

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Физический факультет

Неупругое столкновение протонов при энергиях Большого Адронного Коллайдера.

Курсовая работа по ядерной физике.

Выполнил студент 202 группы

В.К. Павлецов.

Преподаватель

Профессор Л.Н. Смирнова.

Москва - 2015

Содержание.

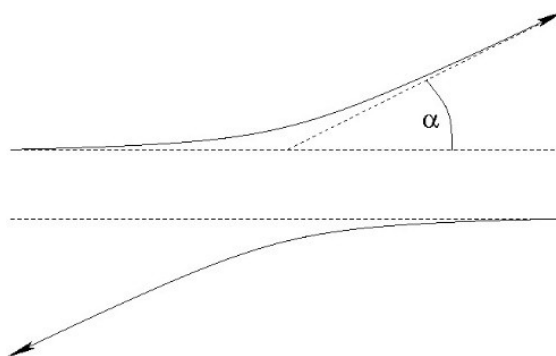
	Стр.
Введение.	3
Упругие столкновения частиц.	3
Неупругие столкновения частиц.	6
Распределение заряженных частиц по псевдобыстроте.	9
Распределение заряженных частиц по поперечному импульсу.	10
Распределение по множественности.	11
Распределение по множественности.	12
Модельный сайт анализа событий в детекторе ATLAS.	14
Заключение.	16
Литература.	16

Введение.

В работе рассматриваются взаимодействия высокоэнергичных протонов на Большом адронном коллайдере, ЦЕРН, Женева, Швейцария. Пучки протонов ускоряются до энергии до 3,5-4 ТэВ. В 2015 году планируется ускорять пучки до 6,5 ТэВ. При столкновении протонов высокой энергии существуют упругие и неупругие взаимодействия, при неупругих рождаются новые частицы, как известные и хорошо изученные, пионы, каоны, протоны, а также мало изученные частицы τ -лептоны, W,Z-бозоны. В 2013 году был открыт бозон Хигса. Для исследования и открытия новых частиц необходимо знать детальные характеристики уже найденных частиц. Причем рождение легких частиц не предсказываются точно генераторами (такими как PYTHIA, HERWIG, Sherpa, Nijing, Alpgen и другие) поскольку в них заложены модельные представления, важно проводить измерения, сравнивать их с предсказаниями генераторов и настраивать генераторы.

Упругие столкновения частиц.

Упругие столкновения частиц, или рассеяние частиц, – это изменения направления движения частиц при взаимодействии с другой частицей. Графически процесс упругого рассеяния показан на рис.1.



α – угол рассеяния

Рис.1. Схематическое изображение процесса упругого рассеяния частиц.

Рассеяние частиц характеризуется эффективным сечением рассеяния.

Эффективное сечение рассеяния σ величина, равная отношению частиц, отклонившихся от первоначальной траектории после взаимодействия, N к плотности потока частиц j

—

Принятая единица измерения сечений 1 барн = 10^{-28} м².

В процессе проведения эксперимента было измерено упругое сечение рассеяния протонов на Большом адронном коллайдере при энергии соударения 7 ТэВ:

$$\sigma_{el} = 24.0 \pm 0.6 \text{ мкб.}$$

Эти измерения проводились в экспериментах TOTEM и ATLAS. [1- Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, Nucl.Phys.B 889 (2014) 489-548] На рис.2 приведены результаты этих измерений величин упругого сечения рассеяния протонов и полного сечения взаимодействия в сравнении с результатами других экспериментов.

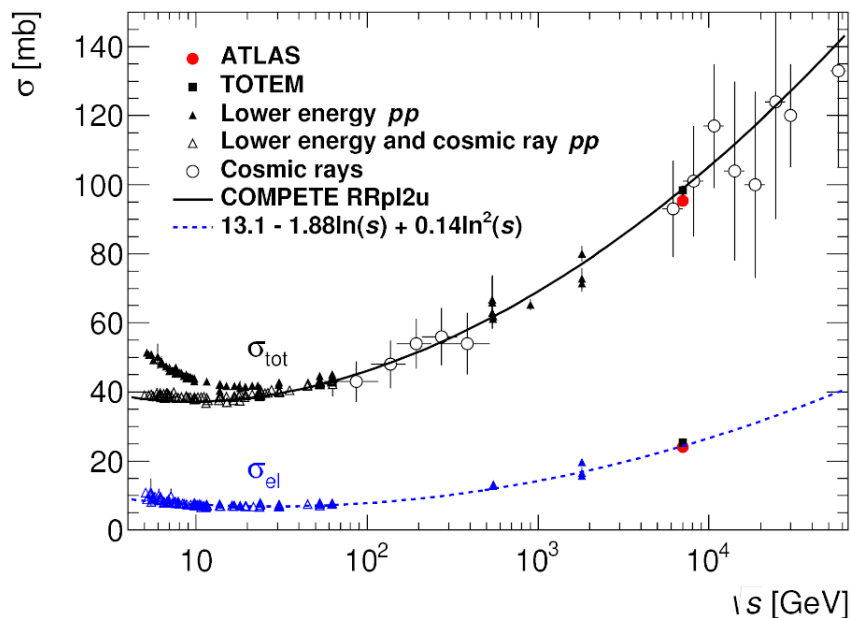


Рис.2 График зависимости полного и упругого сечения взаимодействия протонов. На графике представлены результаты измерения на детекторах ATLAS и TOTEM при энергии 7 ТэВ, а также мало энергичные столкновения протонов и эксперименты с космическими лучами которые дают очень большую погрешность.

В работе [1] непосредственно проводилось измерение упруго рассеянных протонов. Результаты измерений приведены на рис.3. Показана зависимость сечения рассеяния от величины квадрата переданного импульса $-t$.

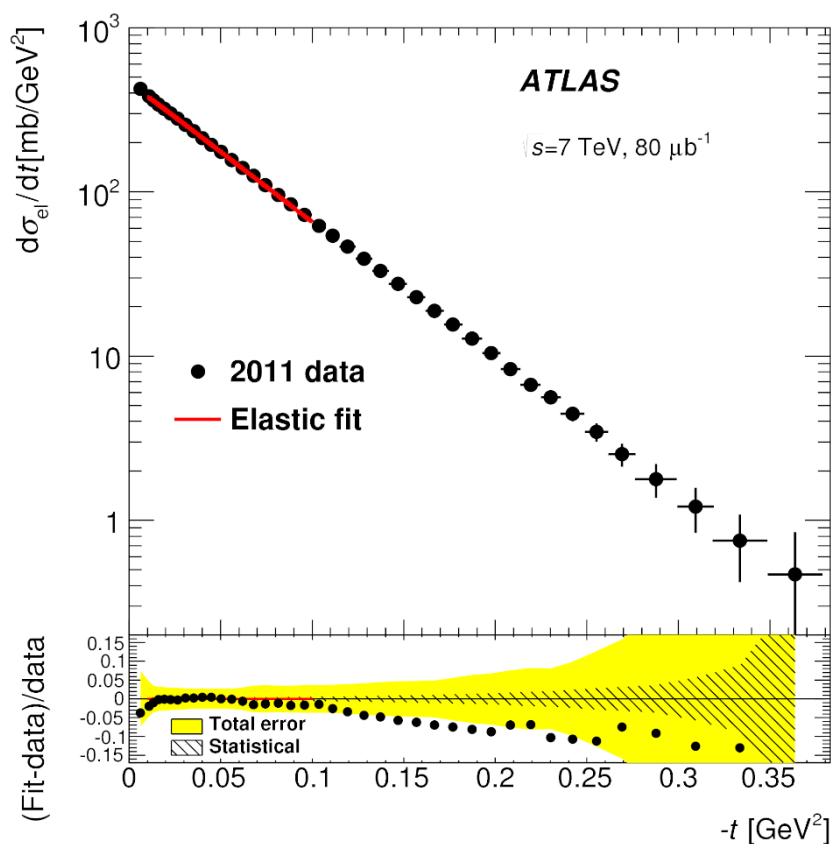


Рис.3. На графике представлена экспоненциальная зависимость упругого сечения σ_{el} от квадрата поперечного импульса при энергии 7 ТэВ.

Далее для определения полного сечения рассеяния σ_{tot} может быть использована оптическая теорема. Оптическая теорема связывает полное сечение с мнимой частью амплитуды упругого рассеяния

$$\sigma_{tot}^2 = \frac{16\pi}{k^2(1+\rho^2)} \left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{t=0}^{O.T.},$$

где ρ – отношение реальной части к мнимой части амплитуды упругого рассеяния.

Величина сечения в оптической точке определяется путем экстраполяции измеренного сечения к значению при $t = 0$. Значение ρ берется из других экспериментов. Таким образом вычисляется величина σ_{tot} .

Далее из формулы $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}}$ мы можем рассчитать величину неупругого сечения рассеяния. Таким образом, измерив упругое сечение рассеяния σ_{el} , мы можем вычислить полное σ_{tot} и неупругое σ_{inel} сечения.

Величина упругого сечения определяется интегрированием дифференциального сечения, приведенного на рис.3.

В результате эксперимента ATLAS на Большом Адронном Коллайдере было измерено неупругое и полное сечение взаимодействия протонов: $\sigma_{\text{inel}} = 71.34 \pm 0.90$ мкб, $\sigma_{\text{tot}} = 95.35 \pm 1.36$ мкб[1].

Неупругие столкновения частиц.

Нас интересует неупругое столкновение протонов при движении в Большом Адронном Коллайдере. Протоны состоят из 3х валентных кварков (u, u, d) и множества морских кварков, антикварков и глюонов. При неупругом столкновении частицы не просто отклоняются от заданной траектории, но и полностью меняют свой кварковый состав, происходит образование новых частиц.

При неупругом столкновении двух протонов высокой энергии рождается огромное число различных частиц. Благодаря конфайнменту мы не можем наблюдать отдельные кварки. Из-за большого количества энергии возникает большое количество кварков, антикварков, которые впоследствии объединяются в адроны. Поэтому мы наблюдаем большое количество адронов. Частицы разлетаются как правило в продольном направлении, а не поперечно направлению сталкивающихся протонов, потому что они несут значительную часть начального импульса протона. За счёт обмена цветом и/или жесткого взаимодействия кварков у кварков и частиц появляется поперечный импульс. Неупругое протон-протонное столкновение выглядит примерно так, как показано на рис.4:

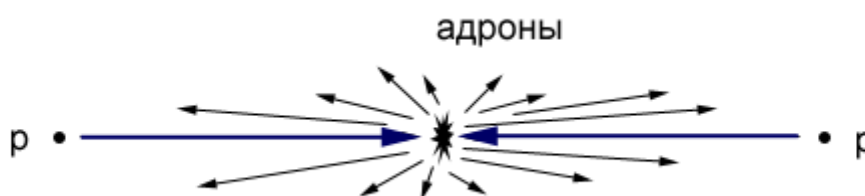


Рис.4. Схематическое изображения неупругого соударения протонов высокой энергии.

При множественном рождении в основном это π^+ , π^- , π^0 . Значительно реже рождаются странные частицы, новые нуклоны, а также тяжелые частицы В-мезоны, W-бозоны, Z-бозоны. Основной проблемой изучения таких столкновений является огромное количество образуемых частиц. Для решения этой проблемы в экспериментальной установке используются различные типы детекторов.

Одним из таких является детектор ATLAS. Основным элементом, определяющим внешний вид и размеры детектора ATLAS, является его магнитная система. Детектор ATLAS представлен на рис. 5:

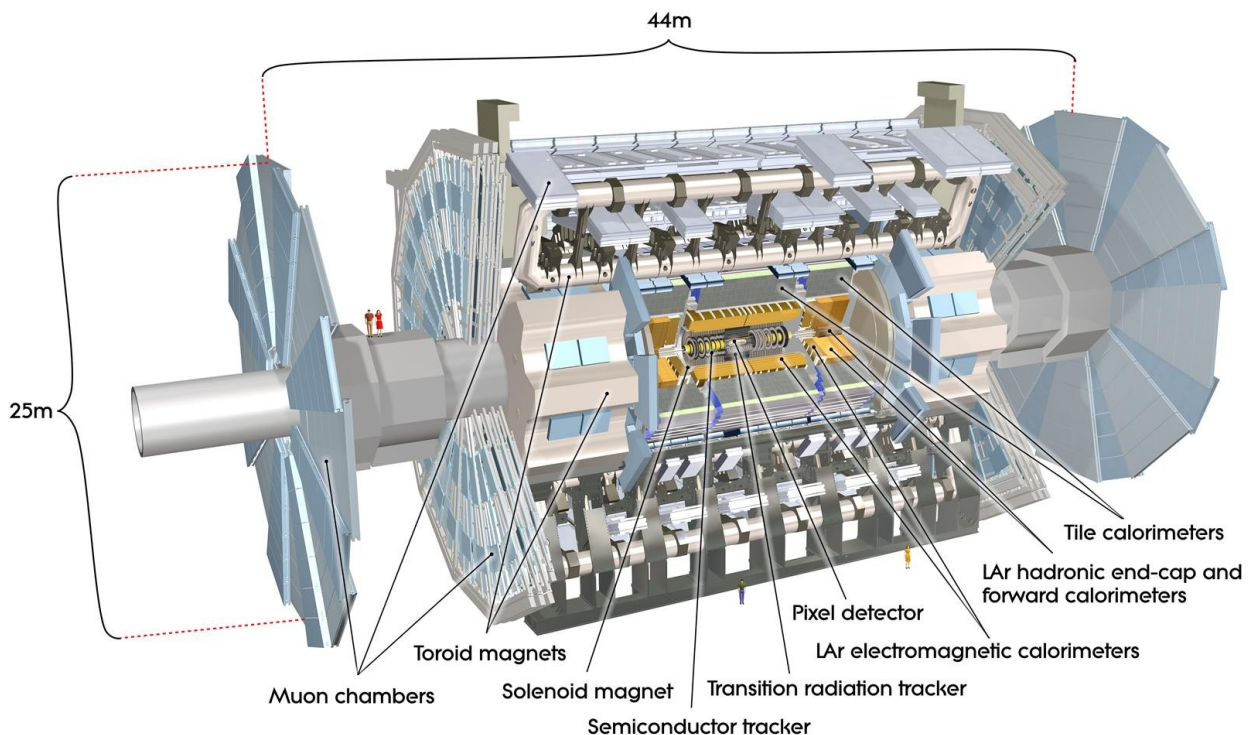


Рис.5. Схема детектора ATLAS.

На схеме для удобства изображения отсутствуют две секции центрального тороида, половина больших торцевых дисков мюонных камер, сектор калориметров и внешней части Внутреннего детектора. Внешними являются мюонные камеры для регистрации мюонов. Следующим элементом при движении к центру детектора служит адронный калориметр. Внутри адронного калориметра находится жидкоаргоновый электромагнитный калориметр. Внутри калориметрической системы в непосредственной близости к трубе, в которой движутся и сталкиваются пучки протонов, расположен Внутренний детектор, представленный на рис. 6.

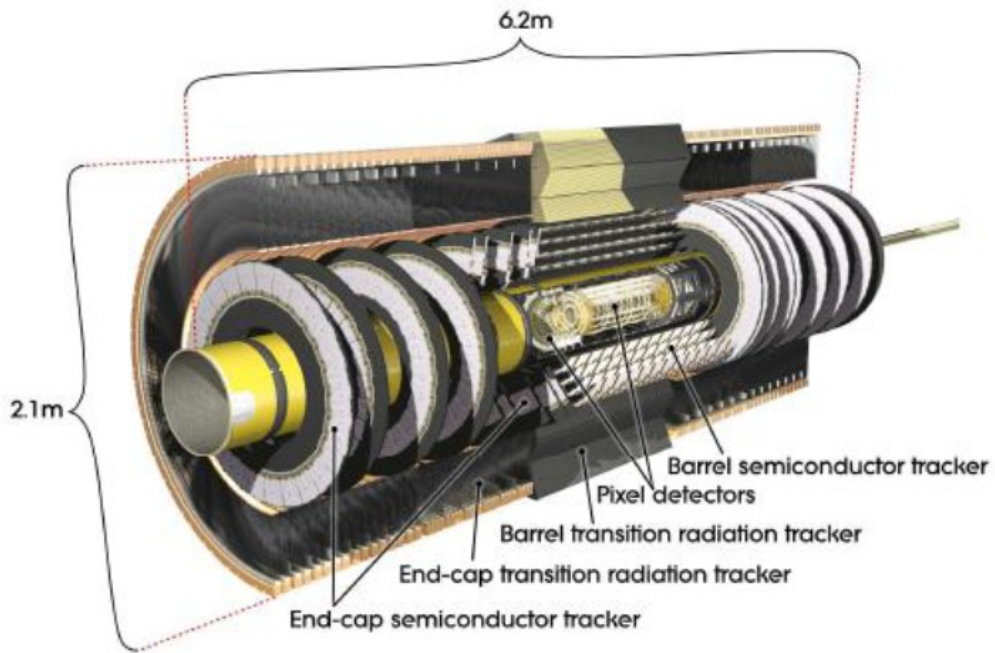


Рис.6. Внутренний детектор ATLAS.

На рисунке показаны цилиндры и диски пиксельных детекторов, цилиндры барреля и торцевые диски микростриповых кремниевых детекторов полупроводниковой трековой системы и внешний объем, занимаемый трековой системой детектора переходного излучения.

Для описания кинематических характеристик рожденных частиц важной переменной является **псевдобыстрота η** и **поперечный импульс P_T** .

—

где — угол между направлением импульса частицы \vec{p} и осью пучка. График зависимости псевдобыстроты от угла представлен на рис. 7.

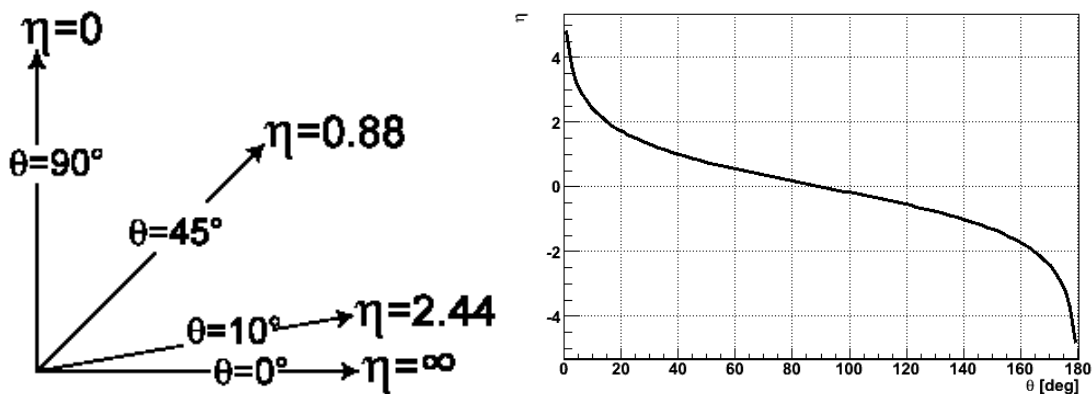


Рис. 7 График зависимости пресвобыстроты от угла .

Переменная псевдобыстрота характеризует продольную составляющую импульса частицы, а поперечный импульс характеризует степень неупругости взаимодействия и им обладают частицы, образованные от распада тяжелых частиц (W, Z-бозонов). События, в которых присутствуют частицы с большими поперечными импульсами относят к классу жестких взаимодействий.

Распределение заряженных частиц по псевдобыстроте.

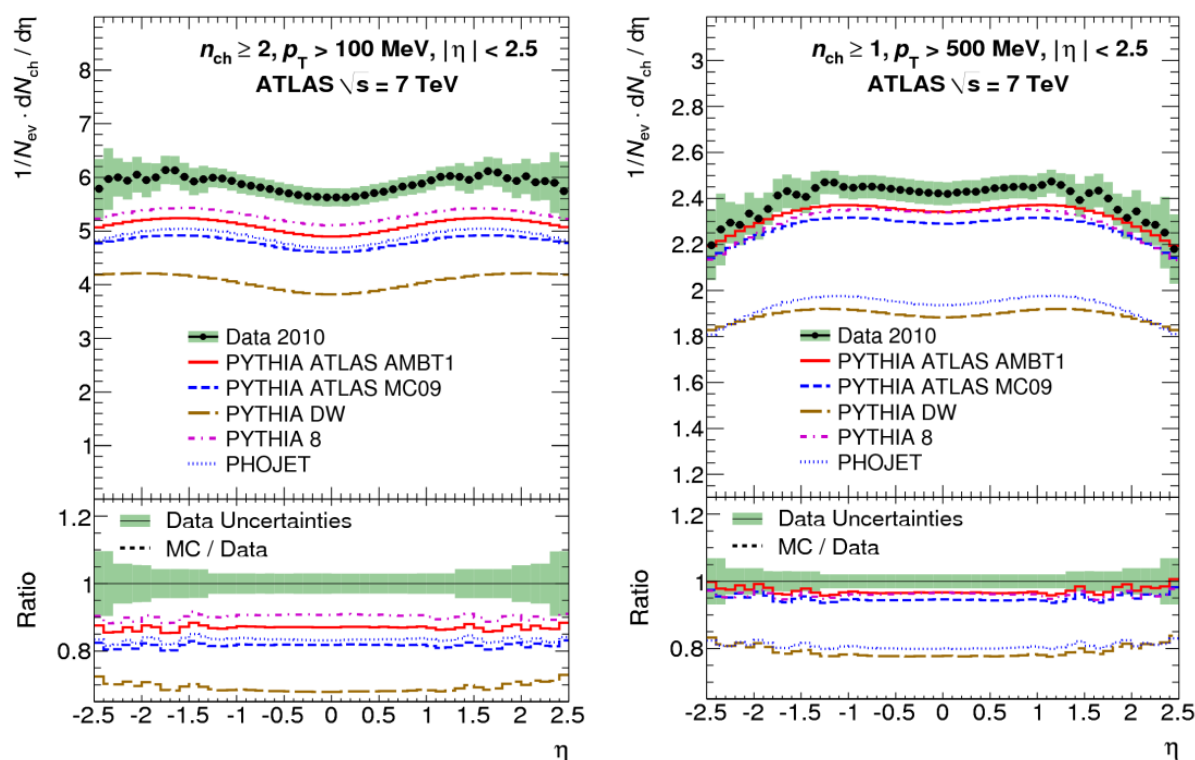


Рис. 8 График зависимости плотности заряженных частиц от псевдобыстроты

Плотности заряженных частиц по псевдобыстроте η в pp взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ при значениях поперечных импульсов частиц $p_T > 100$ МэВ/с (слева) и $p_T > 500$ МэВ/с (справа). Линиями показаны предсказания Монте-Карло генераторов событий. В нижней части рисунков приведено отношение этих предсказаний к экспериментальным распределениям [2-Charged-particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC].

В результате эксперимента было установлено, что предсказания генераторов на 10-20% меньше экспериментальных данных, самые близкие предсказания делают генераторы PYTHIA ATLAS AMBT1 и PYTHIA 8. Средняя плотность

заряженных частиц на единицу псевдобыстроты η для $p_T > 100$ МэВ равна 5.63, а для $p_T > 500$ МэВ 2.36.[2]

Распределение заряженных частиц по поперечному импульсу.

Поперечные импульсы частиц несут важную информацию о динамике взаимодействия, служат инструментом разделения событий «мягких» и «жестких» взаимодействий.

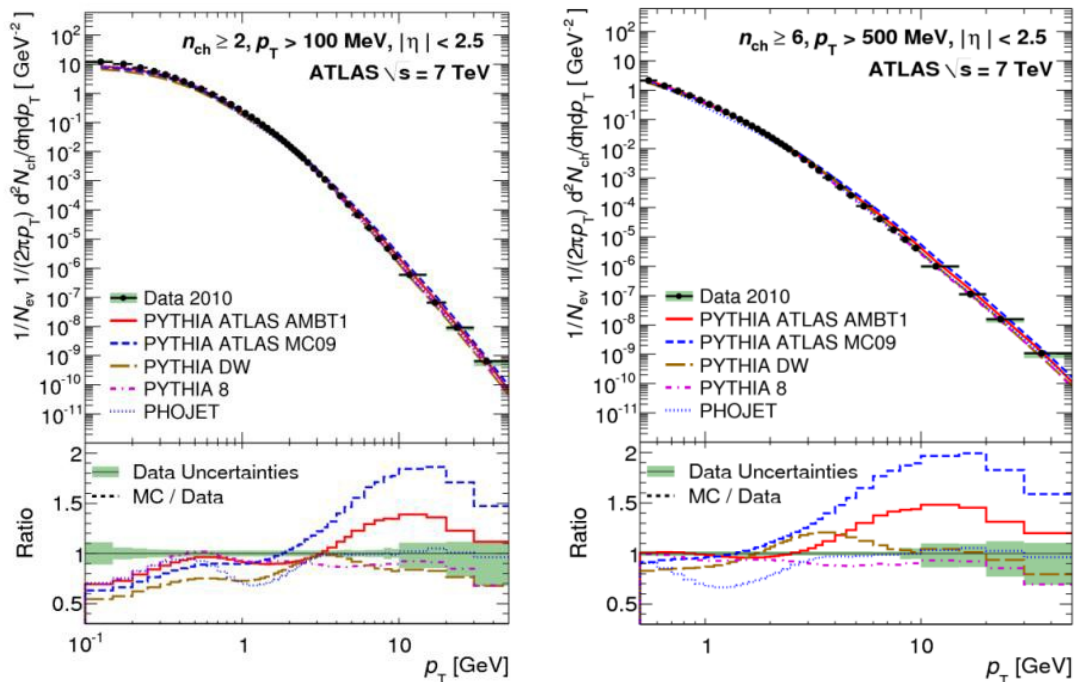


Рис. 9 Распределение частиц по поперечному импульсу.

Измеренные при 7 ТэВ распределения множественности заряженных частиц по поперечным импульсам для двух наборов событий: событий с $n_{ch} \geq 2$ и $p_T > 100$ МэВ/с (слева) и событий $n_{ch} \geq 6$ и $p_T > 500$ МэВ/с (справа) при $|\eta| < 2.5$. В нижней части рисунка показано отношение предсказаний к экспериментальным данным (дваждылогарифмический масштаб). Из графиков видно, что модельные предсказания достаточно хорошо описывают взаимодействие, только при больших энергиях наблюдаются отклонения от экспериментальных данных, но наилучшие предсказания дает генератор PYTHIA 8. При больших поперечных импульсах p_T распределение заряженных частиц по поперечному импульсу приобретает степенной характер.

Распределение по множественности заряженных частиц.

Другой характеристикой взаимодействий является распределение событий по множественности заряженных частиц n_{ch} в заданном фазовом объеме, представленное на Рис.10.

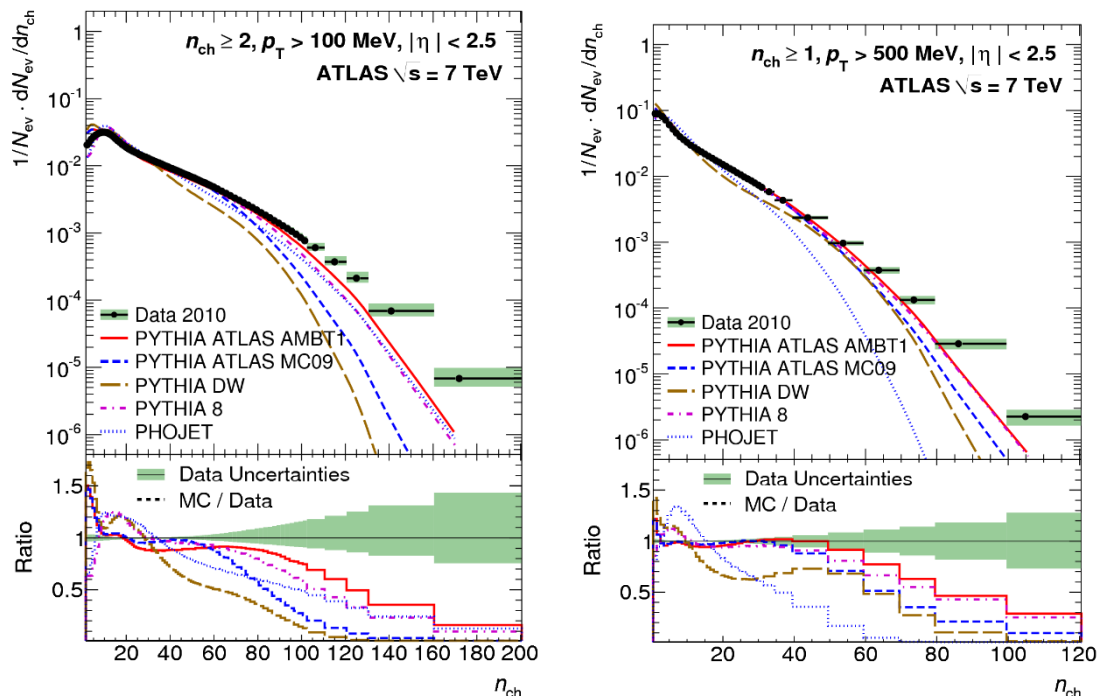


Рис.10 распределение событий по множественности заряженных частиц.

Распределения событий по множественности заряженных частиц n_{ch} с $p_T > 100 \text{ МэВ/с}$ ($n_{ch} \geq 2$, слева) и $p_T > 500 \text{ МэВ/с}$ ($n_{ch} \geq 6$, справа) при $|\eta| < 2.5$ для рр взаимодействий при энергии 7 ТэВ в сравнении с предсказаниями генераторов событий. В нижней части рисунка показано отношение предсказаний к экспериментальным данным в зависимости от числа частиц. Из распределений видно, что множественности заряженных частиц в событиях достигают 200 частиц для $p_T > 100 \text{ МэВ/с}$ и 120 для $p_T > 500 \text{ МэВ/с}$. Начиная с множественности 60 частиц, экспериментальные данные превышают предсказания генераторов. Лучшее предсказание с экспериментальными данными дает генератор PYTHIA ATLAS AMBT1.

Дифференциальное сечение рождения мюонов и электронов.

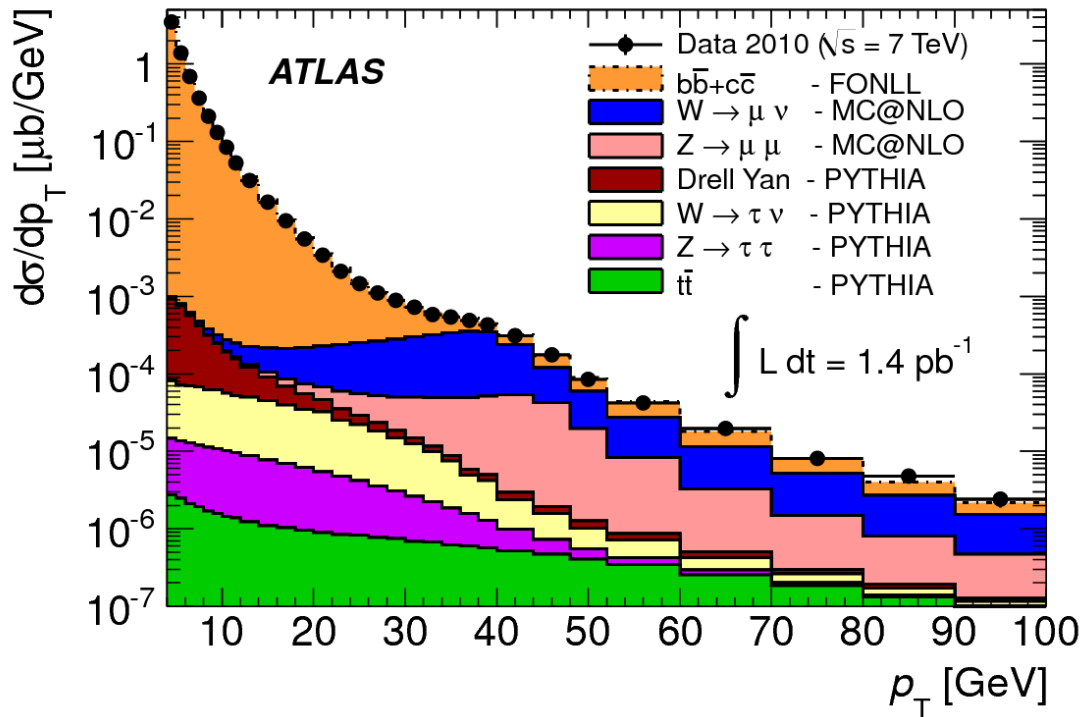


Рис. 11. Распределение мюонов по поперечному импульсу.

Из диаграммы видно, что при маленьких энергиях основной вклад в рождение мюонов вносят распады b и c кварков. Также при низких энергиях мюоны образуются за счет распада таонов τ , которые образовались из распада тяжелых W , Z бозонов. При энергии свыше 40 ГэВ вклад от распадов b , c кварков практически исчезают и мюоны образуются за счет распада тяжелых бозонов, таких как W и Z . Так же мюоны образуются из тяжелых топ-кварков t на всем диапазоне энергий.

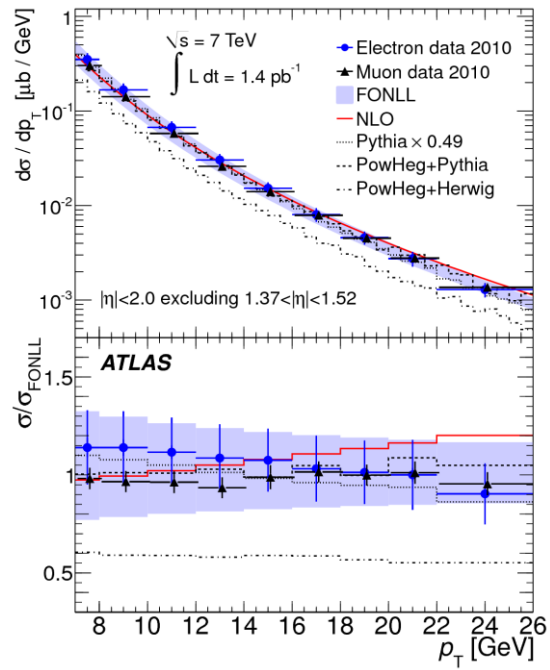


Рис. 12. Спектры мюонов и электронов.

В нижней части показано их отношение. Это отношение сопоставимо с единицей. Это означает что их спектры подобны. Это согласуется со свойством инвариантности лептонов в стандартной модели.

Модельный сайт анализа событий в детекторе ATLAS.

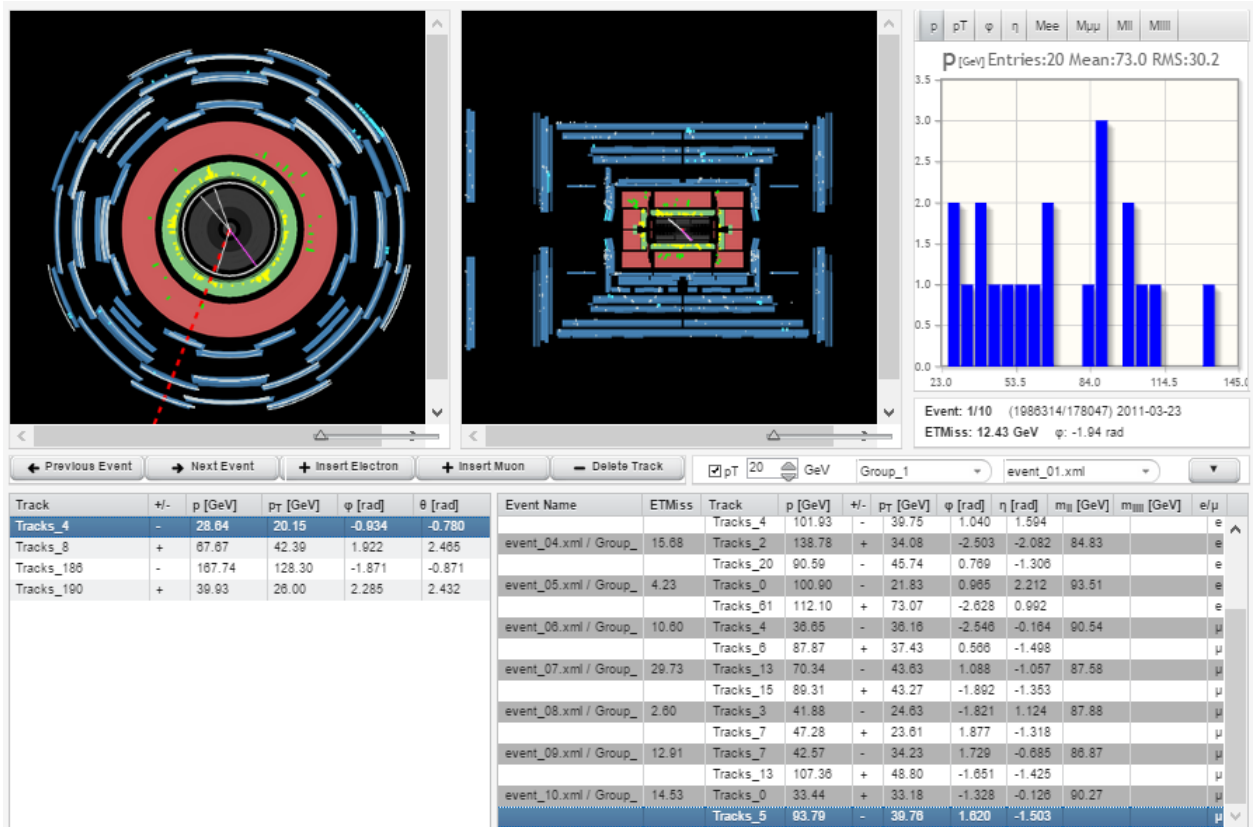


Рис. 13. Изображения сайта HY.P.A.T.I.A.

В университете города Афины создан сайт, который позволяет увидеть характеристики отдельных частиц в событиях pp-соударений в детекторе ATLAS. На рис. 13 приведено изображение сайта. Оно содержит изображения фронтального и бокового сечения детектора ATLAS. Там же показаны сигналы частиц и восстановленные по ним треки заряженных частиц, образованных при соударении протонов. В нижней части рисунка слева приведен список измеренных треков частиц с измеренными значениями электрического заряда, импульса p [ГэВ/c], поперечного импульса p_T [ГэВ/c], азимутального угла ϕ [рад], пространственного угла θ [рад]. На сайте демонстрируются события, в которых рождается Z-бозон, который распадается на два электрона или два мюона: $Z \rightarrow ee$, $Z \rightarrow \mu\mu$.

По типу сигнала в детекторе можно различить треки электронов и мюонов. Электроны оставляют сигнал в электромагнитном калориметре, а мюоны пролетают весь детектор и регистрируются в мюонных камерах. Треки от распадов Z-бозона имеют значительно большие значения поперечного

импульса, чем остальные треки. Для удобства можно выбирать минимальный поперечный импульс начиная с которого будут отображаться треки, зарегистрированных частиц. С помощью курсора можно выбрать треки электронов и мюонов в изображении детектора, их параметры отразятся в таблице, представленной на Рис.14.

Event Name	ETMiss	Track	p [GeV]	+/-	p _T [GeV]	φ [rad]	η [rad]	m _{II} [GeV]	m _{III} [GeV]	e/μ
		Tracks_4	101.93	-	39.75	1.040	1.594			e
event_04.xml / Group_	15.68	Tracks_2	138.78	+	34.08	-2.503	-2.082	84.83		e
		Tracks_20	90.59	-	45.74	0.769	-1.306			e
event_05.xml / Group_	4.23	Tracks_0	100.90	-	21.83	0.985	2.212	93.51		e
		Tracks_61	112.10	+	73.07	-2.628	0.992			e
event_06.xml / Group_	10.60	Tracks_4	36.65	-	36.16	-2.546	-0.164	90.54		μ
		Tracks_6	87.87	+	37.43	0.566	-1.498			μ
event_07.xml / Group_	29.73	Tracks_13	70.34	-	43.63	1.088	-1.057	87.58		μ
		Tracks_15	89.31	+	43.27	-1.892	-1.353			μ
event_08.xml / Group_	2.60	Tracks_3	41.88	-	24.63	-1.821	1.124	87.88		μ
		Tracks_7	47.28	+	23.61	1.877	-1.318			μ
event_09.xml / Group_	12.91	Tracks_7	42.57	-	34.23	1.729	-0.685	86.87		μ
		Tracks_13	107.36	+	48.80	-1.651	-1.425			μ
event_10.xml / Group_	14.53	Tracks_0	33.44	+	33.18	-1.328	-0.126	90.27		μ
		Tracks_5	93.79	-	39.76	1.620	-1.503			μ

Рис.14. Параметры выбранных треков.

По этим параметрам проводится расчет инвариантной массы двух треков полученные значения инвариантной массы размещаются в гистограмме, представленной на рис. 15. После анализа имеющегося количества событий, в итоге можно получить распределение по спектру инвариантных масс Z-бозона.

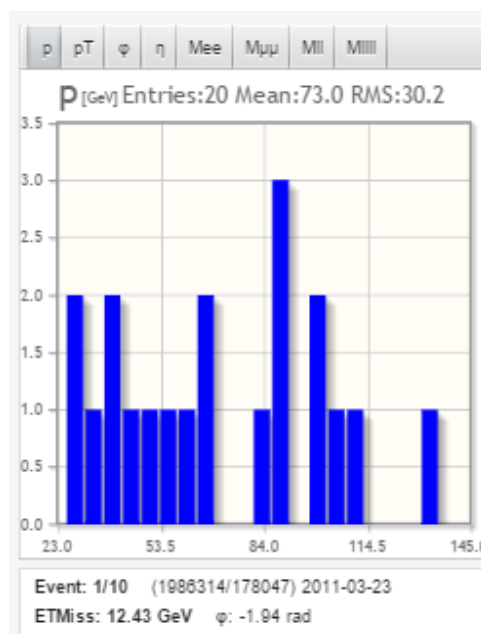


Рис. 15. Гистограмма инвариантных масс Z-бозона.

Данный сайт можно найти по ссылке: <http://hypatia.iasa.gr/en/index.html>

Заключение.

В данной работе мы рассмотрели различные типы взаимодействий протонов высоких энергий: упругое и неупругое. Привели методы измерения сечения упругого взаимодействия, полного сечения взаимодействия и сечения неупругого взаимодействия. Привели последние результаты измерения сечения pp -взаимодействий при энергиях 7 и 8 ТэВ на Большом Адронном Коллайдере: $\sigma_{el} = 24.0 \pm 0.6$ мб, $\sigma_{inel} = 71.34 \pm 0.90$ мб, $\sigma_{tot} = 95.35 \pm 1.36$ мб.

Рассмотрели природу частиц, рождающихся во взаимодействиях. Показали характеристики множественного рождения адронов, состоящих и легких кварков (u, d, s).

Привели спектры лептонов в которых проявляются сигналы рождения тяжелых частиц (W, Z-бозонов)

С использованием сайта HYPATIA, проведен анализ реальных событий pp -соударений с рождением Z-бозонов.

Литература.

- Эксперимент ATLAS Большого Адронного Коллайдера.
Л.Н.Смирнова.
- Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration, Nucl.Phys.B 889 (2014) 489-548
- Charged-particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC, ATLAS Collaboration, New J. Phys. 13(2011) 053033
- <http://nuclphys.sinp.msu.ru>
- <http://hypatia.iasa.gr/en/index.html>