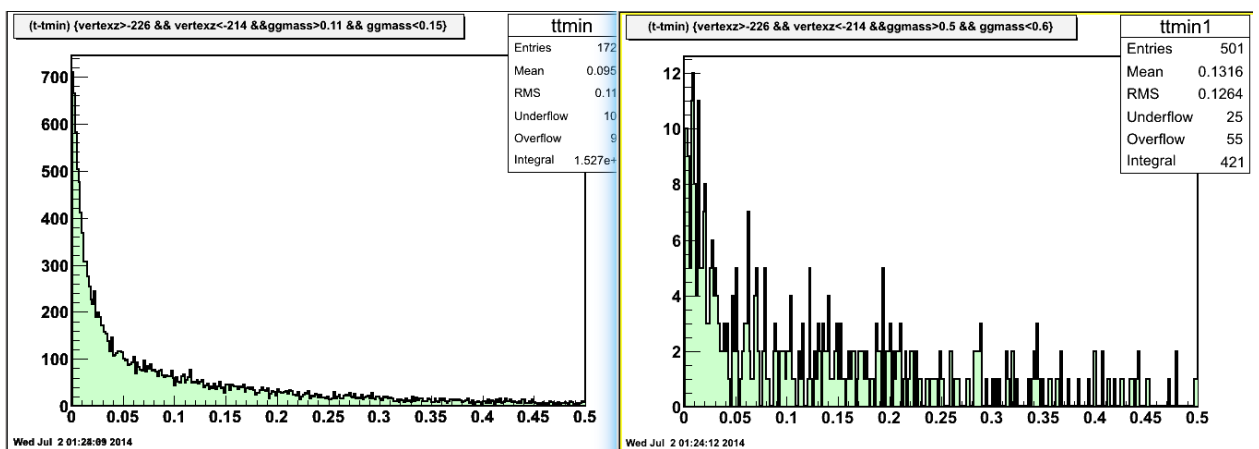


Рисунок 17.  $t-t_{min}$  при гипотезах  $\eta$ -мезона (справа) и  $\pi$ -мезона (слева)

### 3.4. Антипротон и $3\gamma$

В этом случае  $\gamma$ -кванты были скомбинированы по 2, чтобы в итоге получить их суммарную массу. На рисунке 18 имеются все 3 комбинации по 2 из 3  $\gamma$ , что в итоге даёт вполне чёткую картину резонанса на 139 МэВ, что соответствует  $\pi$ -мезону. Также можно различить небольшой резонанс в районе  $\eta$ . Опять же, видно, что пи-мезона сильно больше, а также выражен он сильно более явно. Вновь, как и в предыдущей системе, для случая  $\pi$  пик импульса более упругий (рисунок 20), а также передаётся меньший поперечный импульс (рисунок 21).

На гистограмме суммарной массы системы (рисунок 22) видно, что система имеет явно выраженный резонанс на 1100 МэВ, а также пару не настолько явных на 1400 и 1700 МэВ, что может соответствовать  $\Delta$  или же  $N$ . При обрезании по  $\pi$  имеются резонансы на 1400, 1600, 1750, 1950 и 2150 МэВ, что соответствует различным  $\Delta$  или же  $N$ . При обрезании по  $\eta$  имеются резонансы, как и в предыдущей системе, дальше, на 1650, 1800, 2000 и 2250 МэВ.

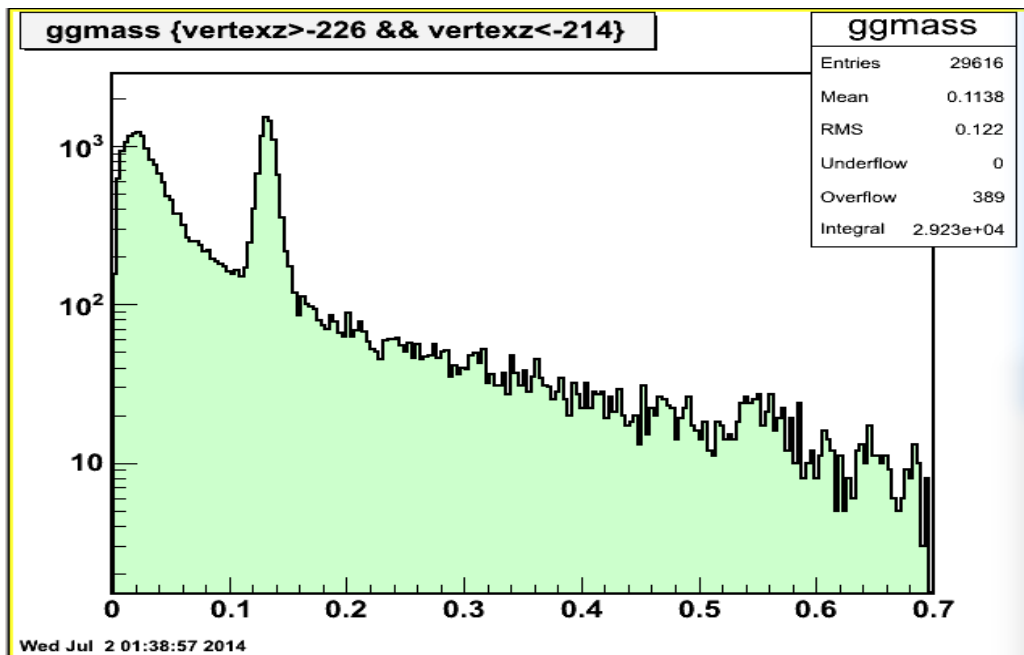


Рисунок 18. Суммарная масса  $2\gamma$  в логарифмическом масштабе

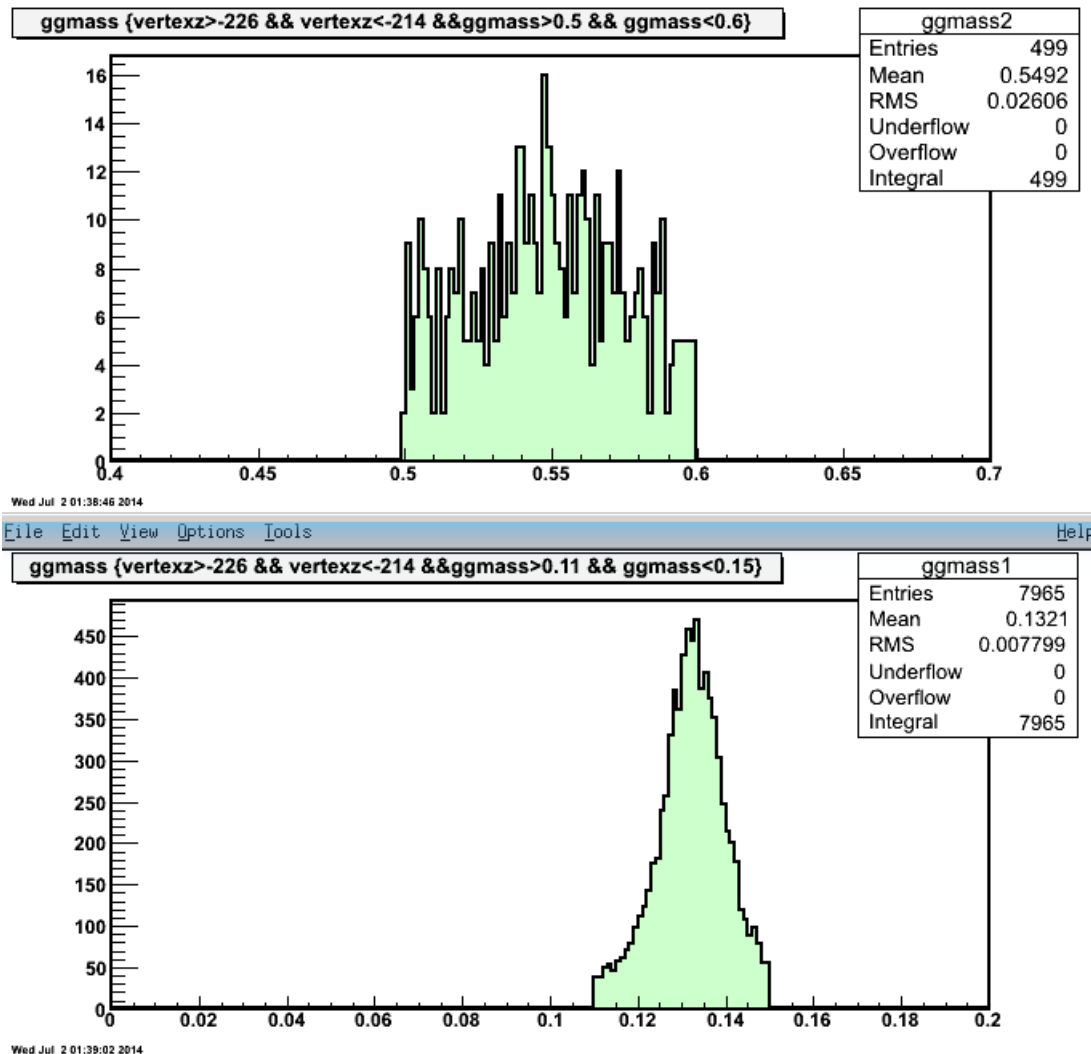


Рисунок 19. Обрезание суммарной массы  $2\gamma$  в районах  $\pi$  (снизу) и  $\eta$ -мезонов (сверху)

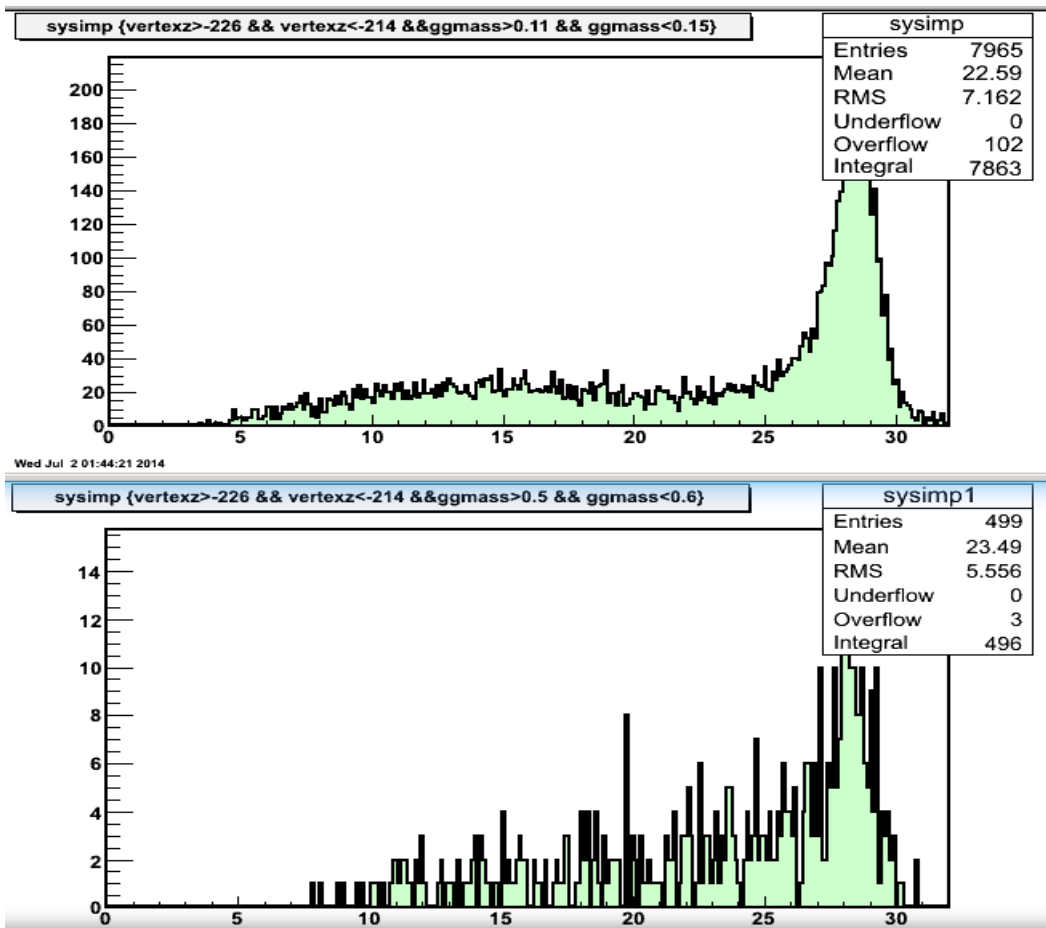


Рисунок 20. Импульс системы в случае существования только  $\pi$  (сверху) или  $\eta$  (снизу)

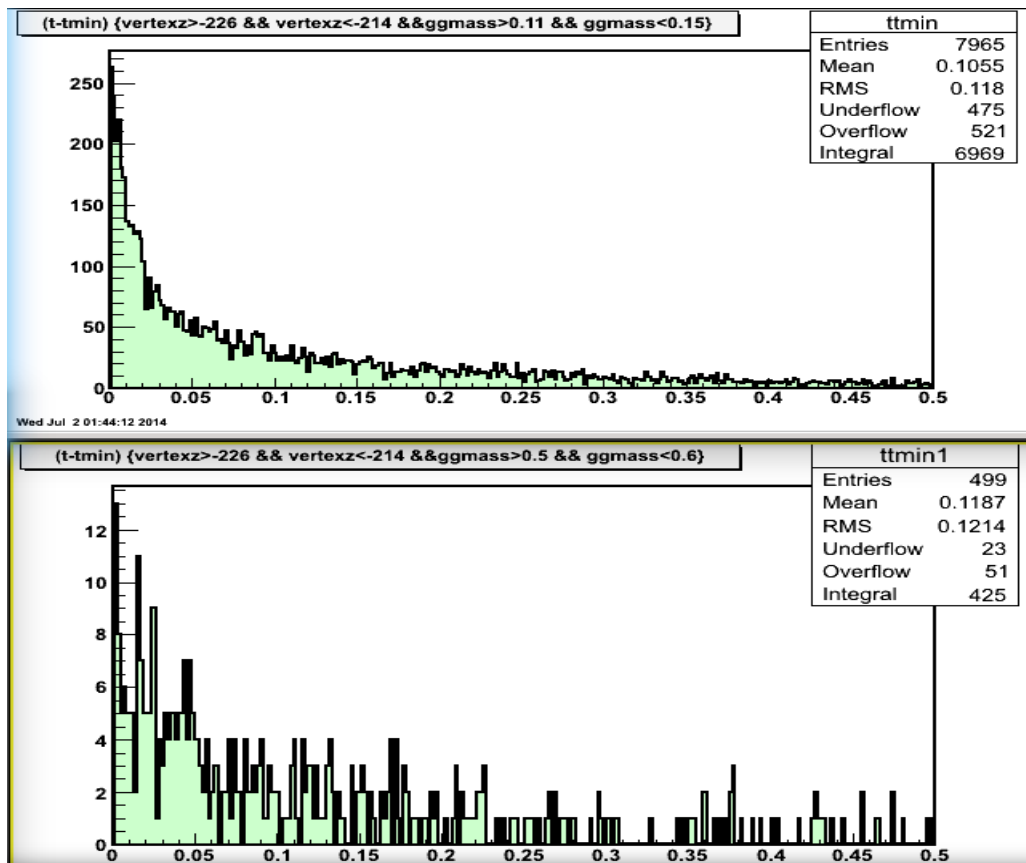


Рисунок 21.  $t-t_{min}$  для существования только  $\pi$  (сверху) или  $\eta$  (снизу)

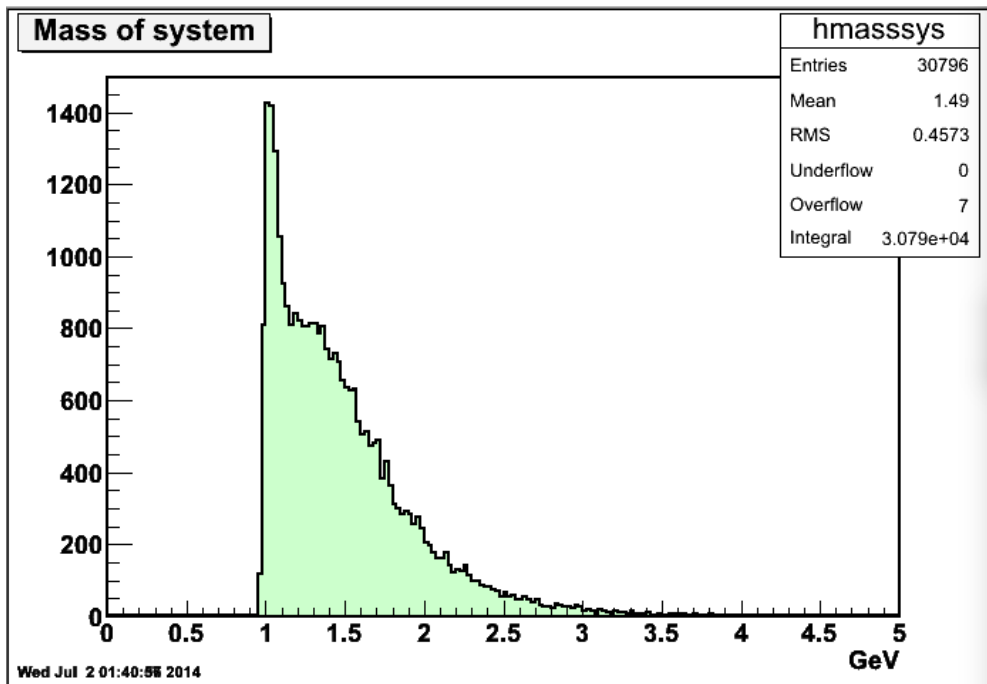


Рисунок 22. Масса системы без обрезаний

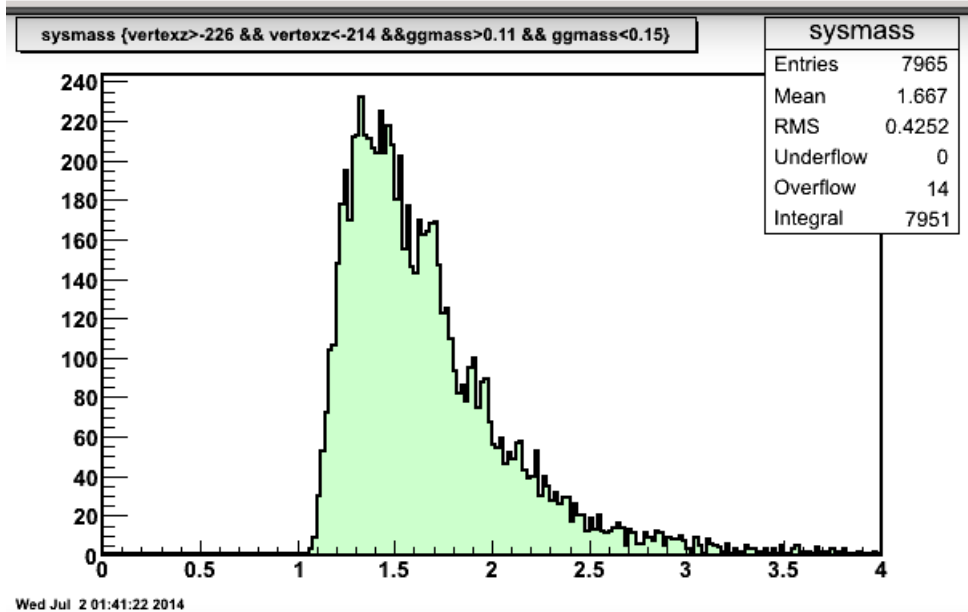
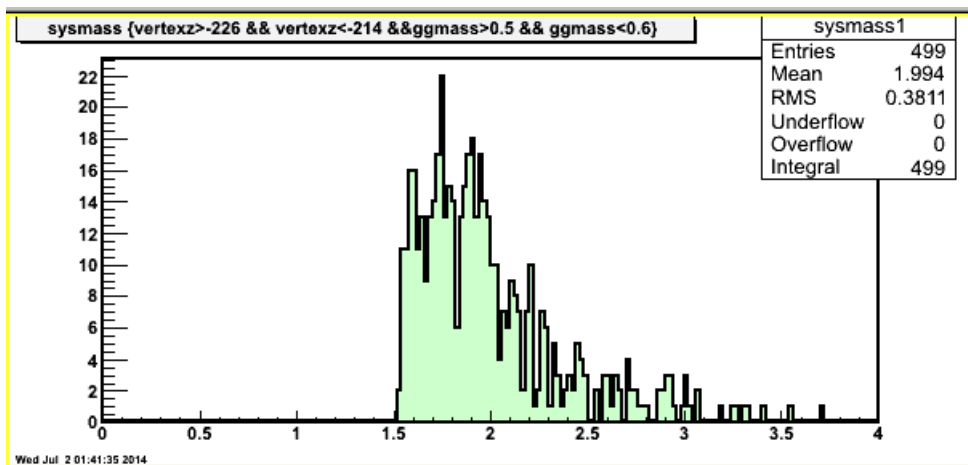


Рисунок 23. Масса системы с обрезанием по  $\pi$  (снизу) и по  $\eta$  (сверху)

### 3.5. Антипротон и 4 $\gamma$

В данной системе было практически невозможно посчитать суммарную массу системы и подобные вещи, так как не известно, как будут комбинироваться друг с другом 4  $\gamma$ -кванта. В этой системе  $\gamma$ -кванты были скомбинированы по 2 и были построены их суммарные массы, чтобы понять насколько возможно образование 2  $\gamma$  из-за распада  $\pi$  или  $\eta$ -мезонов. После этого были построены двухмерные гистограммы с массами непересекающихся  $\gamma$ -квантов, чтобы определить возможность резонанса более чётко.

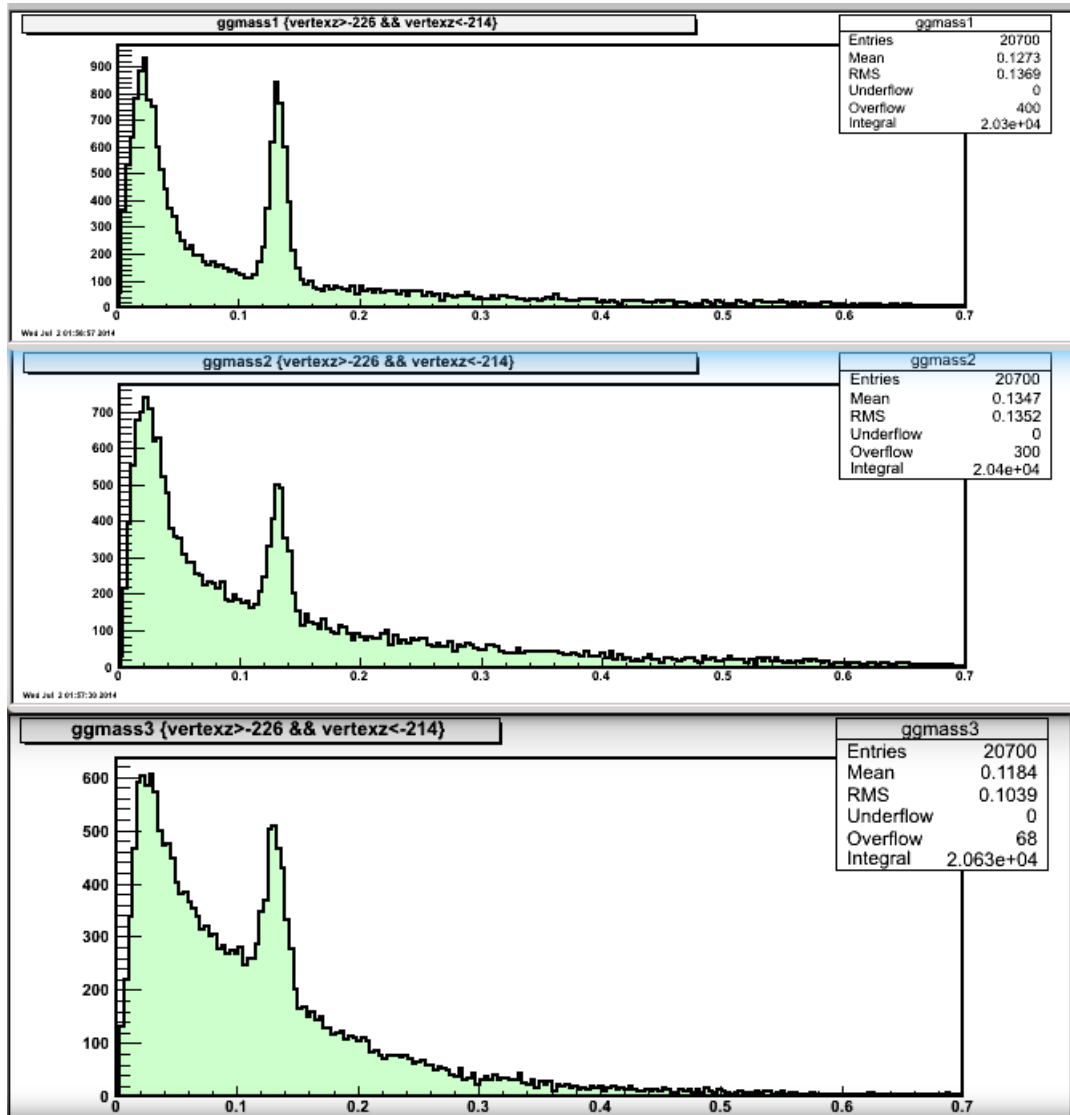


Рисунок 24. Комбинации 1-2, 1-3 и 1-4  $\gamma$ -квантов – массы подсистем

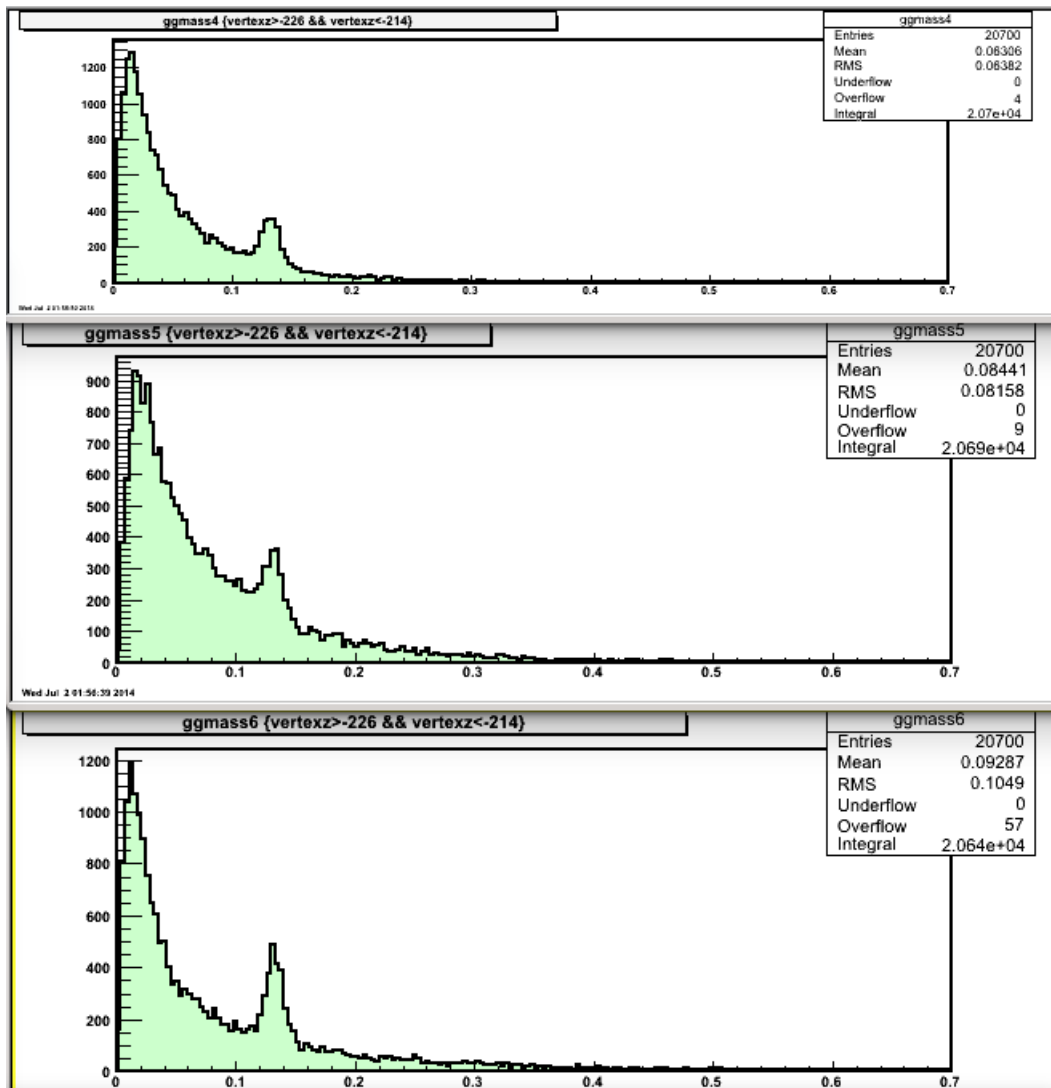


Рисунок 25. Комбинации 3-4, 2-4 и 2-3  $\gamma$ -квантов – массы подсистем

Во всех гистограммах отсутствует пик, соответствующий  $\eta$ , в первых 3 очень сильно выражен пик, соответствующий  $\pi$ , сильнее, чем на остальных 3. Учитывая, что во всех первых трёх гистограммах участвует первый  $\gamma$ -квант, получаем, что он появился из-за распада пи-мезона на 2  $\gamma$ .



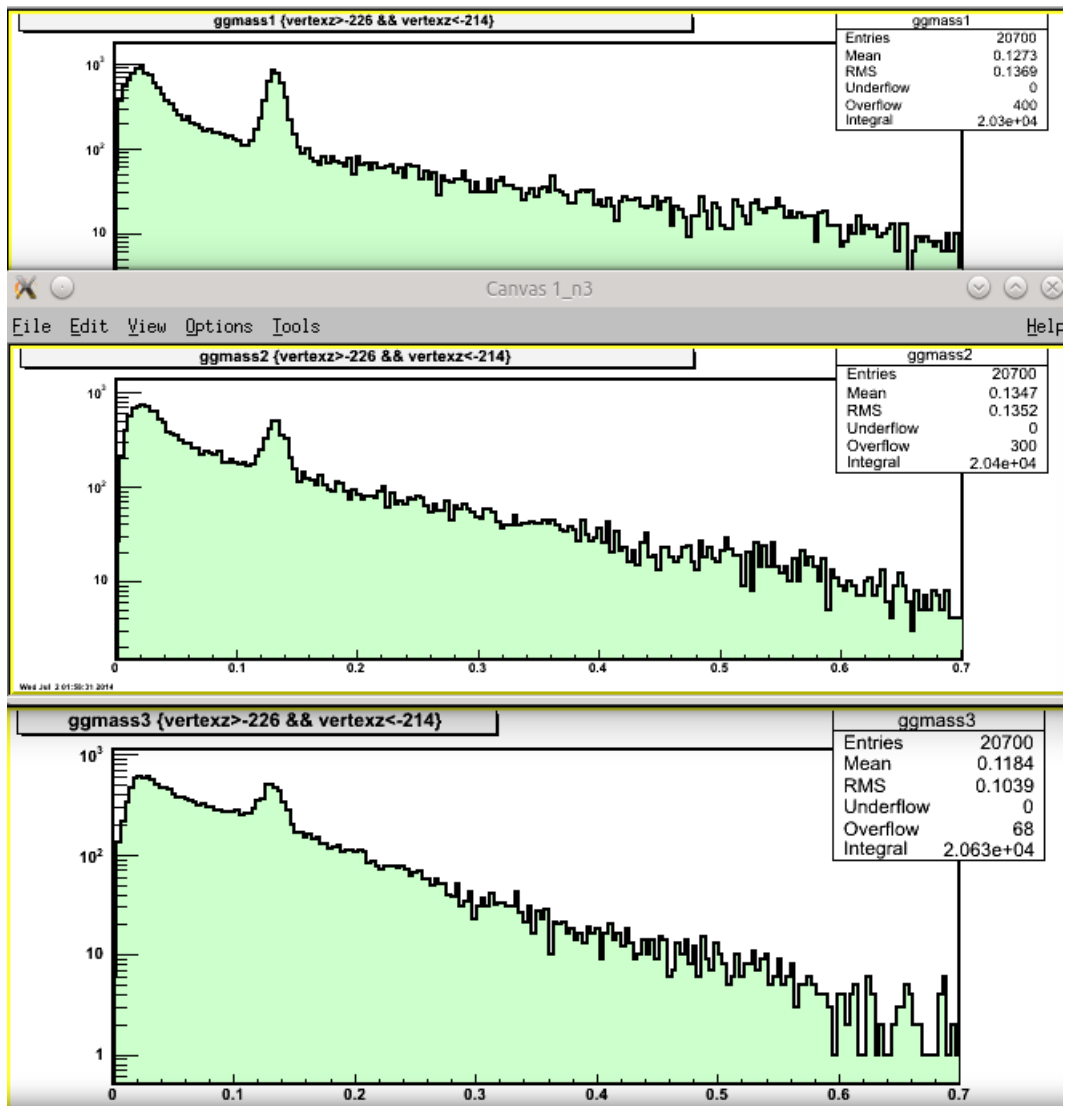


Рисунок 26. Комбинации 1-2, 1-3 и 1-4  $\gamma$ -квантов – массы подсистем – логарифмический масштаб

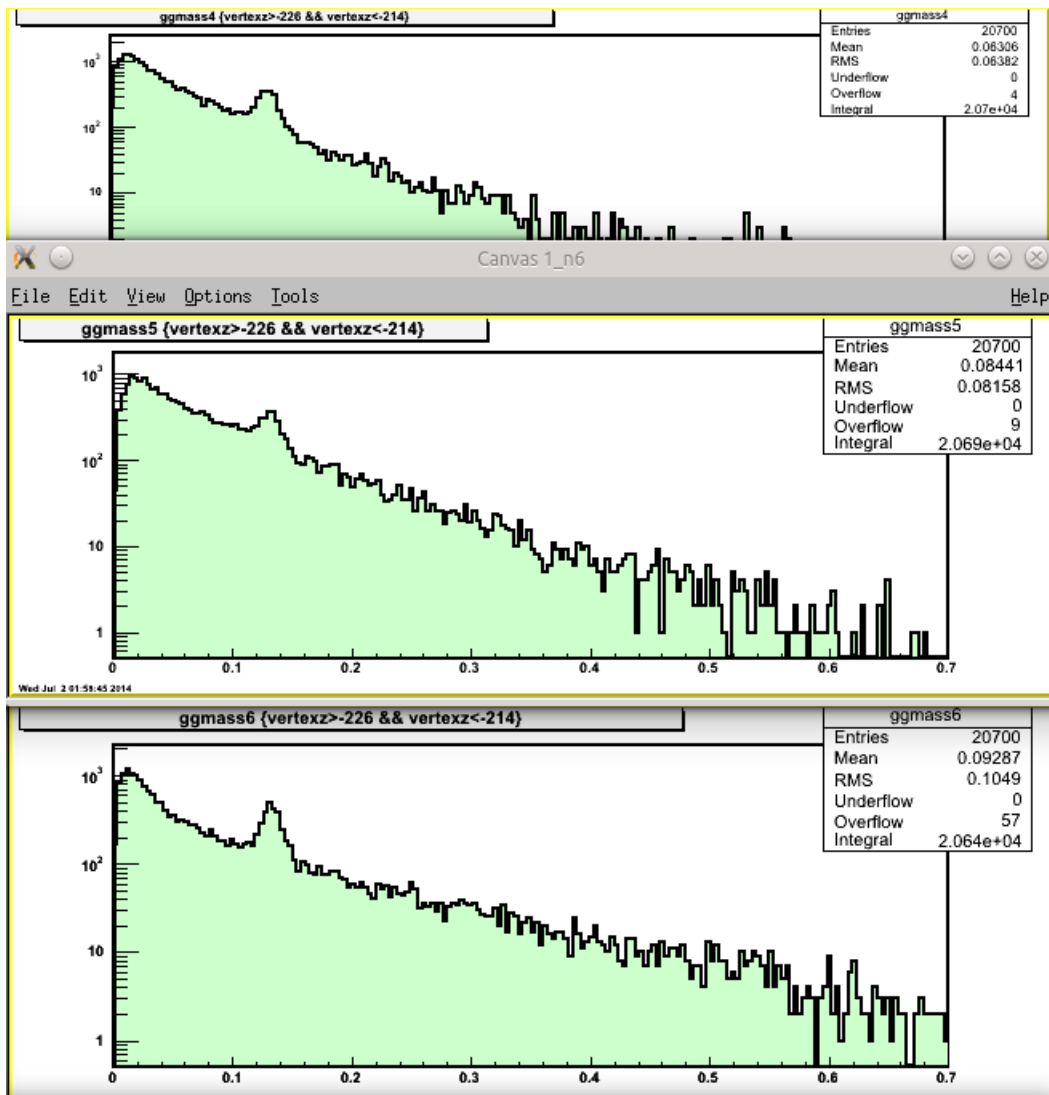


Рисунок 27. Комбинации 3-4, 2-4 и 2-3  $\gamma$ -квантов – массы подсистем – логарифмический масштаб

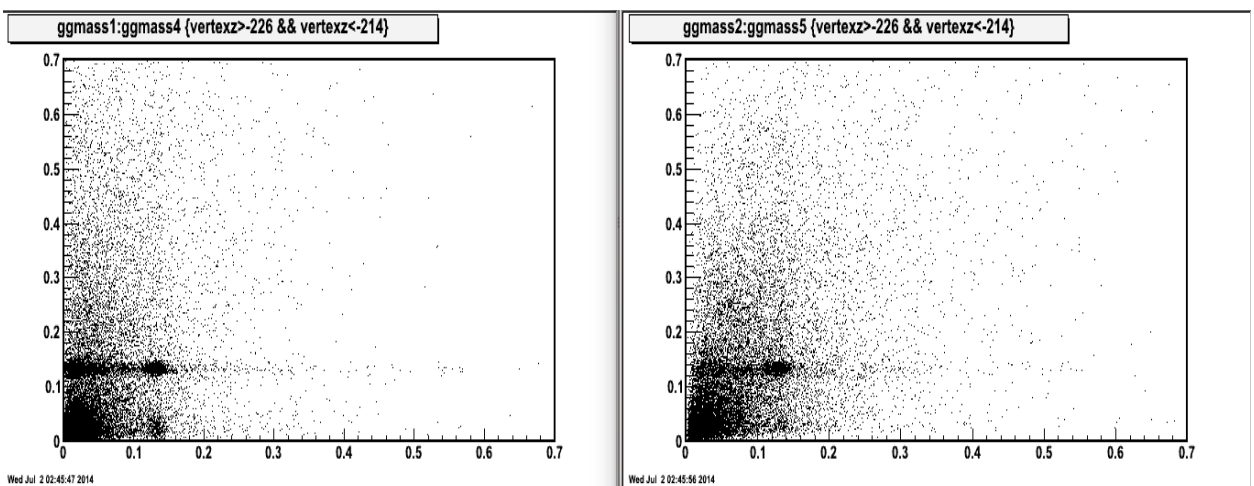


Рисунок 28. Двумерные гистограммы суммарных масс 2  $\gamma$  (для 1-2x3-4 и 1-3x2-4)

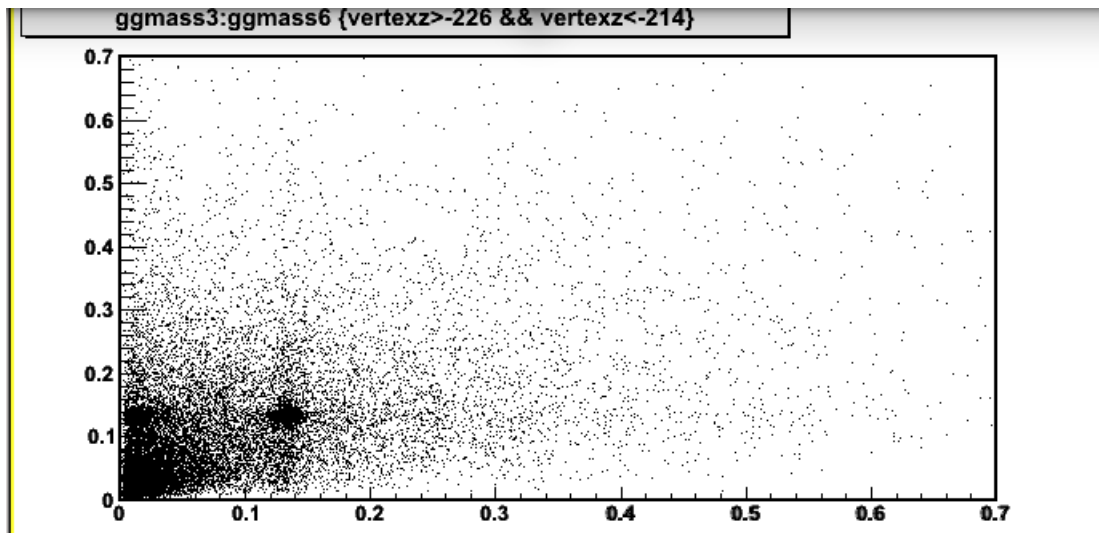


Рисунок 29. Двумерная гистограмма суммарных масс 2  $\gamma$  (для 1-4x2-3)

Везде на двумерных гистограммах видна линия, означающая резонанс в районе  $\pi$  для системы, имеющей в себе первый  $\gamma$ -квант. Также видно большое скопление в точке, где обе суммы имеют резонанс в 0.139 ГэВ. Двумерные гистограммы подтверждают, что в данном случае не имеет места  $\eta$ -мезон (при массе, соответствующей ему, нет резонансов).

### 3.6. Антипротон и 5 $\gamma$

Сложная для описания система, в которой ограничимся лишь нахождением массы 2  $\gamma$ . Проблема в том, что так как неизвестно, как взаимодействуют  $\gamma$  (откуда они получились), то невозможно точно посчитать энергию и массу системы. На рисунке 30 видна суммарная энергия 2  $\gamma$ . Были взяты все возможные сочетания пар  $\gamma$  и построена их суммарная энергия. Легко видно, что имеется резонанс в точке 0.139 ГэВ, что соответствует  $\pi$ -мезону, то есть большая часть этих  $\gamma$  появились в результате распада  $\pi^0$ , однако сложно сказать что-либо более точное.

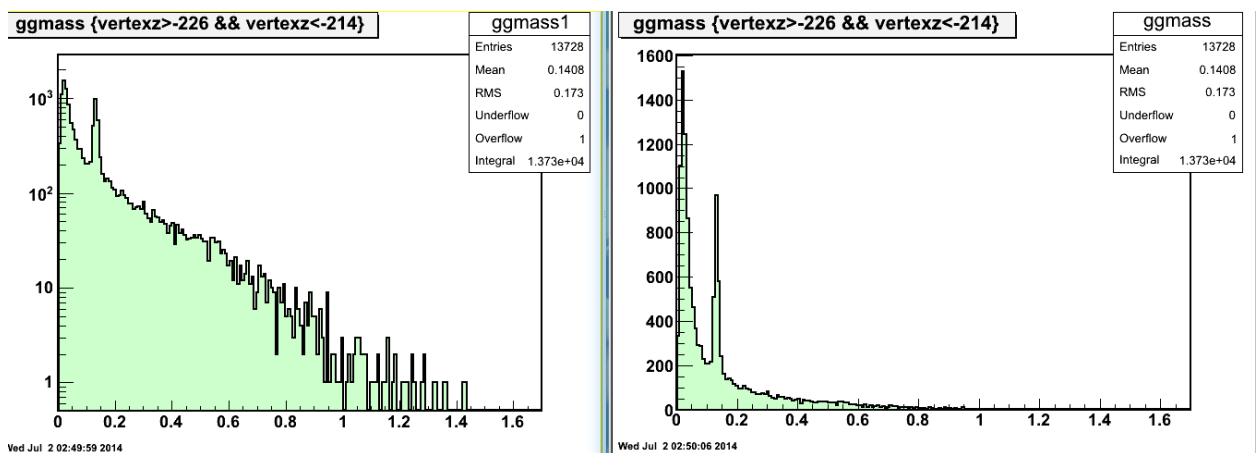


Рисунок 30. Суммарная энергия 2  $\gamma$

### 3.7. Антипротон и $\pi^+$

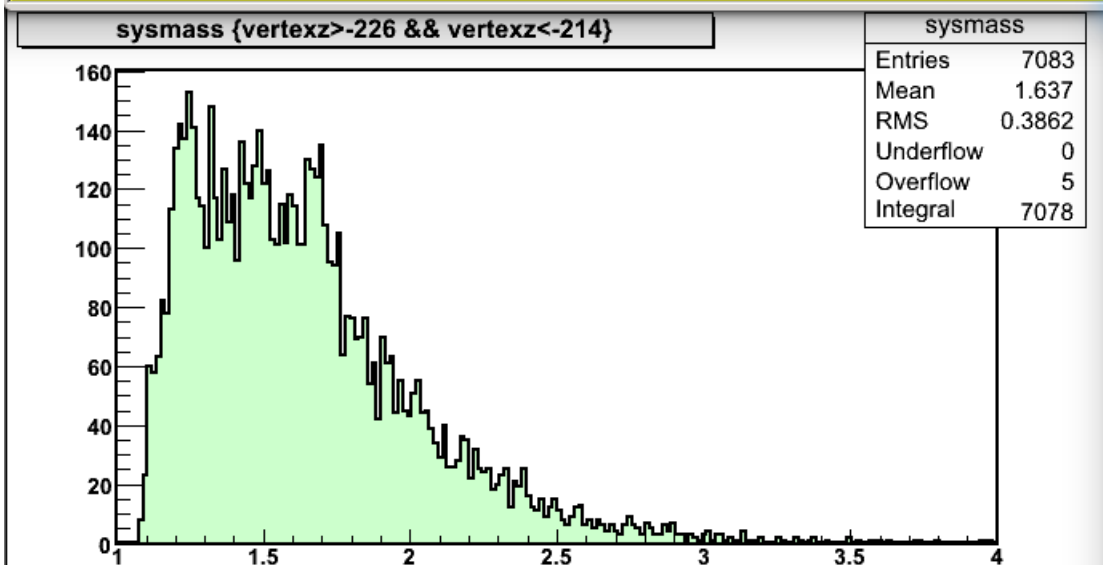
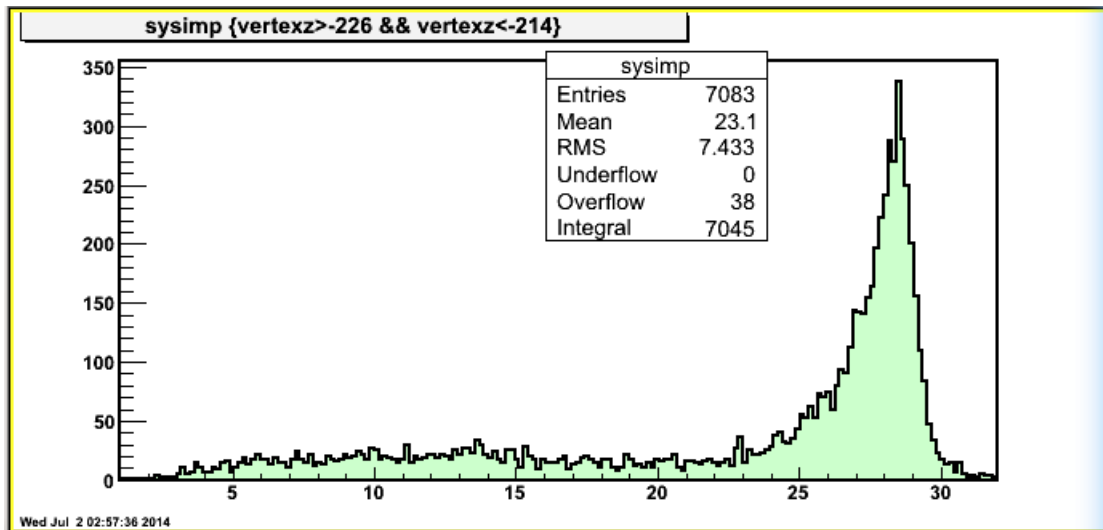
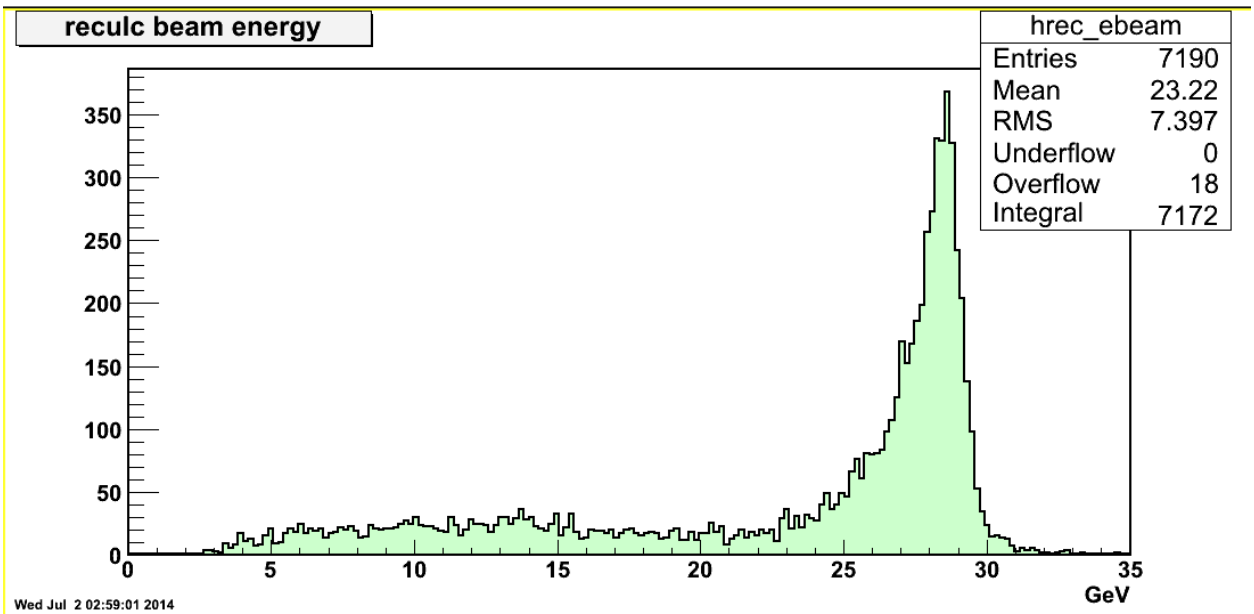


Рисунок 31. Пересчитанная энергия пучка, импульс системы, суммарная масса системы  
(сверху вниз)

Пик достаточно упругий (ри.31), однако, опять же, передаётся большое поперечный импульс, из-за чего возникает большое  $t$  (рисунок 32). Можно заметить, что тут очень хорошая вершина по оси  $z$ , обрезая по ней, мы теряем около 15% данных (1400). Также можно видеть хорошие резонансы массы, в частности на 1232 МэВ – известный резонанс  $\Delta P_{33}$  (1232) – для него  $l=1$  (P),  $I=3/2$  и  $J=3/2$ . Можно заметить также резонанс примерно на 1500 МэВ, предположительно  $N(1520) D_{13}$ . Также хорошо виден резонанс на 1500 МэВ. Возможен резонанс на 1950 МэВ.

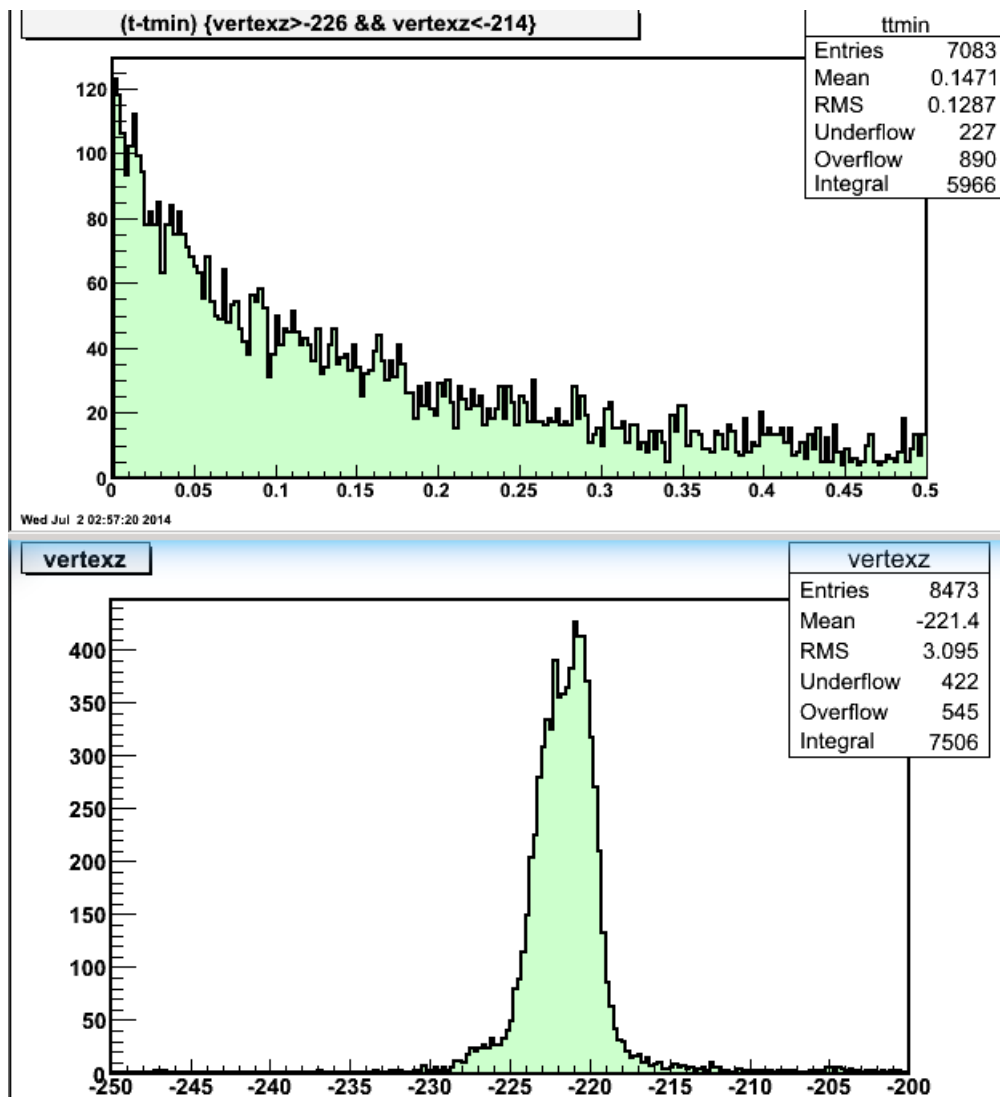


Рисунок 32.  $t-t_{min}$  и вершина по оси  $z$

### 3.8. Антипротон, $\pi^+$ и $2 \gamma$

При построении суммарной массы  $2 \gamma$  отчётливо видные резонансы на 0.139 и примерно 0.55 ГэВ, что соответствует  $\pi$  и  $\eta$ . При обрезании по пи-мезону видно, что

имеется довольно явный резонанс на 2000 и примерно на 2400, что может быть  $N$  или  $\Delta$ .  
 При обрезании по  $\eta$  видны резонансы на 2100 и 2400 (рисунок 35).

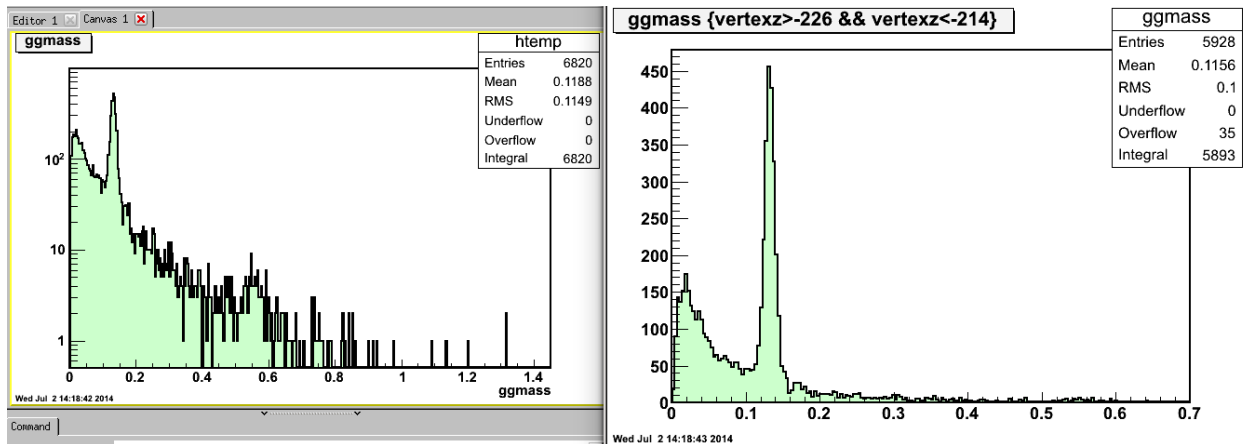


Рисунок 33. Масса  $2\gamma$

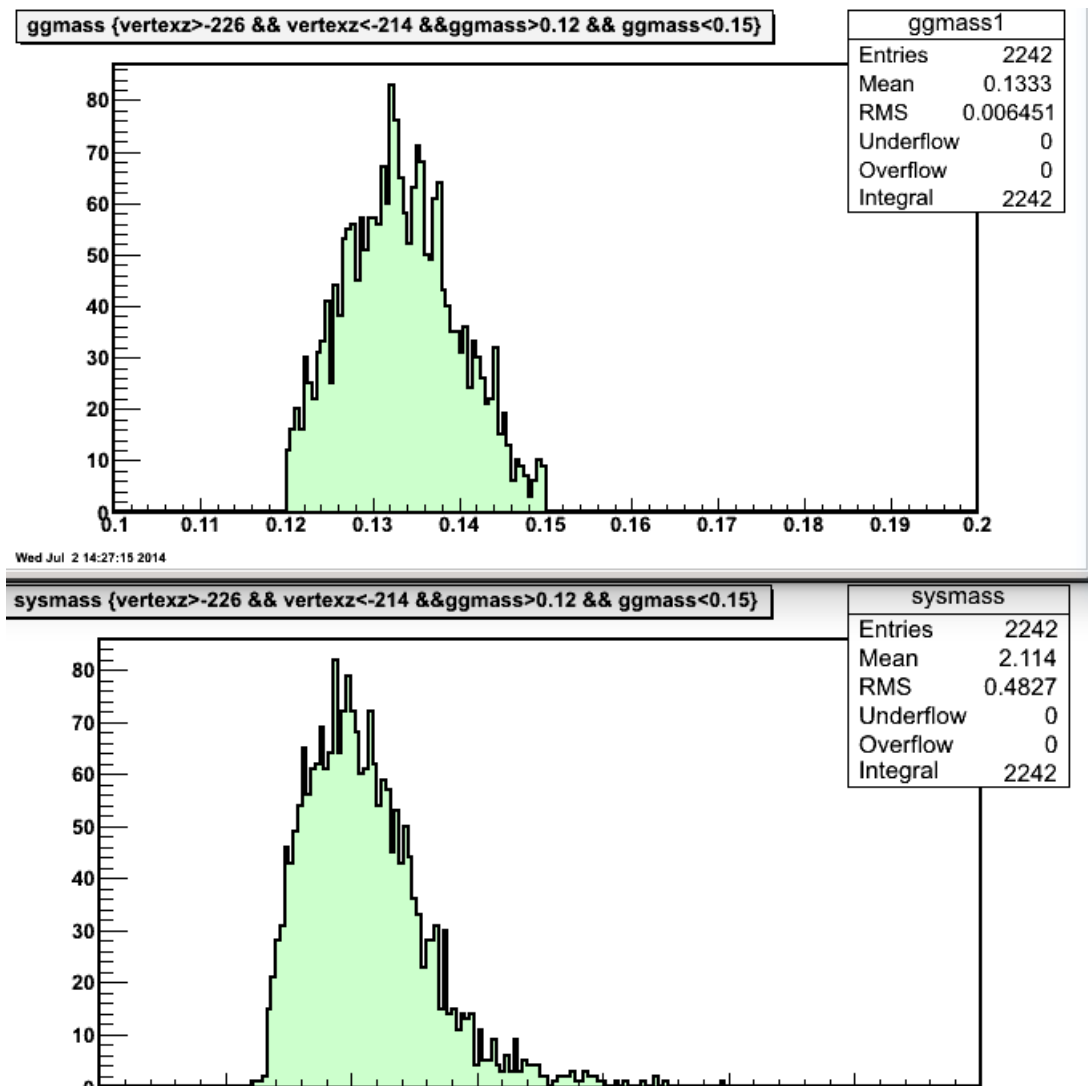


Рисунок 34. Суммарная масса  $2\gamma$  и масса системы после обрезания по пи-мезону  
 (суммарная масса системы от 0 до 7 ГэВ)

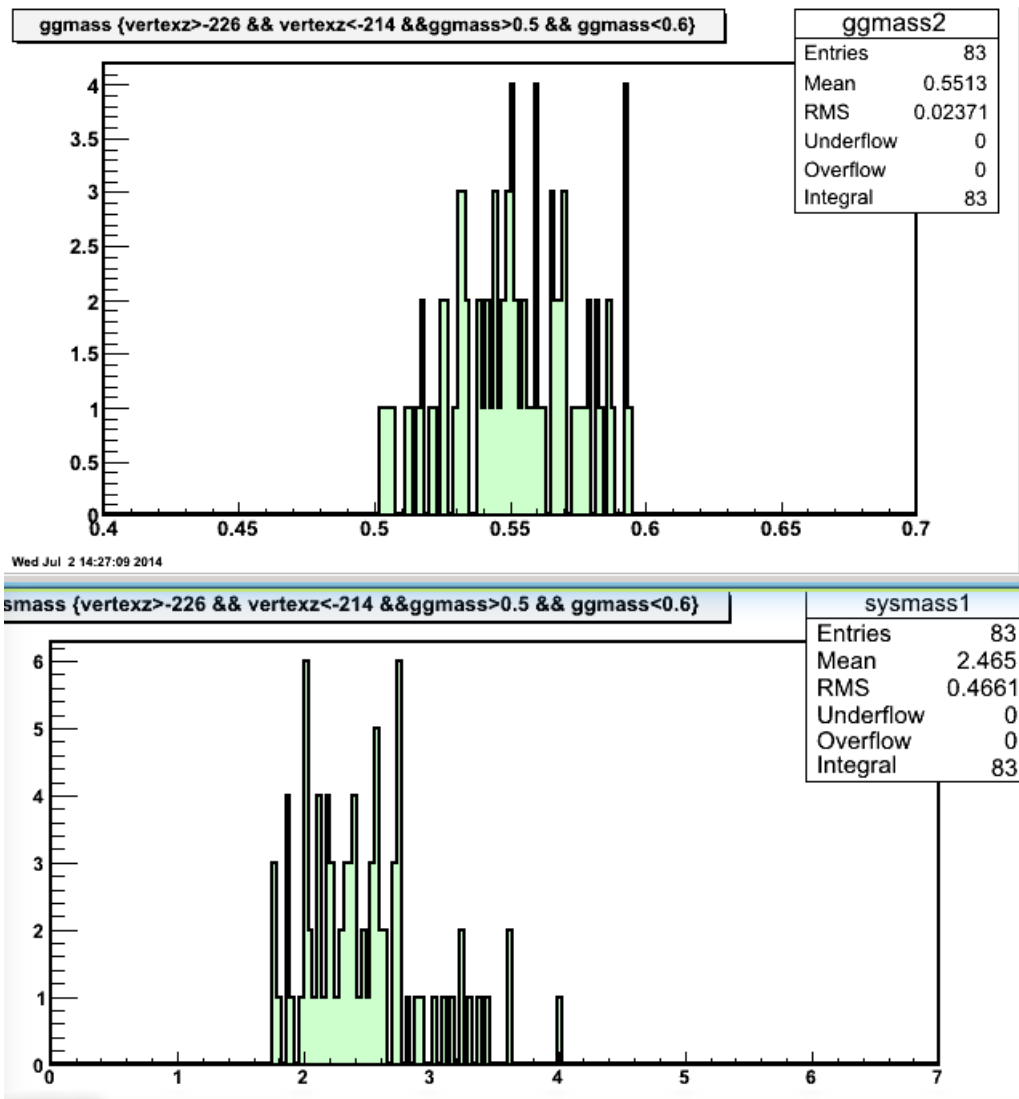


Рисунок 35. Суммарная масса 2  $\gamma$  и масса системы после обрезания по  $\eta$ -мезону

Видно, что по z обрезание отбирает примерно 12% данных.

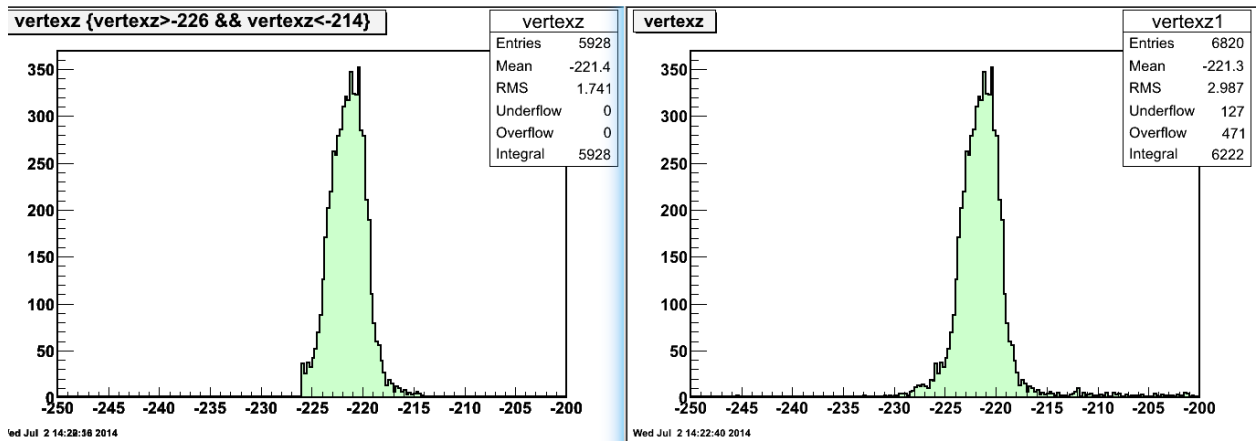


Рисунок 36. Вершина по z после и до обрезания

Для лучшего понимания системы были построены Далитц диаграммы, для этого строятся суммарные массы каждой 2 из 3 частиц, а затем строятся двумерные гистограммы. Распределение на них должно быть примерно одномерным, если все частицы независимы. Если же 2 частицы появились в результате распада какой-либо ещё, то виден резонанс.

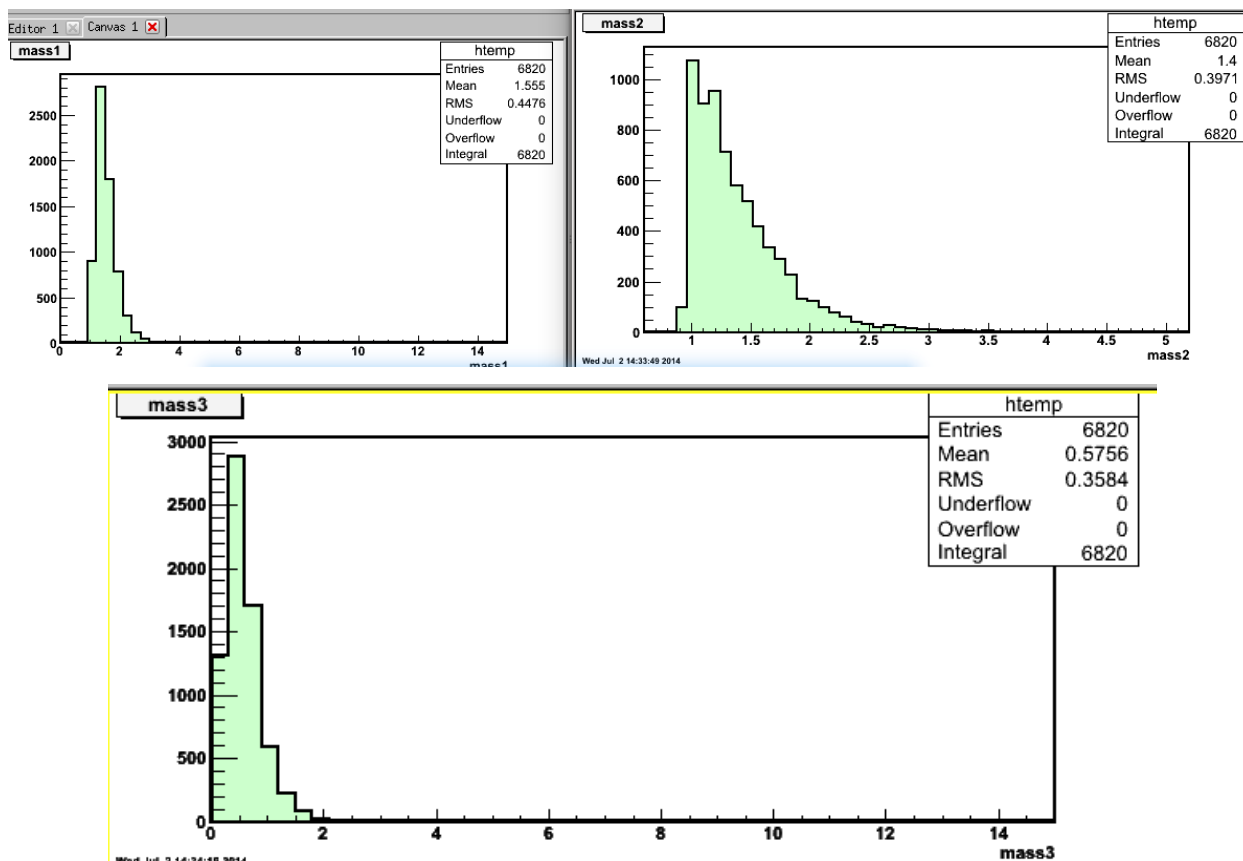


Рисунок 37. Суммарные массы систем, состоящих из 2 частиц (слева направо: антипротон-пион, антипротон-частица из 2  $\gamma$ , частица из 2  $\gamma$ -пион)

Из следующих ниже Далитц-плотов видно, что массы 1 и 2 коррелируют слабо, тогда как массы 1-3 и 2-3 коррелируют сильнее (видна повышенная плотность событий). То есть видно, что могут возникать как резонансы антипротон-пион (при масса примерно 1250 МэВ – возможно это  $\Delta P_{33}$  (1232)), так и антипротон-2  $\gamma$  (с массой 1050 МэВ). По диаграммам в данном случае сложно понять (возможен и резонанс пион-2  $\gamma$ ), ибо резонанс не слишком широкий.



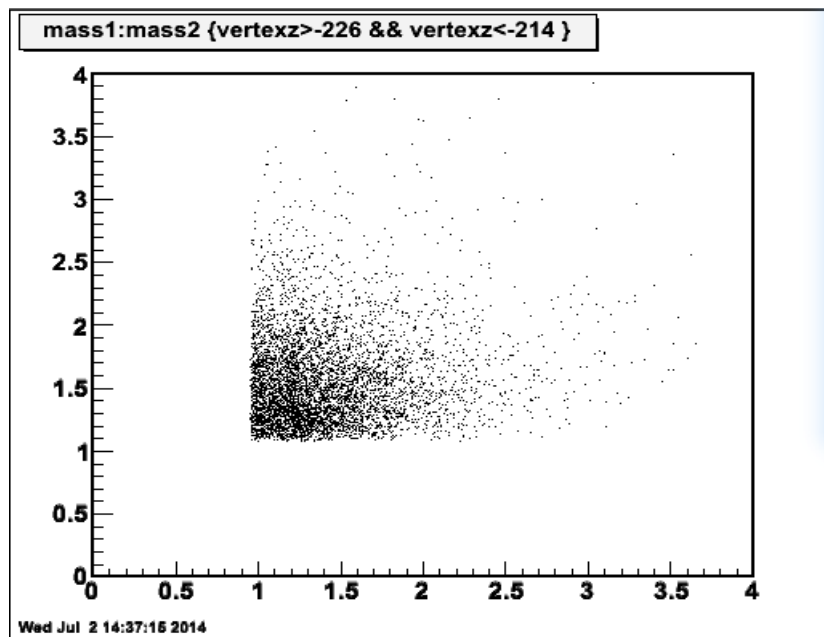


Рисунок 38. Далитц диаграмма (1 и 2 суммарная массы)

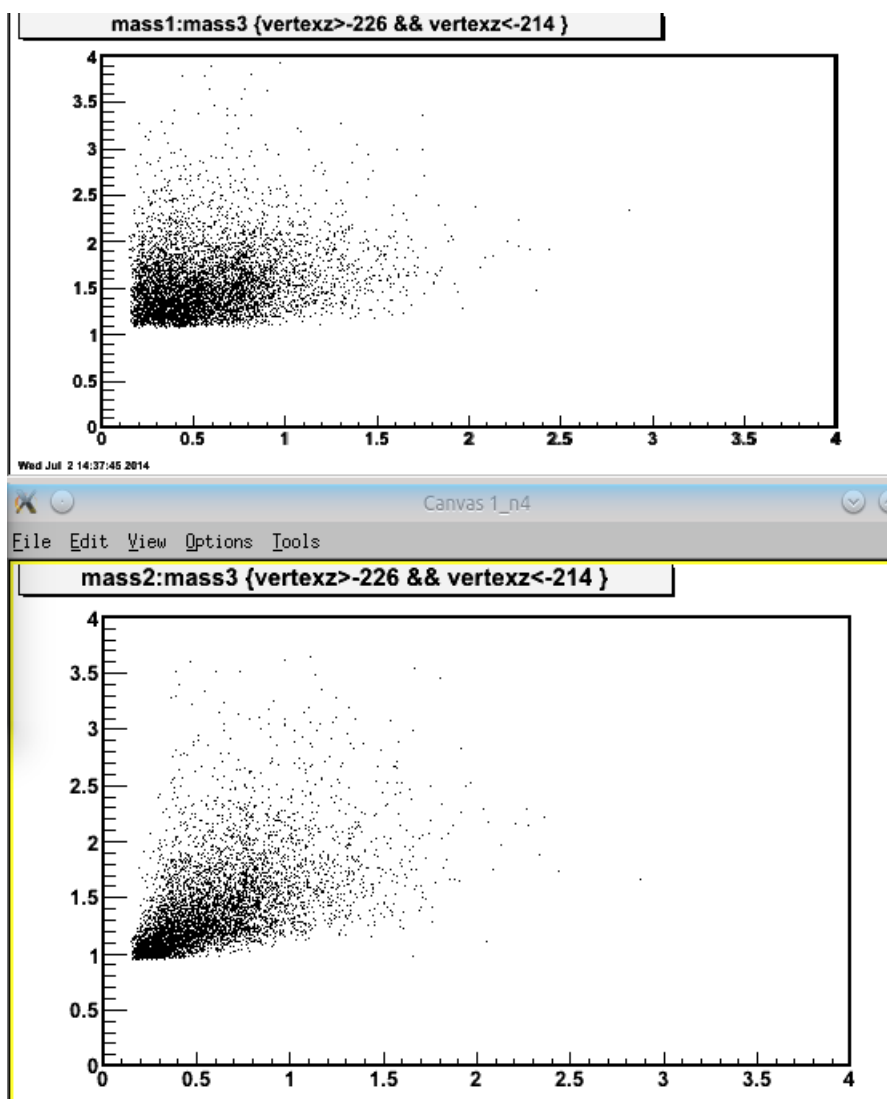


Рисунок 39. Далитц диаграммы (1 и 3, 2 и 3 суммарные массы)

### 3.9. Антипротон и $\pi^-$

Здесь участвуют 2 отрицательные частицы. Не имея возможности их различить, необходимо было учитывать 2 равновероятных подхода (добавлять импульс к массе антипротона, а потом к массе пиона). Из-за этого получается вдвое больше данных.

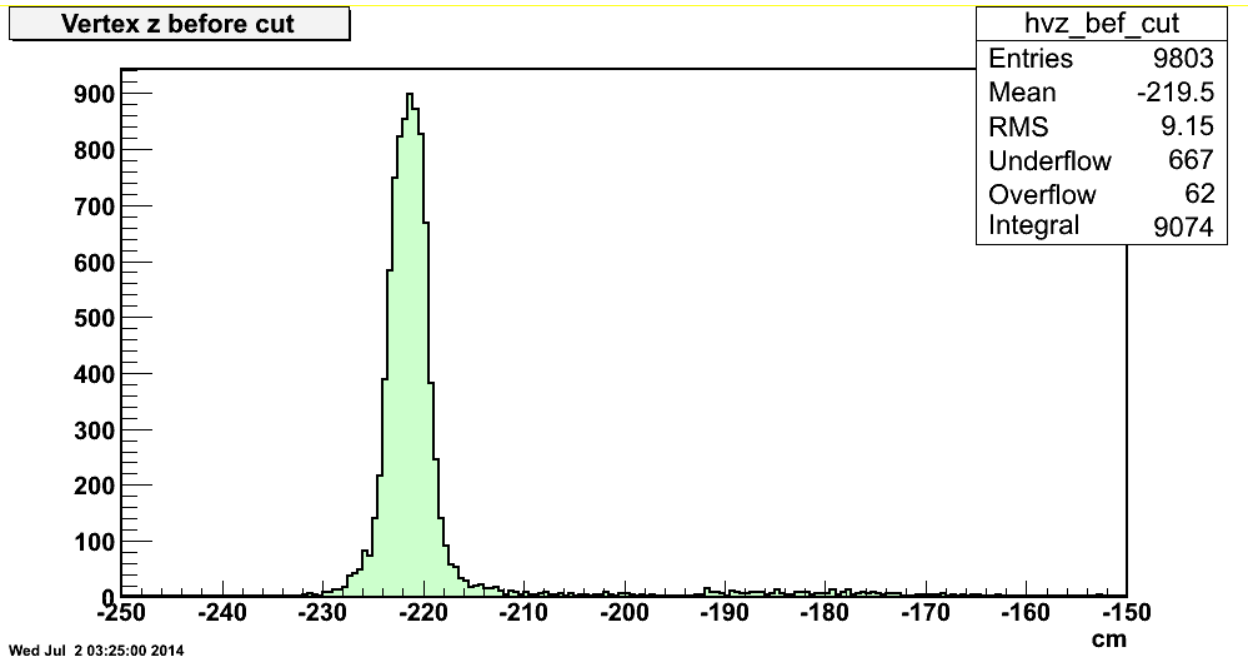


Рисунок 40. Вершина z до обрезания

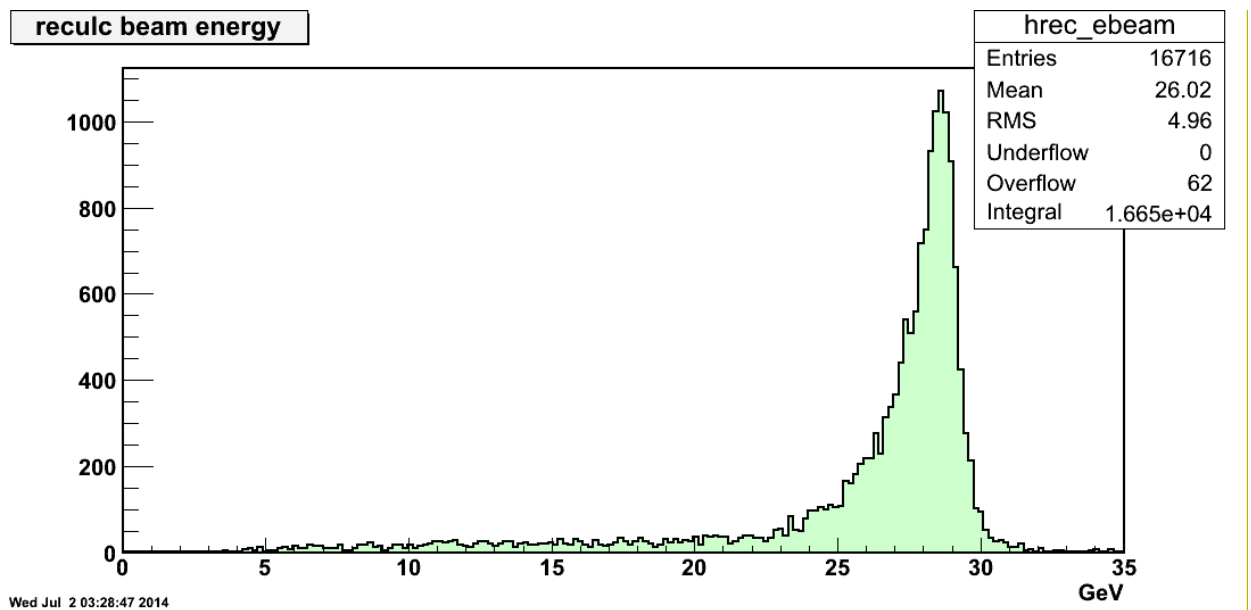


Рисунок 41. Пересчитанная энергия пучка

Легко видно, что достаточно малая подложка у вершины z, что позволяет на при обрезании отсеивать около 10% событий. Пересчитанный пучок достаточно хорош.

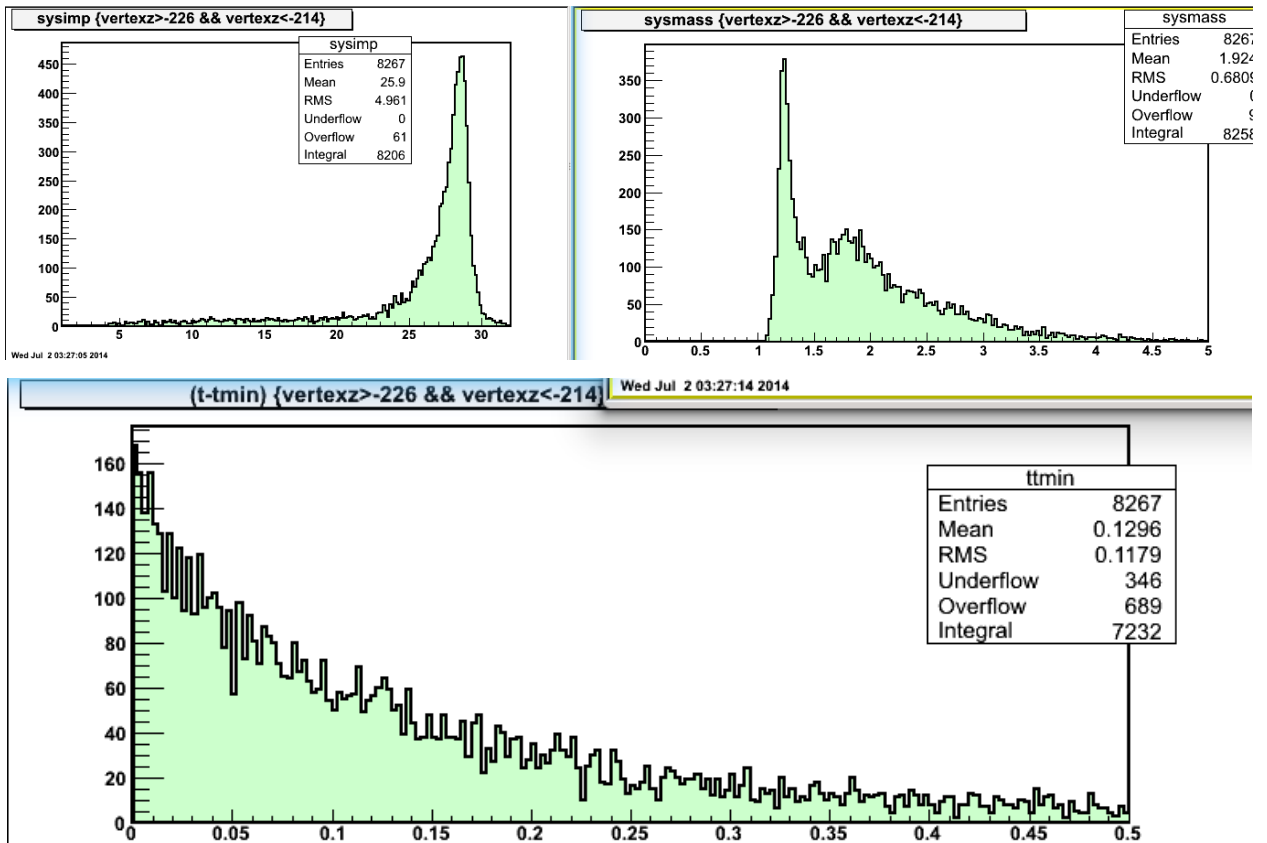


Рисунок 42. Импульс, суммарная масса системы и t-tmin

Как и в большинстве случаев, имеется довольно большая передача поперечного импульса, что не мешает иметься упругому пику на гистограмме импульса системы. Также, обращая внимание на суммарную массу, можно увидеть отличный пик на, предположительно, 1232 МэВ, то есть резонанс  $\Delta P_{33}$  (1232). Также имеется резонансный пик на 1700 МэВ (предположительно N).

### 3.10. Антипротон, $\pi^-$ и $2 \gamma$

Опять же, имеются 2 неразличимые отрицательные частицы, то есть обе гипотезы с ними (то что одна – антипротон или другая) приходится учитывать с равной вероятностью.

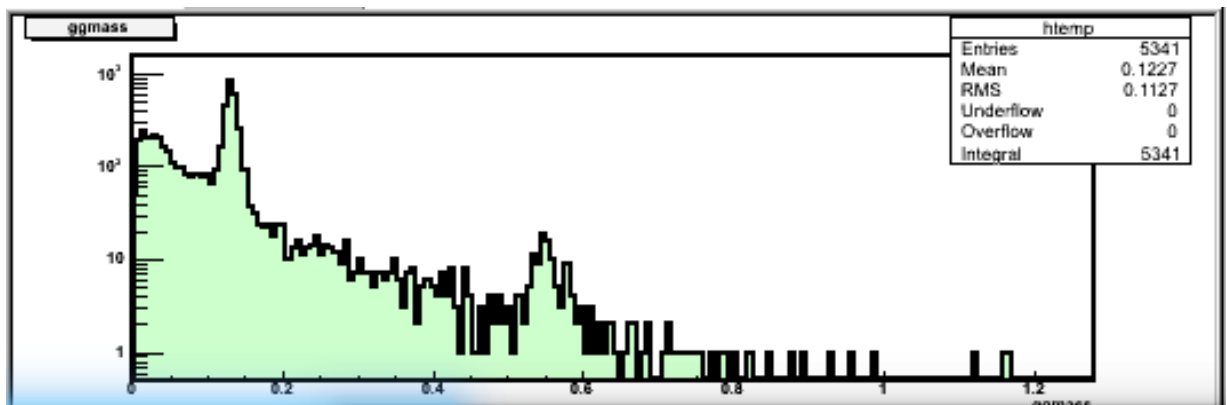


Рисунок 43. Суммарная масса системы  $2 \gamma$

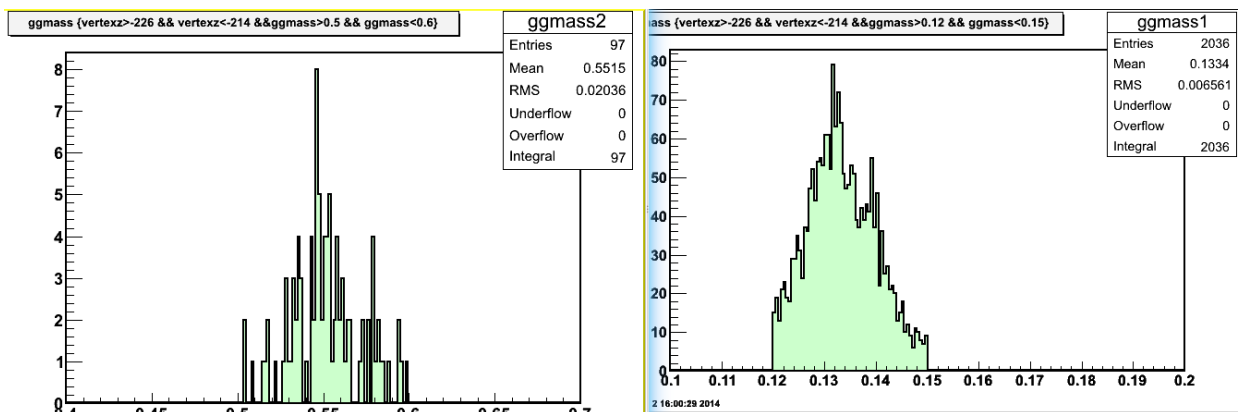


Рисунок 44. Суммарная масса системы 2  $\gamma$  с обрезанием по  $\eta$  или  $\pi$

Также тут имеется система из 2  $\gamma$ , которая демонстрирует резонансы на массах  $\pi$  и  $\eta$ . При обрезании видно, что импульсы имеют упругий пик (рисунок 46). В массах обнаруживаются резонансы. Примерно 1950 МэВ (предположительно  $\Delta$ ) при обрезании по  $\pi$ . Также видны на 2100 и 2400 МэВ. В случае обрезания по  $\eta$  – в 2000 и 2400 МэВ.

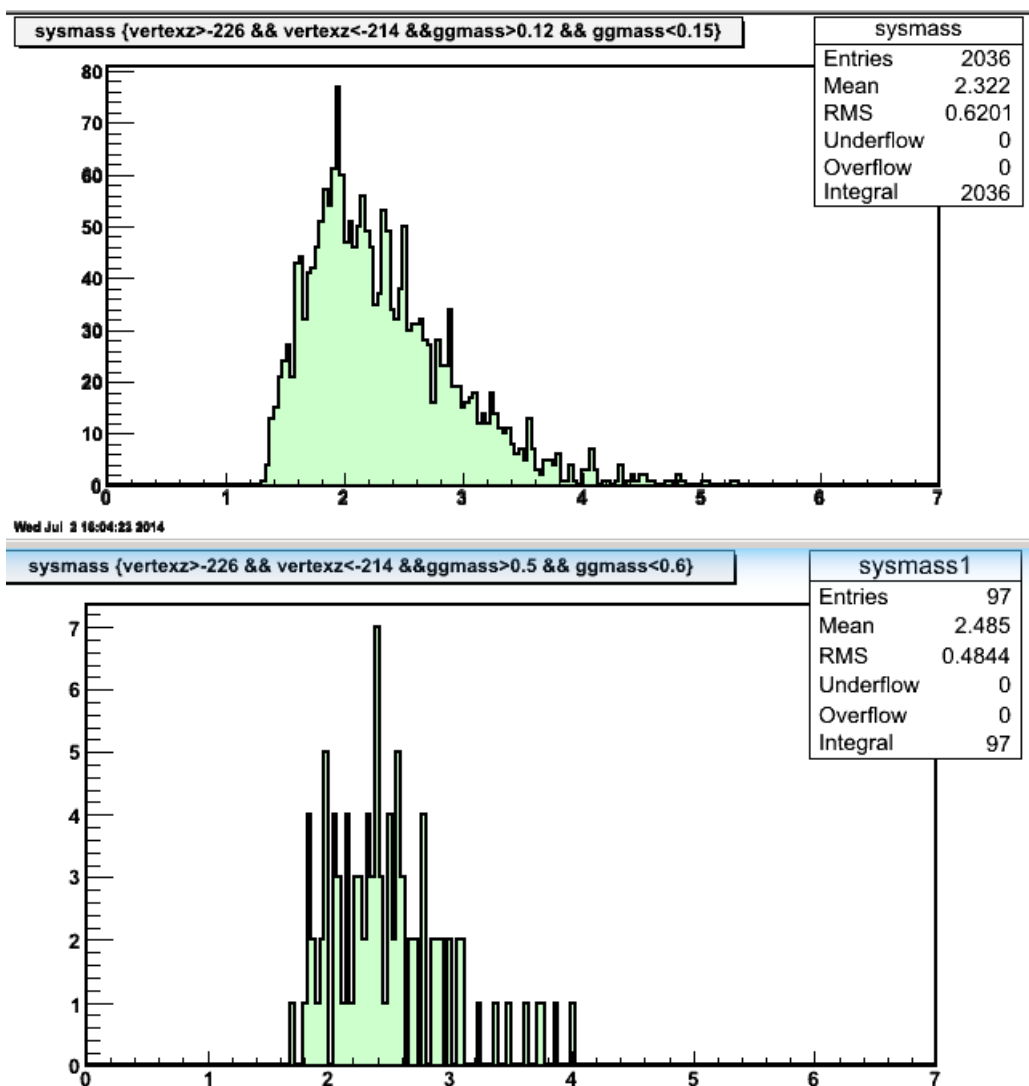


Рисунок 45. Суммарная масса всей системы при обрезании по  $\pi$  или  $\eta$

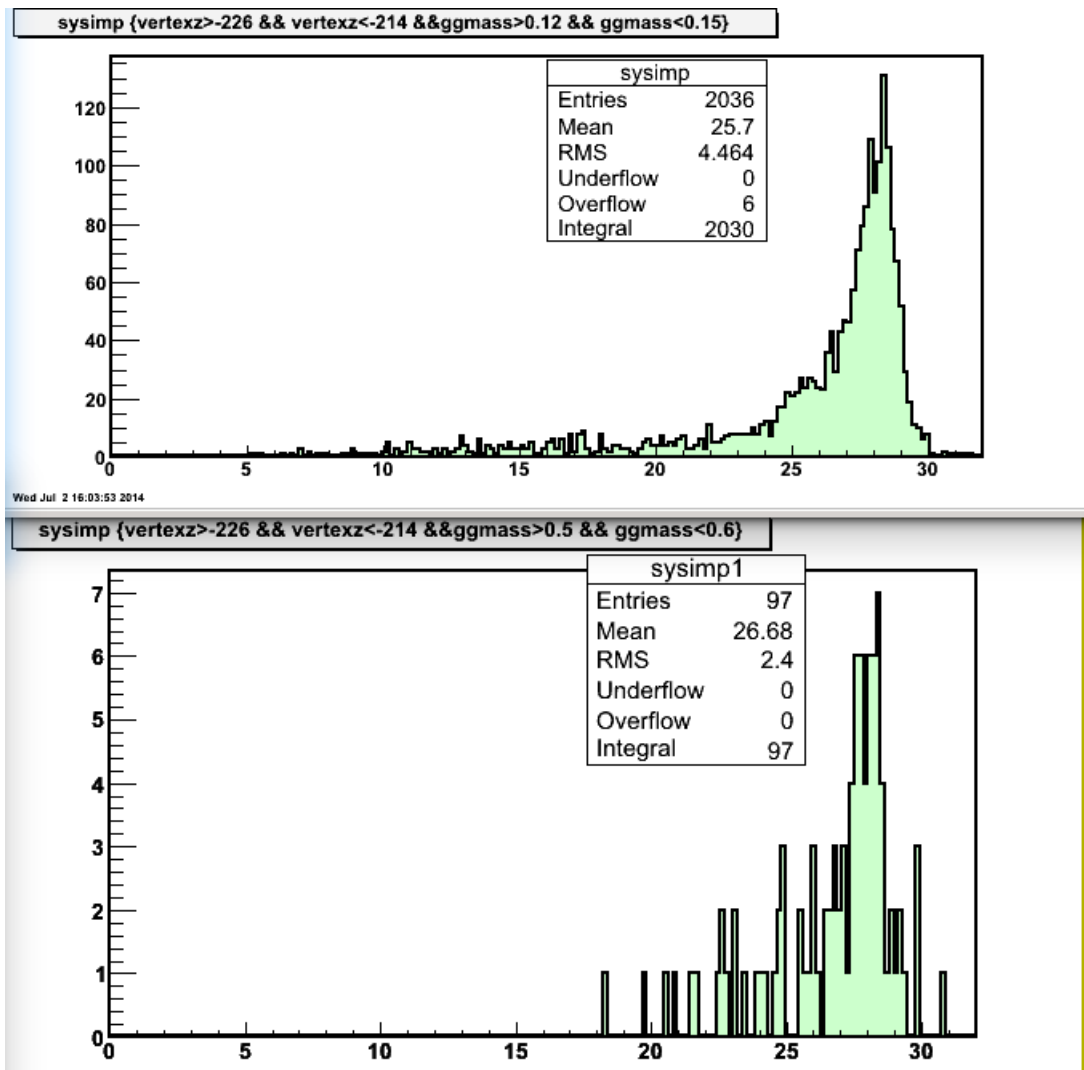


Рисунок 46. Импульс системы при обрезании по  $\pi$  или  $\eta$

Для того чтобы лучше понять, какие ещё резонансы есть в системе, построим диаграммы Далитца. Так как у нас 2 неразличимые частицы (отрицательные), то придётся строить 6 масс (по 3 для каждого случая), а затем 6 Далитц-плотов.

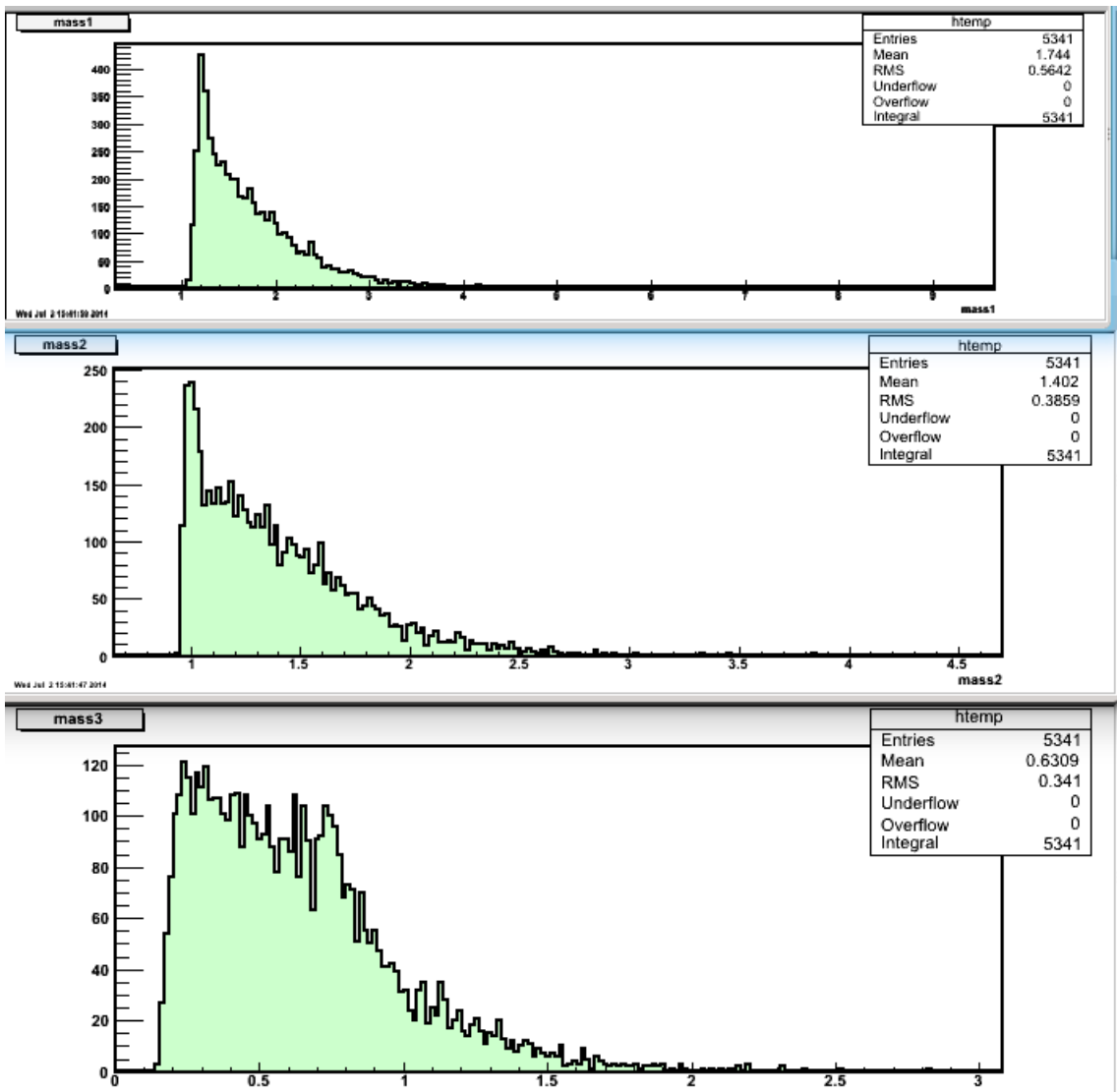


Рисунок 47. Суммарные массы подсистем в первом случае (антипротон-пион, антипротон- $2\gamma$ ,  $2\gamma$ -пион)

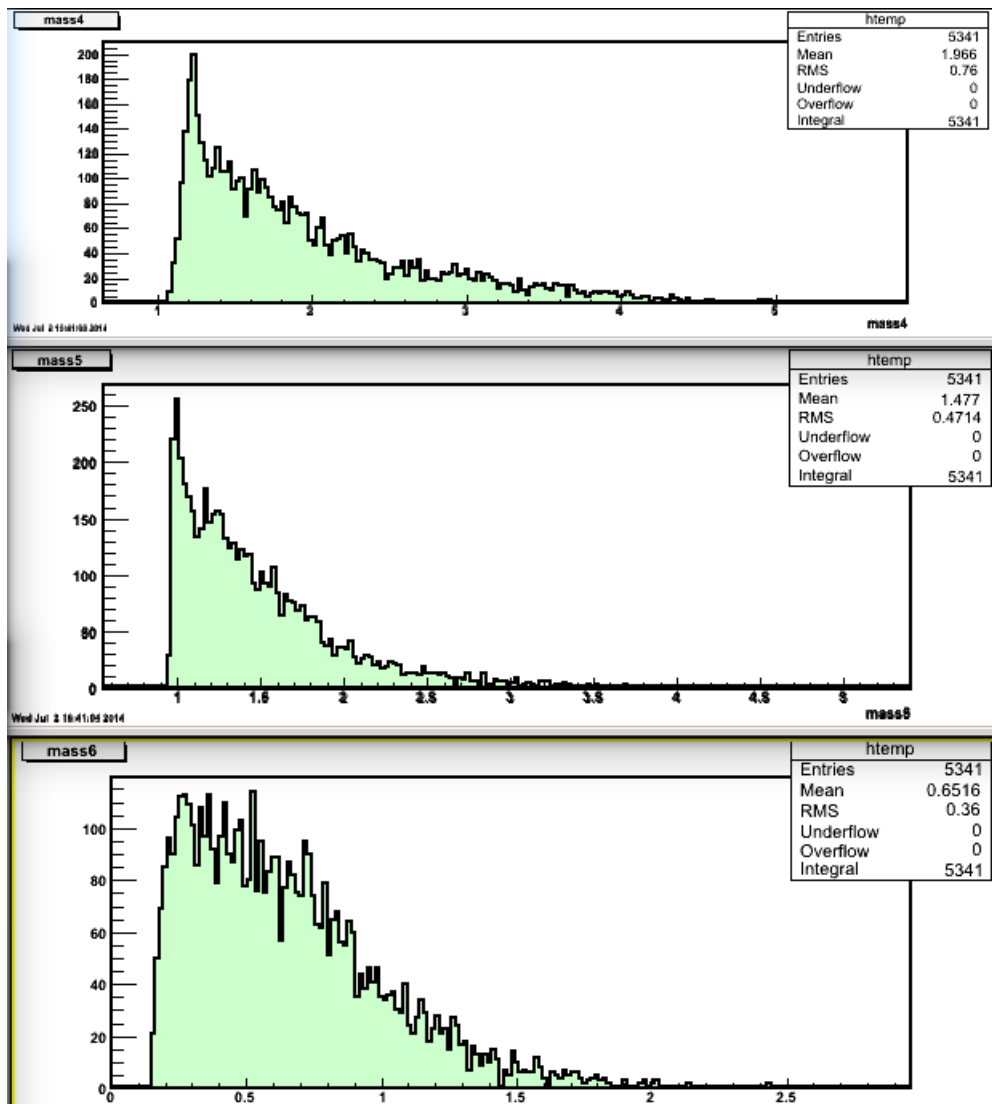
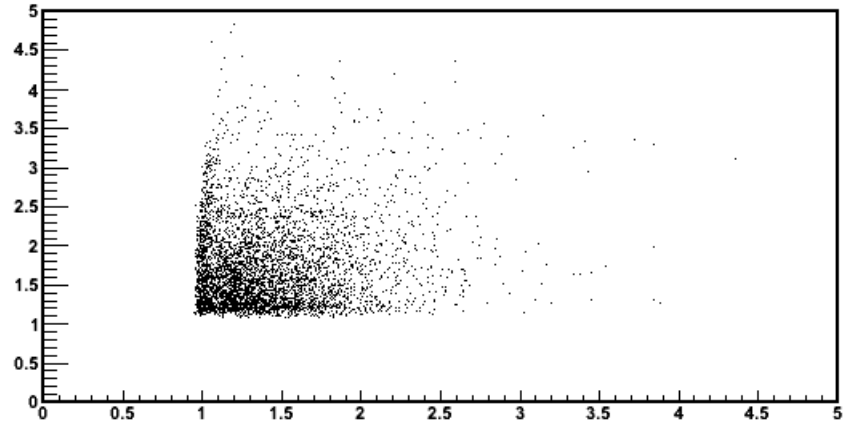


Рисунок 47. Суммарные массы подсистем во втором случае (антипротон-пион, антипротон-2  $\gamma$ , 2  $\gamma$ -пион)

Из Далитц-диаграмм можно увидеть, что в первом случае антипротон-пион мог появиться из-за распада некоей частицы (с массой 1250 МэВ, возможно  $\Delta P_{33}$  (1232)), а тогда пи-нуль сам по себе. Также возможно появление вследствие распада антипротон-2  $\gamma$  (с массой примерно 1050 МэВ), тогда как пион является отдельной частицей (рисунок 48).

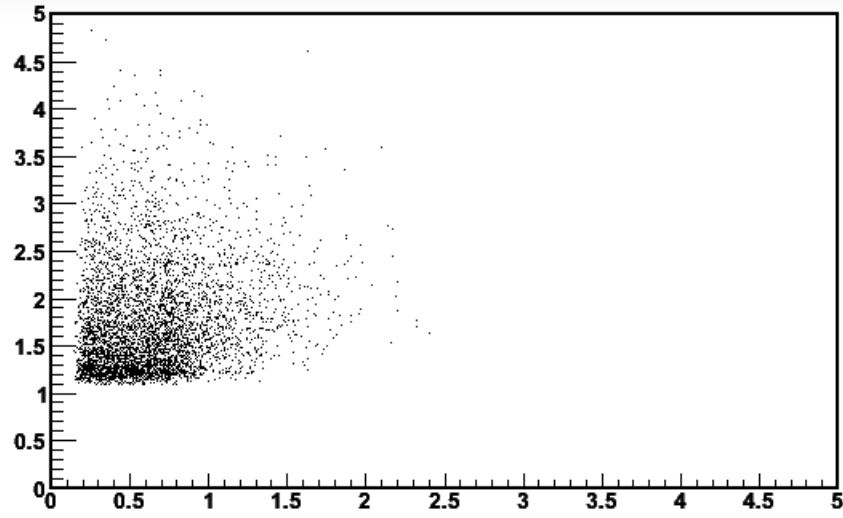
Во втором случае диаграммы более равномерные, но можно предположить, что имеется резонанс, из которого получились антипротон и 2  $\gamma$  (примерно 1 ГэВ), то есть пион является отдельной частицей (рисунок 49).

mass1:mass2 {vertexz>-226 && vertexz<-214 }



Wed Jul 2 15:45:19 2014

mass1:mass3 {vertexz>-226 && vertexz<-214 }



mass2:mass3 {vertexz>-226 && vertexz<-214 }

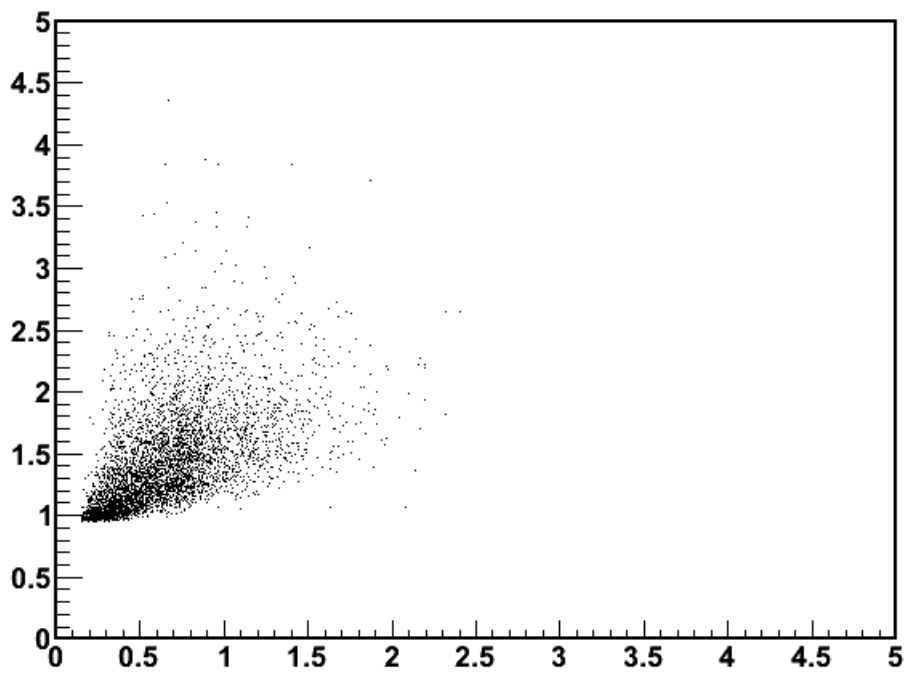


Рисунок 48. Диаграммы Далитца для первого случая



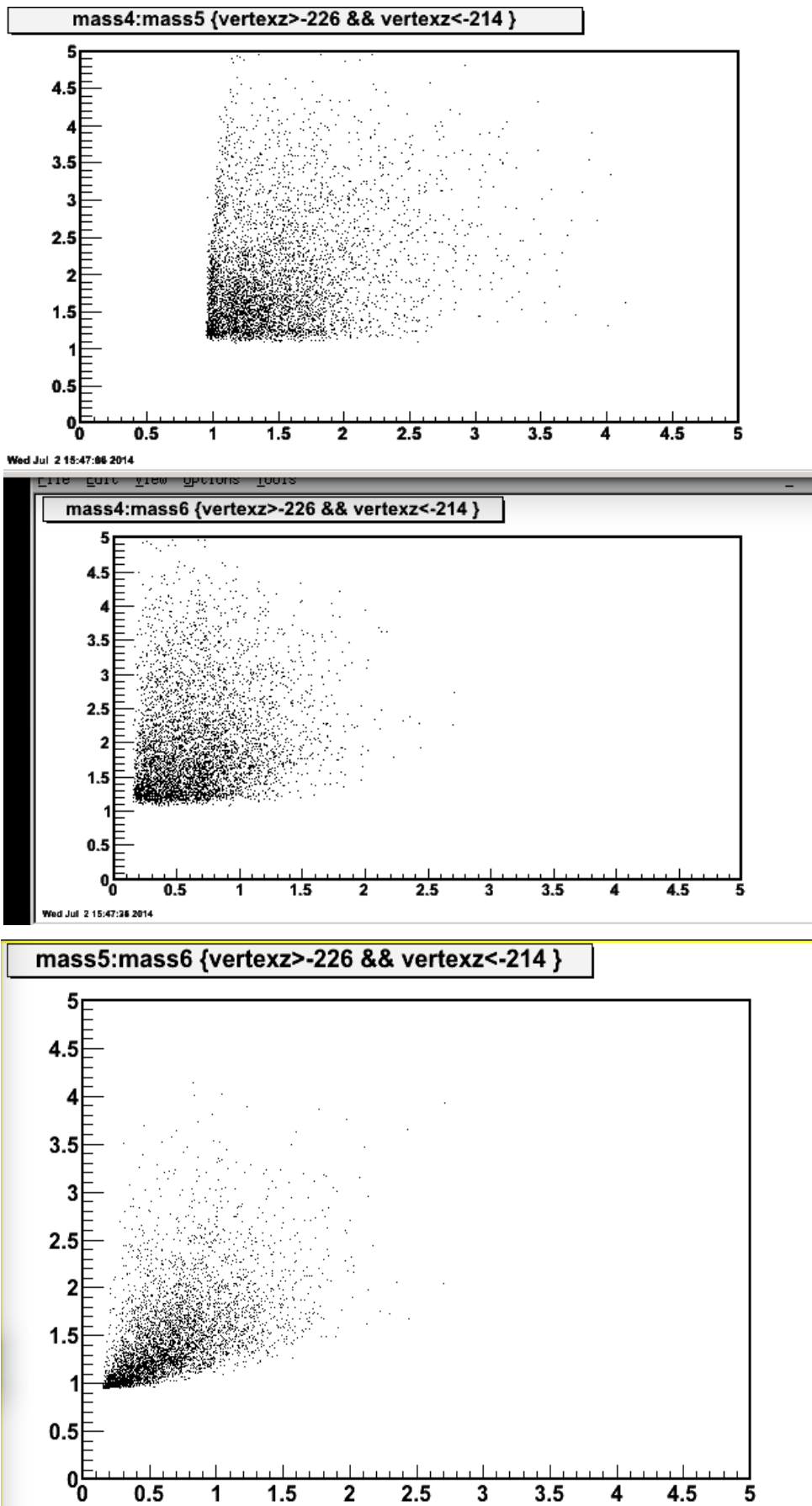


Рисунок 49. Диаграммы Далитца для второго случая

### 3.11. Положительная частица и 2 отрицательные

Также, как и в предыдущем случае, имеются 2 неразличимые отрицательные частицы. Рассмотрим эту систему подробнее. Можно видеть, что обрезание по вершине z (рисунок 51) не наносит серьёзного урона данным (теряется не более 7%). Также виден хороший упругий пик в гистограмме энергии системы.

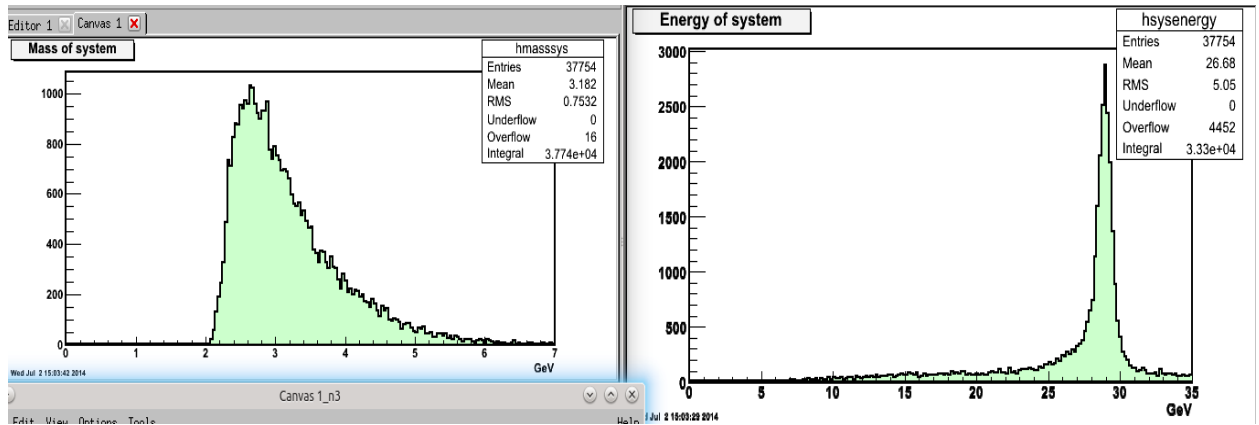


Рисунок 50. Суммарная масса и энергия системы

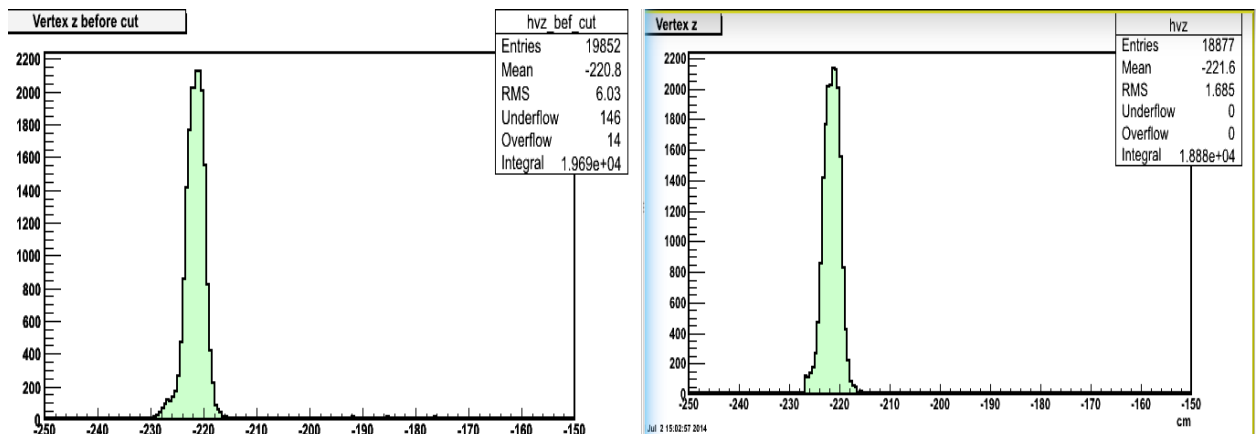


Рисунок 51. Вершина z до и после обрезания.

При рассмотрении суммарной массы системы виден пик примерно на 2700 МэВ, 2900 и 3050 МэВ.

Рассмотрим резонансы внимательнее с помощью Далитц-плотов для обоих случаев.

В первом случае отлично виден широкий резонанс для подсистемы антипротон- $\pi^+$  (на массе примерно 1200-1400 МэВ – предположительно  $\Delta P_{33}$  (1232) или  $N P_{11}$  (1440)) – длинная линия (рисунок 53).

Во втором случае аналогичная ситуация, только резонанс для подсистемы из двух пионов на массе примерно 1400 МэВ (рисунок 54).

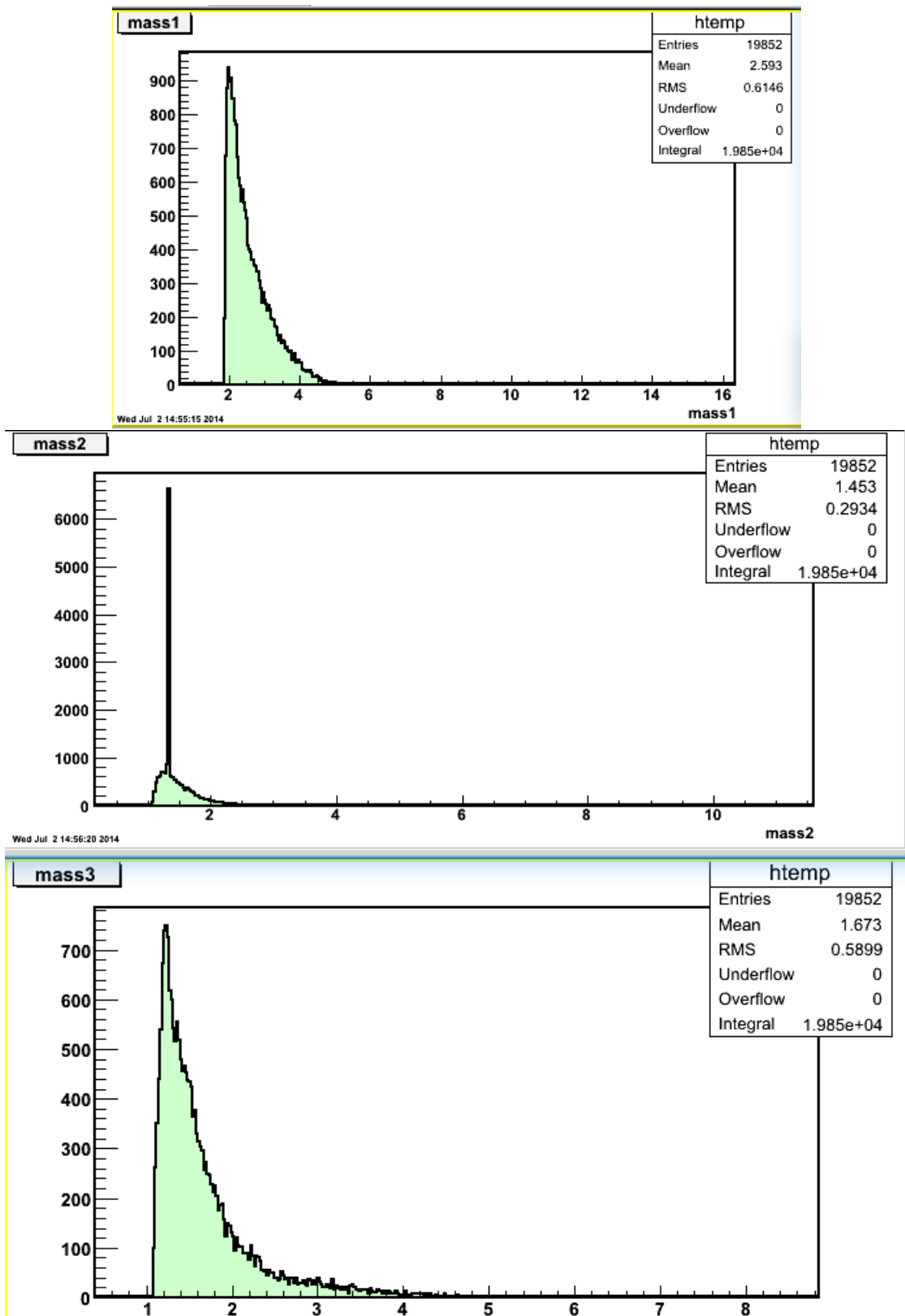


Рисунок 52. Суммарные массы подсистем для 1 случая (2 отрицательные, антипротон- $\pi^+$ ,  $\pi^+-\pi^-$ )

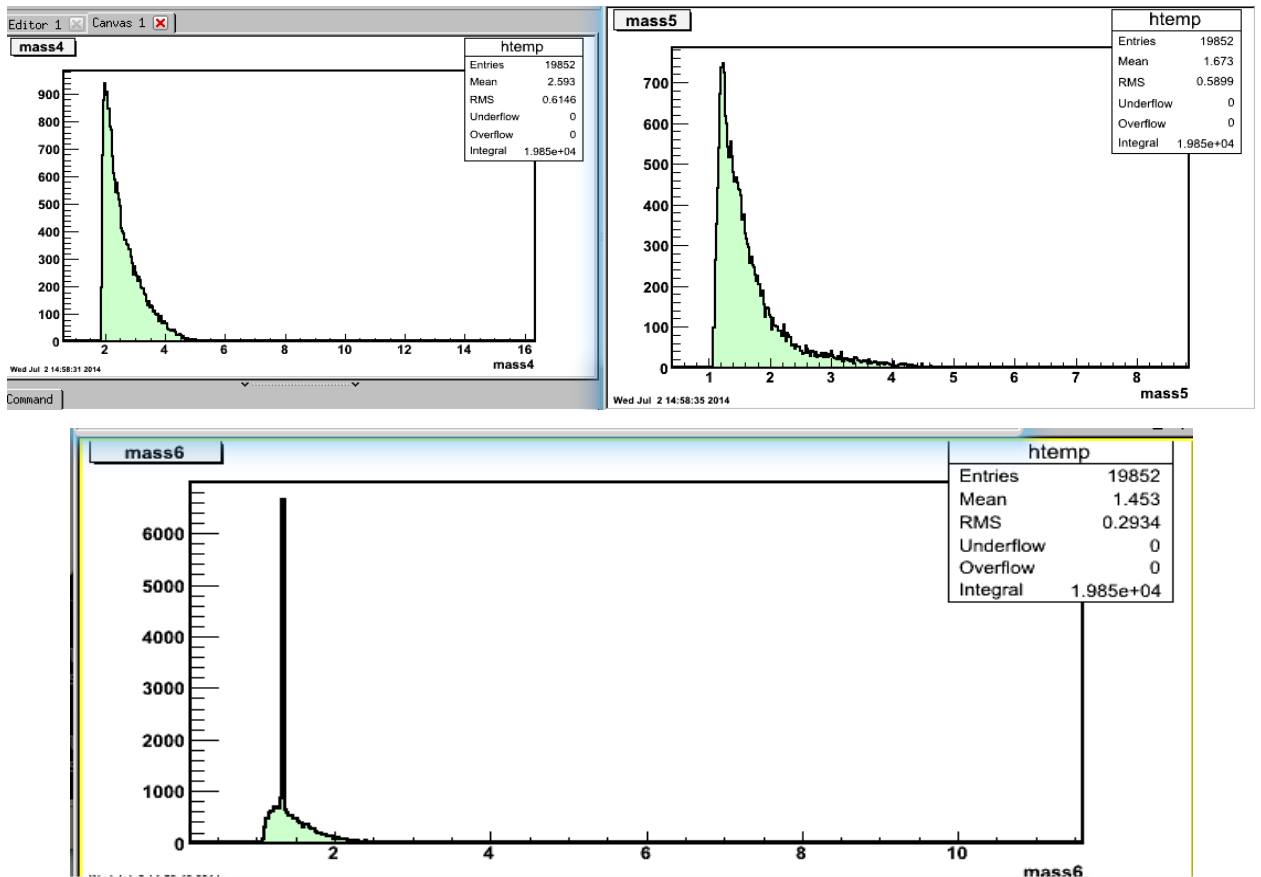


Рисунок 52. Суммарные массы подсистем для 2 случая (2 отрицательные, антипротон- $\pi^+$ ,  $\pi^+-\pi^-$ )

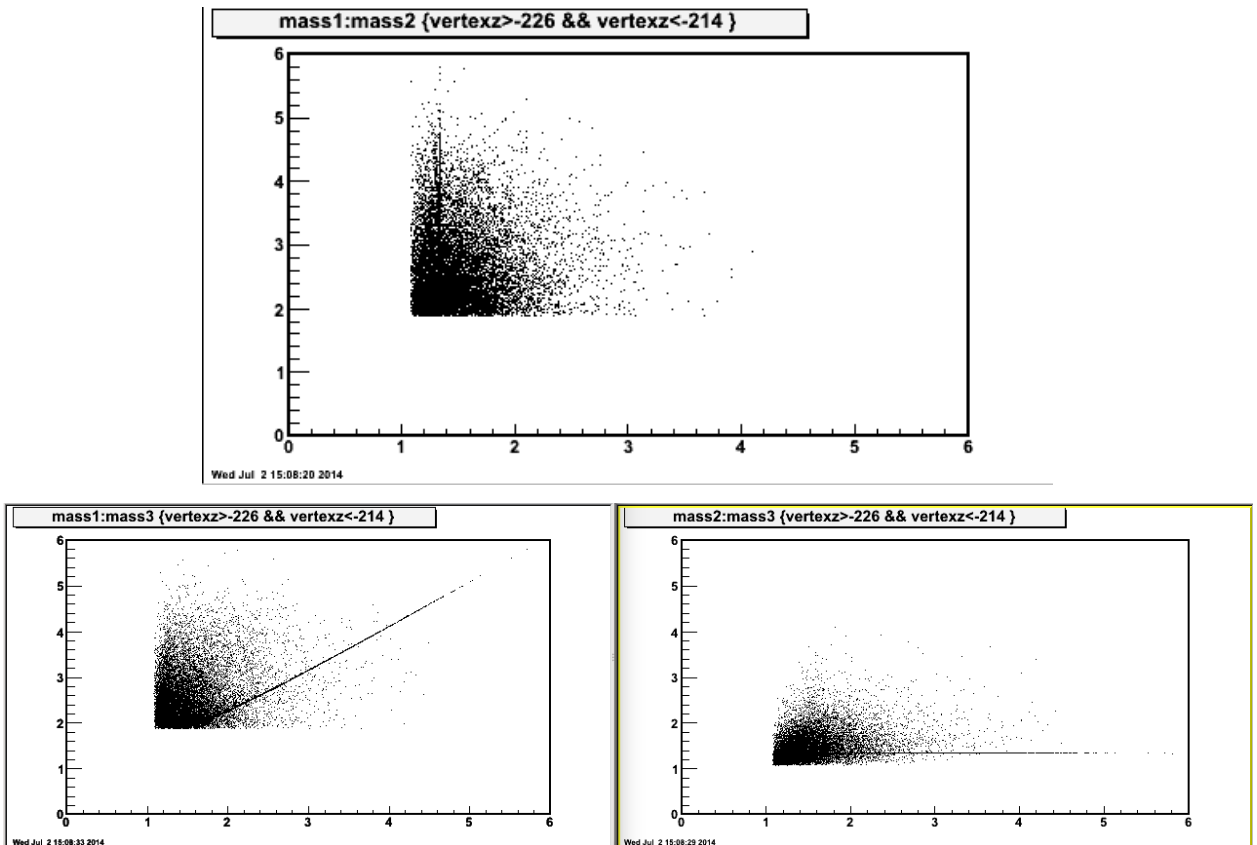


Рисунок 53. Диаграммы Далитца для 1 случая

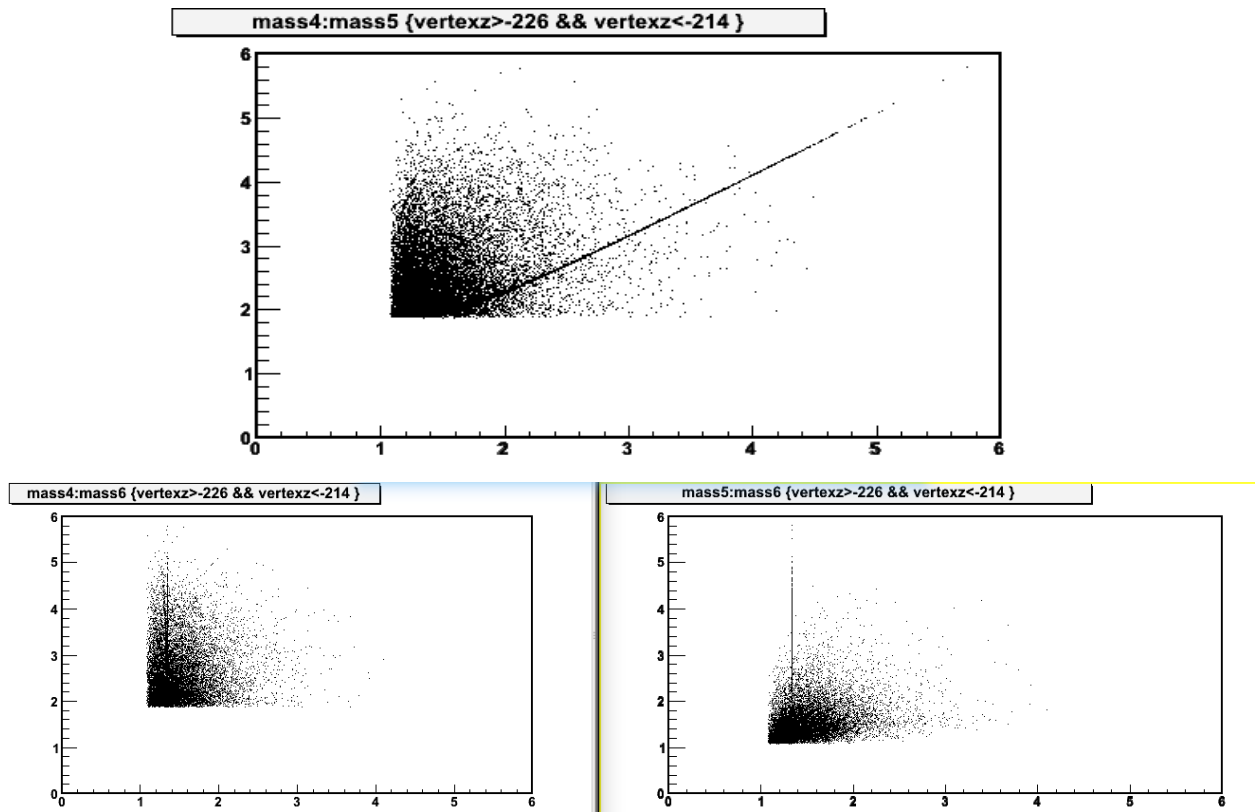


Рисунок 54. Диаграммы Далитца для 2 случая

### 3.12. Положительная частица, 2 отрицательные и 1 $\gamma$

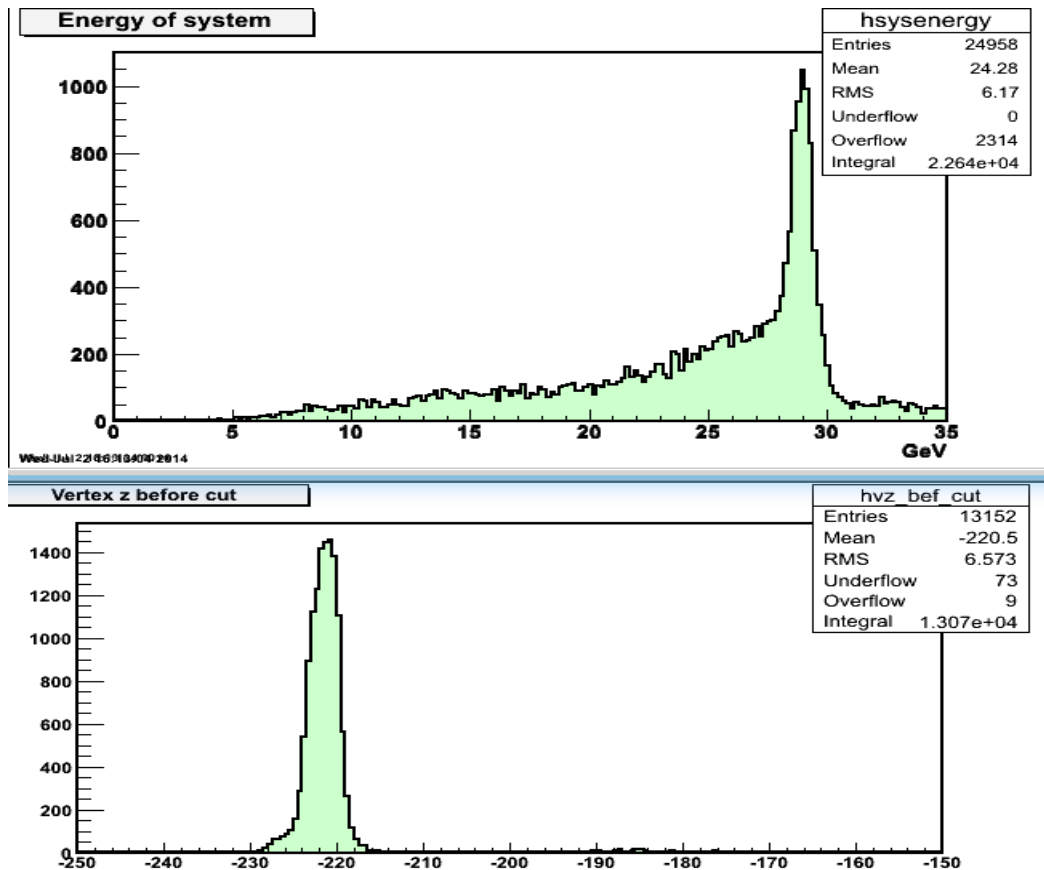


Рисунок 55. Энергия системы и вершина z до обрезания

В этой системе ситуация аналогична предыдущей. Только добавляется  $\gamma$ -квант. Видно, что энергетический пик системы теперь не такой упругий, но обрезание по вершине убирает не более 5% реакций.

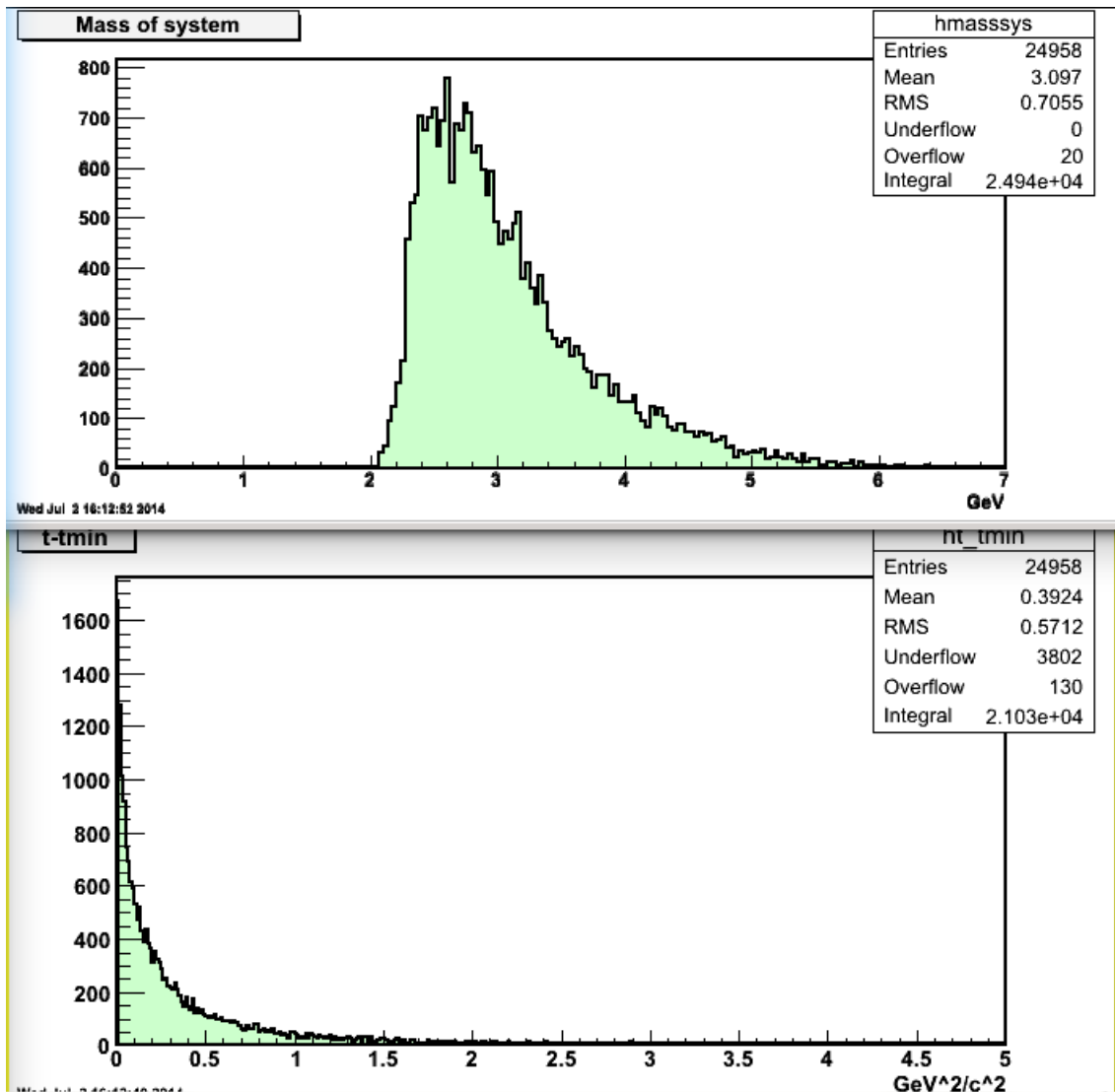


Рисунок 56. Суммарная масса и t-tmin

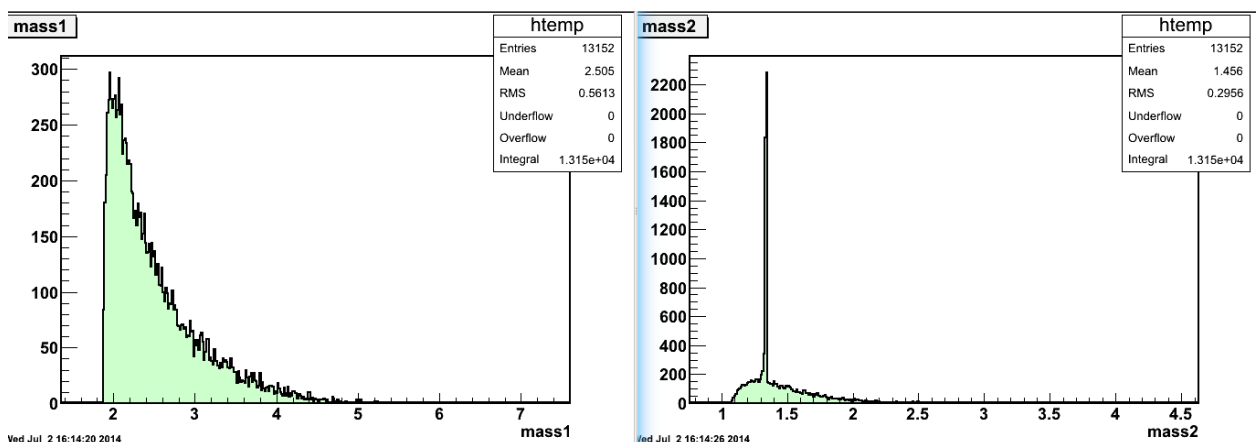


Рисунок 57. Суммарная масса подсистем в 1 случае (антипротон-отрицательный пион, антипротон-положительный пион)

Можно заметить, что передача поперечного импульса велика, чем и может описываться не упругость пика энергии на рисунке 55.

Для лучшего понимания того, какие резонансы имеются в системе, вновь построим Далитц-плоты для обоих случаев. Г-квант в Далитц-плотах не учитываем.

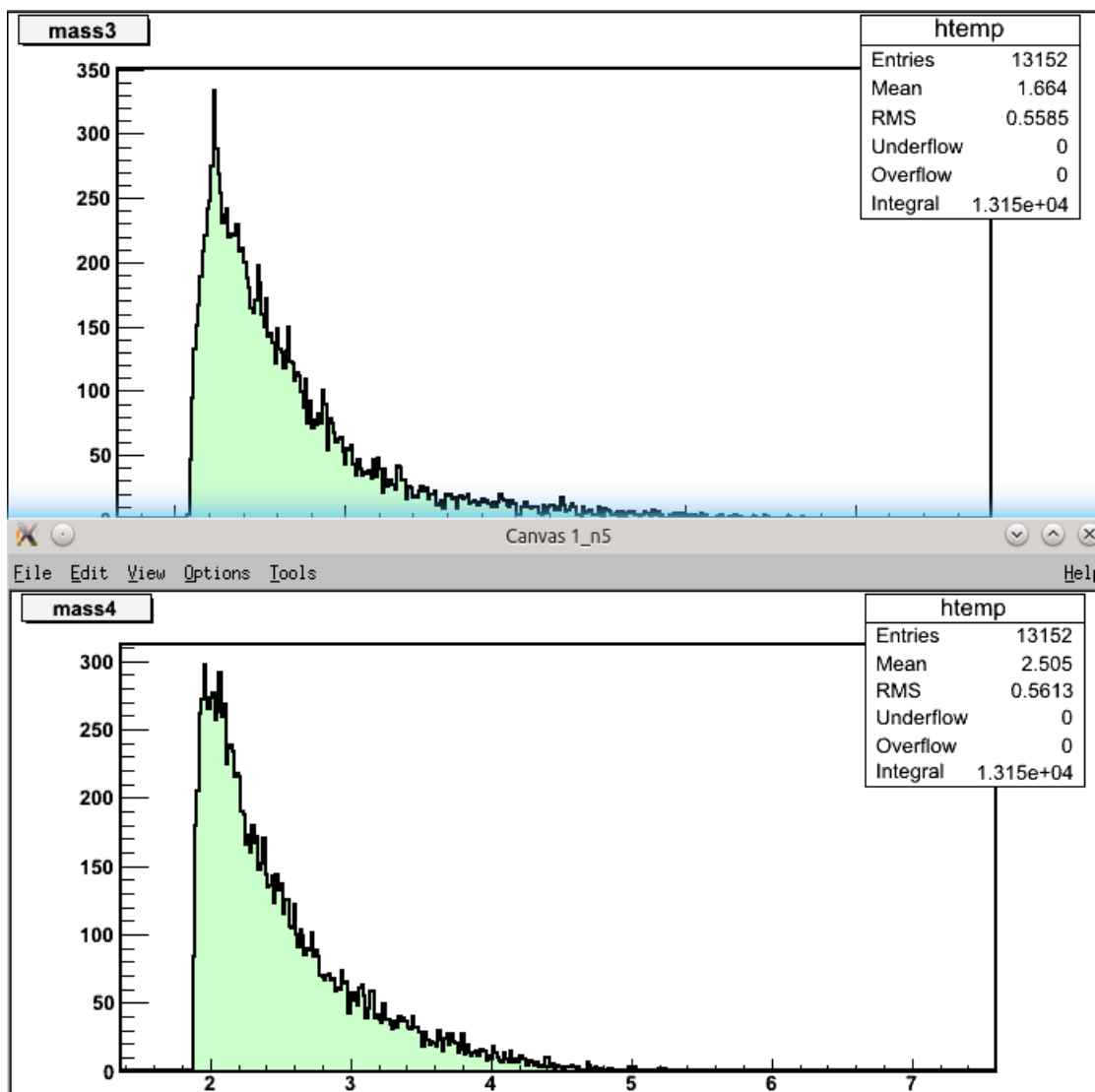


Рисунок 58. Суммарная масса подсистем (2 пиона – 1 случай, антипротон-отрицательный пион – 2 случая)

Для первого случая отчётливо виден резонанс – линия, - для подсистемы – антипротон – положительный пион. Масса около 1400 МэВ. Предположительно N (1440) P<sub>11</sub>.

Для второго случая аналогично виден резонанс в случае подсистемы из 2 пионов. Также массой около 1400 МэВ.

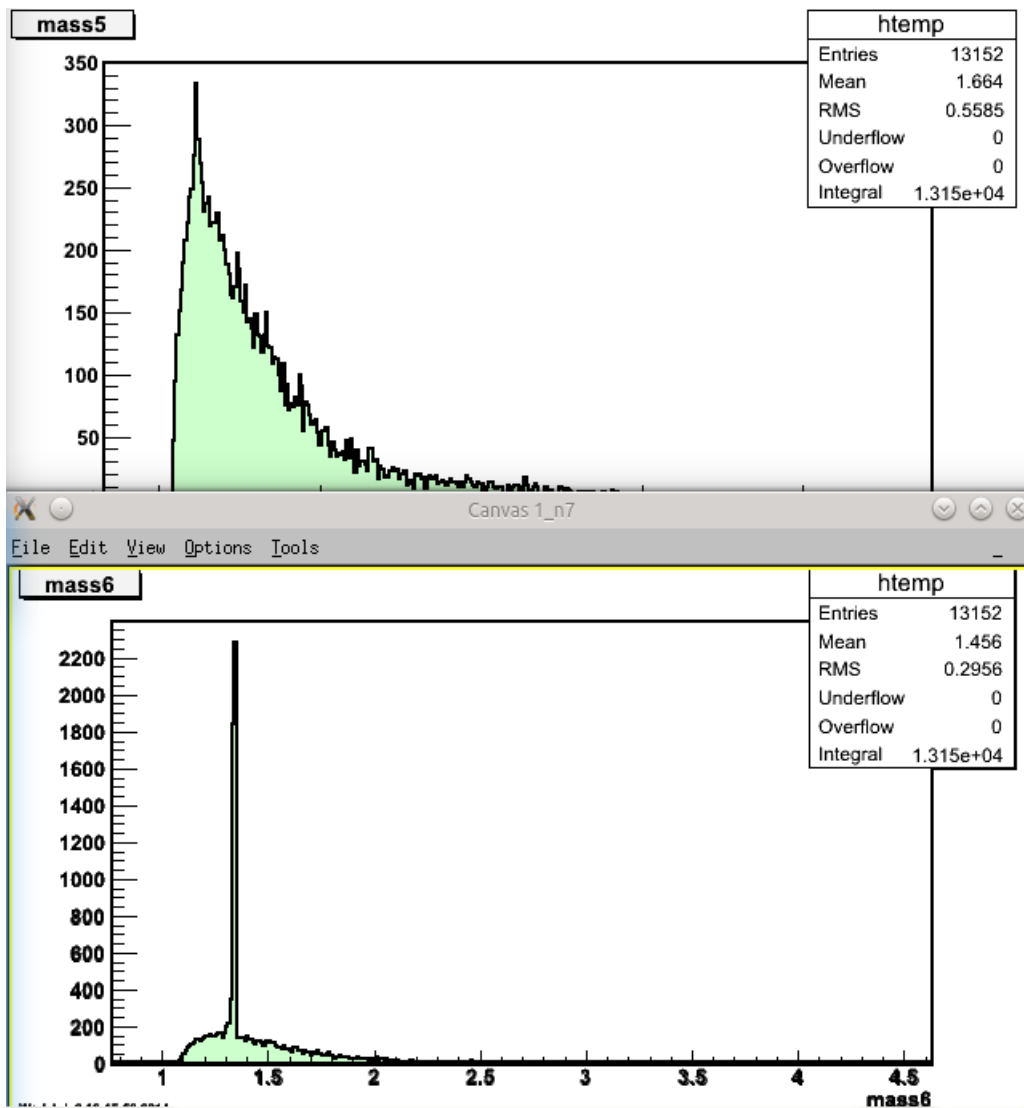


Рисунок 59. Суммарная масса подсистем – 2 случай (антипротон-положительный пион, 2 пиона)

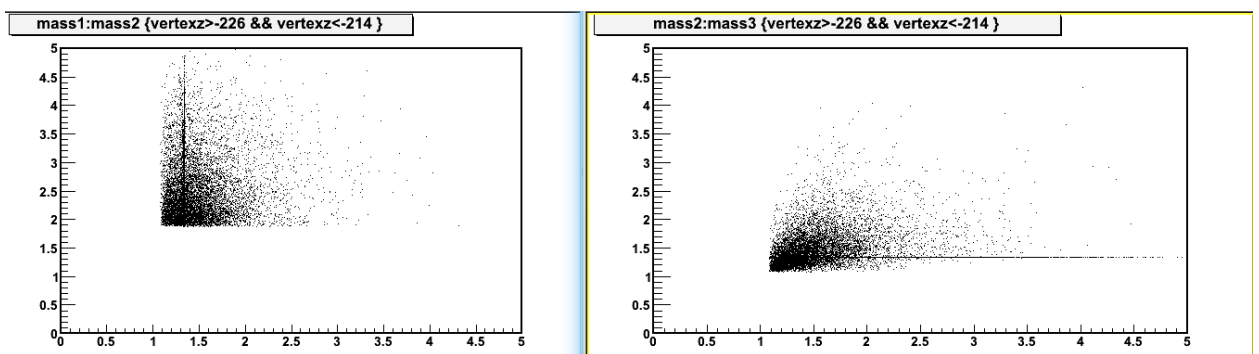


Рисунок 60. Далитц-плоты для 1 случая (1-2 и 2-3 подсистемы)



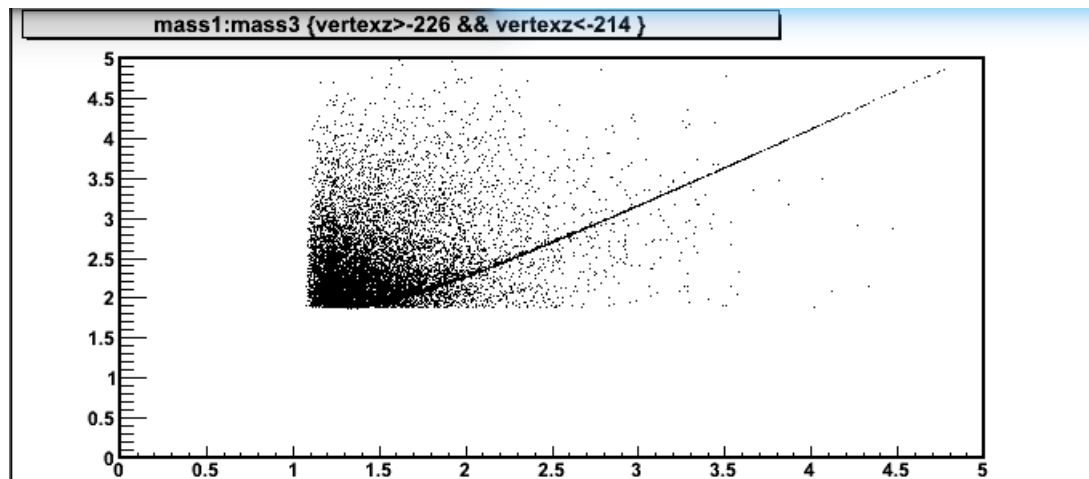


Рисунок 61. Далитц-плоты для 1 случая (1-3 подсистемы)

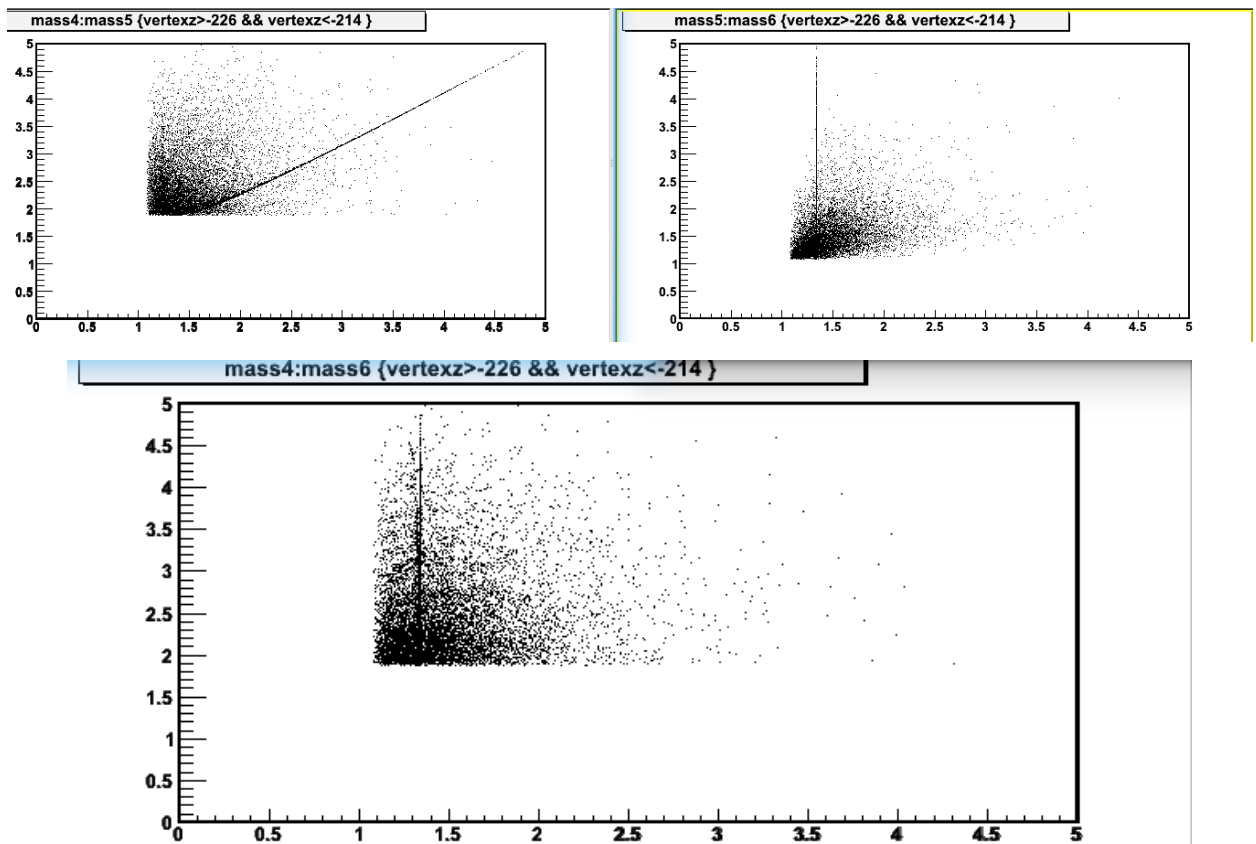


Рисунок 62. Далитц-плоты для 2 случая

### 3.13. Положительная частица, 2 отрицательные и 2 $\gamma$

При обрезании по  $z$  теряется всего около 2% данных. Тут также приходится учитывать обе возможности относительно отрицательных частиц (либо антипротон имеет этот четырёхимпульс, либо отрицательный пион).

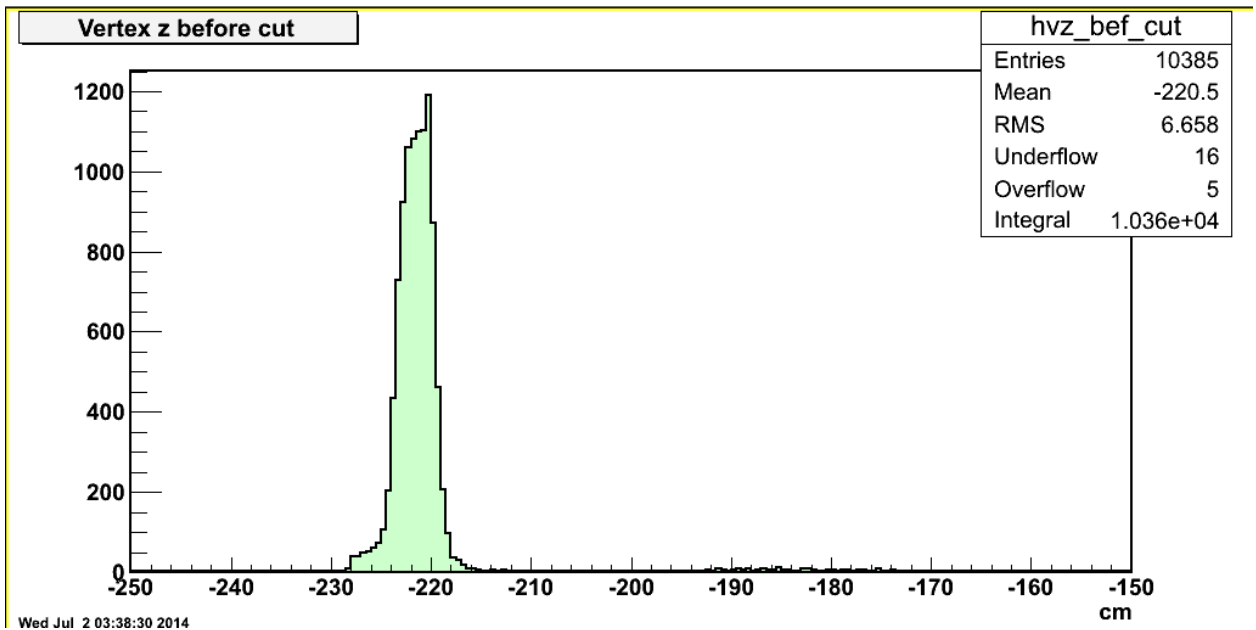


Рисунок 63. Вершина z до обрезания

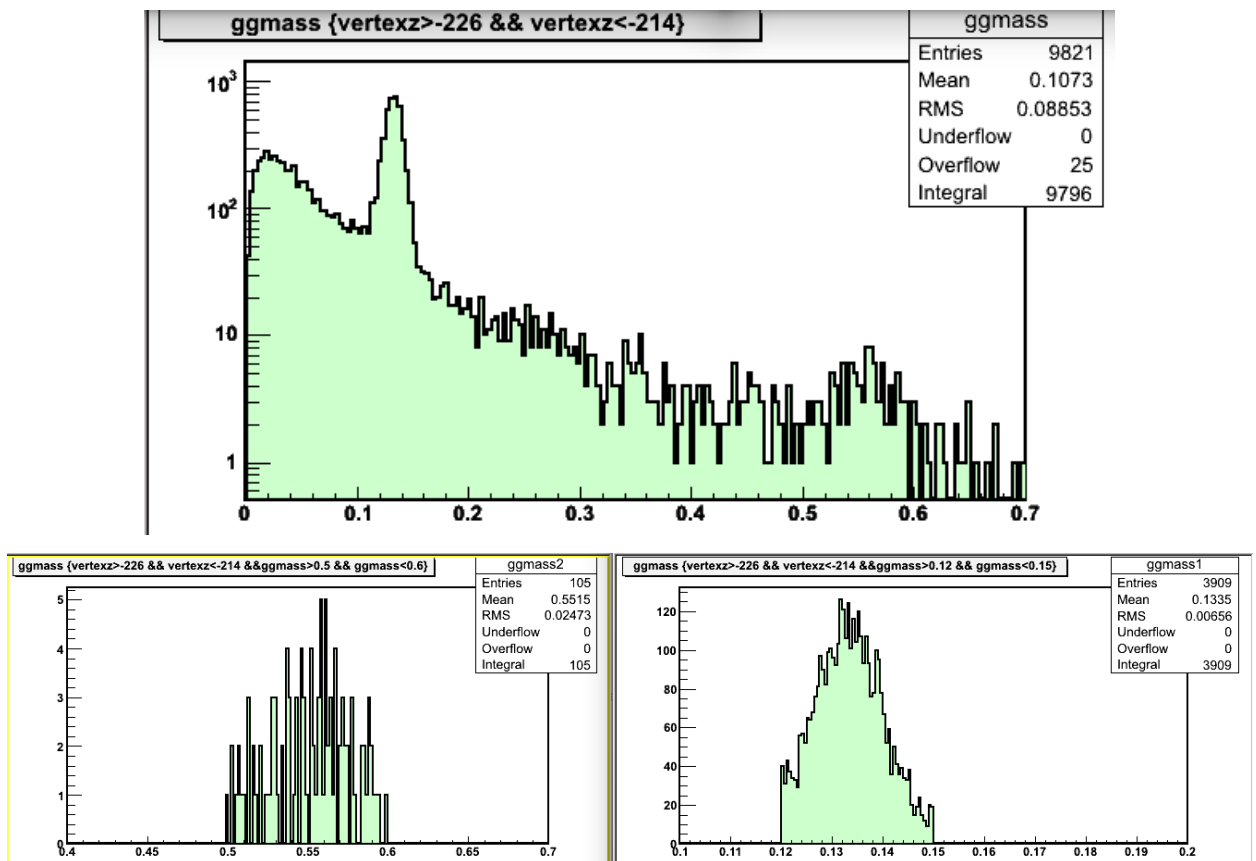


Рисунок 64. Масса системы 2  $\gamma$  в логарифмическом масштабе (сверху), обрезания системы 2  $\gamma$  по массе по  $\pi$  и по  $\eta$

Видно, что имеются резонансные пики на гистограмме суммарной массы 2  $\gamma$ . Рассмотрим систему более внимательно, с каждым из обрезаний по массе.

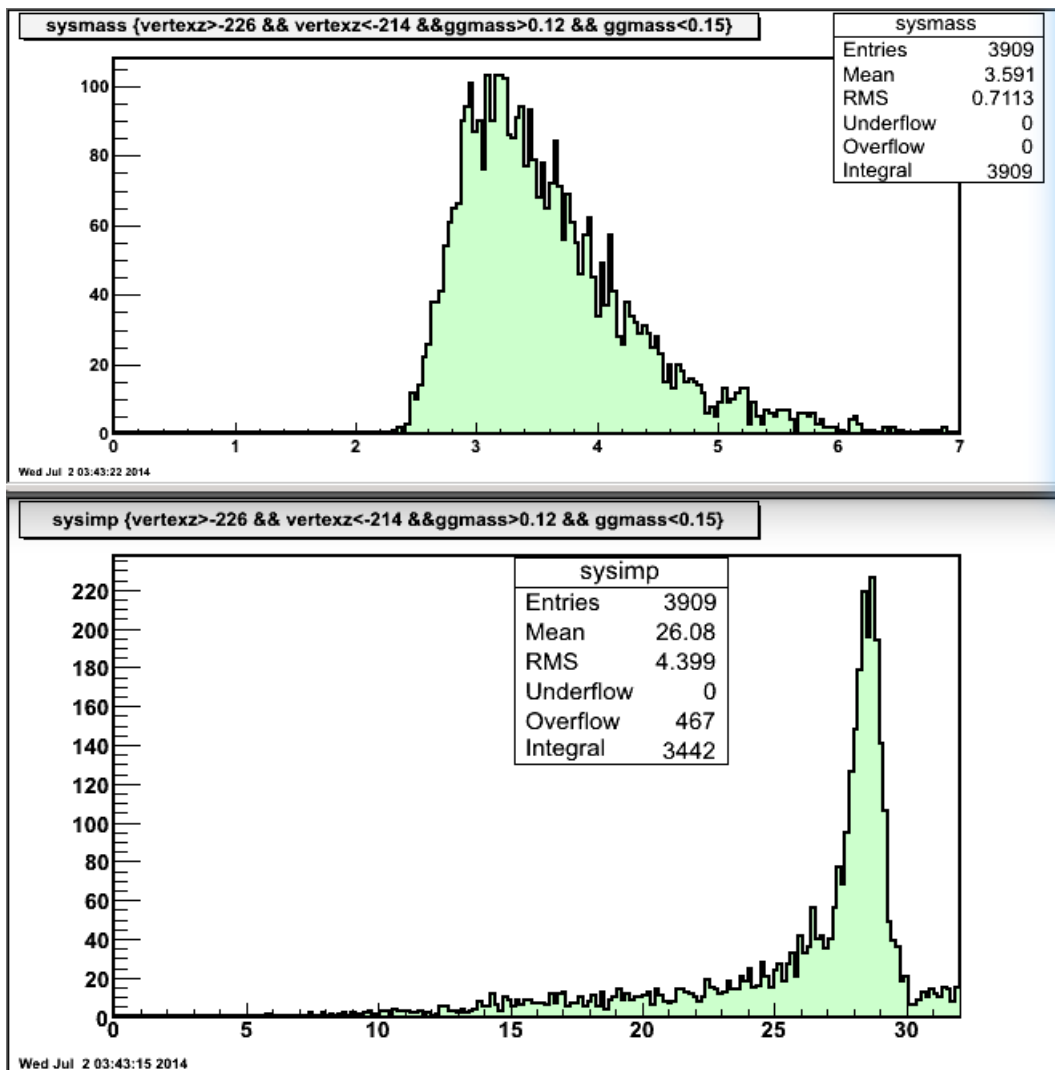
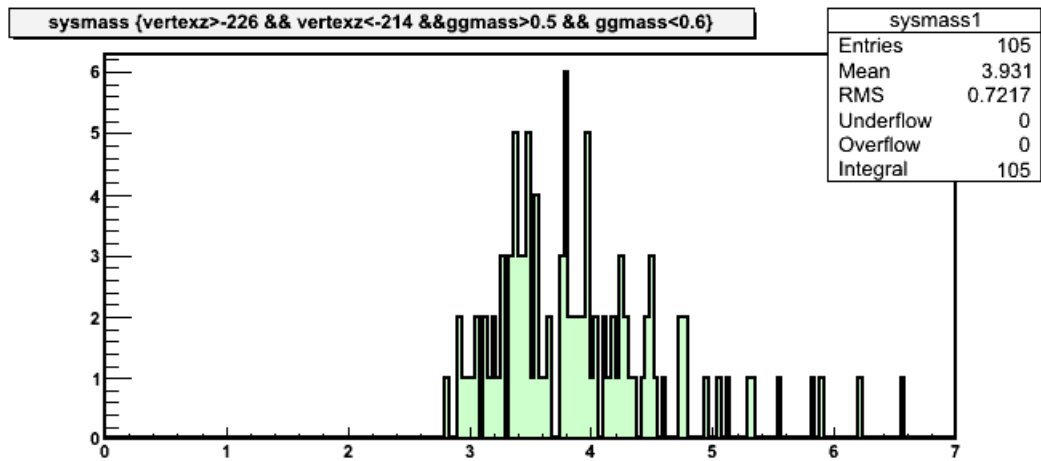


Рисунок 65. Масса и импульс системы при обрезании по  $\pi$

При обрезании по пиону пик импульса довольно-таки упругий. В суммарной массе системы можно наблюдать резонансы. Примерно 2900 МэВ, 3400, 3700 и 4100 МэВ.

В случае обрезания по  $\eta$  пик не настолько упругий. Пики в спектре масс наблюдаются на 3500, 3850 и 4100 МэВ.

Как в случае обрезания по пиону, так и по  $\eta$ , передача поперечного импульса довольно большая, что обуславливает большое  $t_{\text{min}}$ .



Wed Jul 2 03:42:57 2014

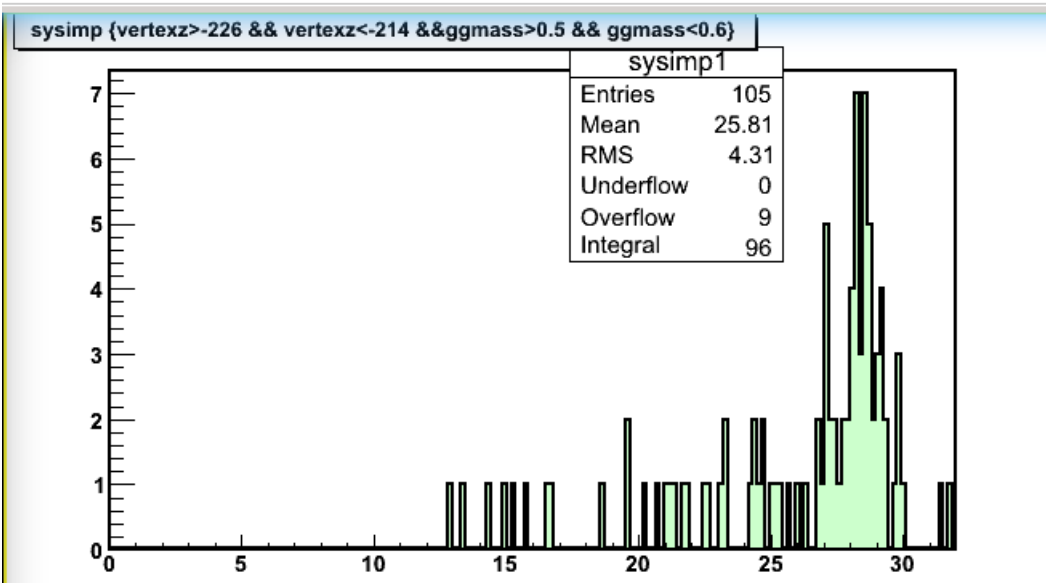


Рисунок 66. Масса и импульс системы при обрезании по  $\eta$

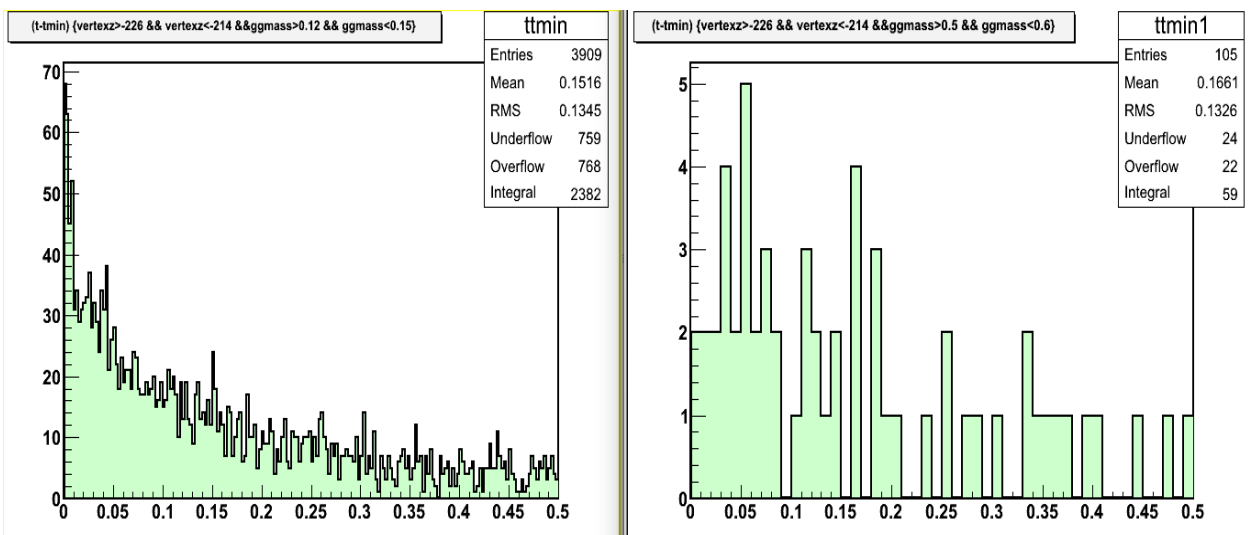


Рисунок 67.  $t-t_{\min}$  при обрезании по  $\pi$  (слева) или  $\eta$  (справа)

### Выводы и результаты:

- Был проведён анализ 13 выбранных систем в рамках антипротон – протонных эксклюзивных реакций на ВЕС
- При появлении в реакции 2  $\gamma$  практически всегда есть возможность как появления их из-за распада  $\pi^0$ , так и из-за распада  $\eta$ . Причём тех, которые появились из-за распада  $\eta$  обычно на порядок меньше, в связи с этим для них сложнее набрать статистику. Также реакции, в которых 2  $\gamma$  появились из-за распада  $\eta$ , обладают менее упругим пиком суммарного импульса системы и большим переданным поперечным импульсом, а, как следствие, большим  $t-t_{\min}$
- Чем более специфичная реакция (если считать систему из одного получившегося антипротона обычной, а систему из 1 положительной, 2 отрицательных частиц довольно-таки необычной), тем меньше данных откидывается при обрезании относительно вершины  $z$ . То есть, чем больше разнообразных частиц получено в итоге, тем лучше они попадают в необходимую область по  $z$
- Самые частые резонансы для подсистем антипротон – пион – это резонансы с массами примерно 1250 и 1400 МэВ (предположительно это  $\Delta P_{33}$  (1232) и  $N P_{11}$  (1440))

## **Список использованных источников**

- [1] Клаус Групен «Детекторы элементарных частиц»
- [2] Клайкнехт К. «Детекторы корпускулярных излучений» // Мир, 1990 г, 224 стр.
- [3] Перкинс Д. «Введение в физику высоких энергий» // Энергоатомиздат, 1991 г, 429 стр.