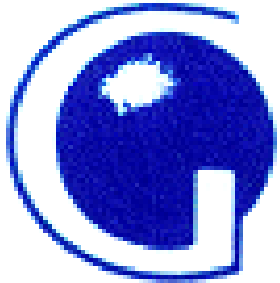


Идентификация электронов и фотонов в эксперименте ATLAS

Седых Е., ПИЯФ



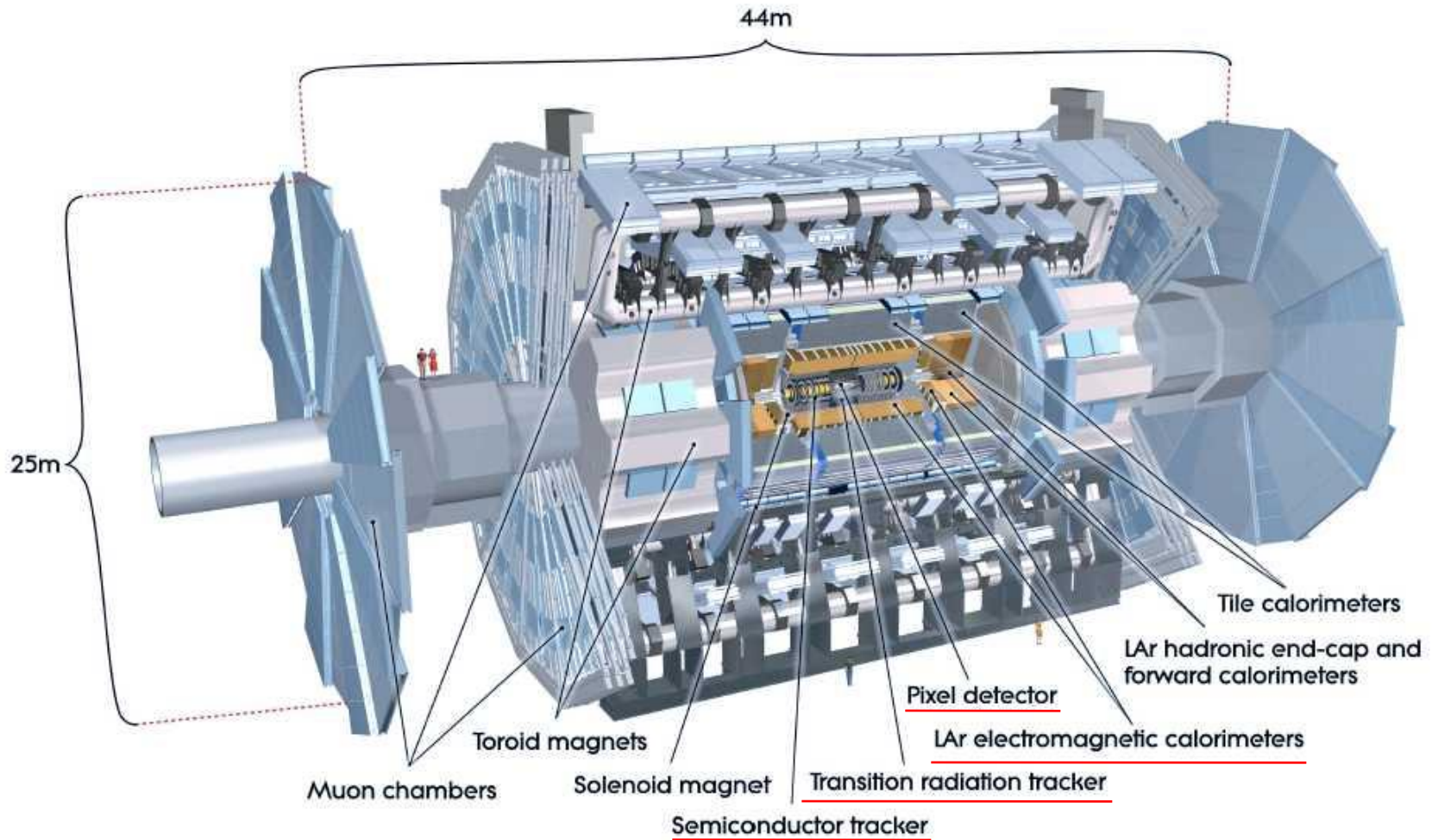
План доклада

- **Мотивация**
- **Краткий обзор электромагнитного калориметра и трековой системы детектора ATLAS**
- **Алгоритмы реконструкции электронов/фотонов**
- **Идентификация электронов/фотонов (метод дискриминируемых переменных – cut based)**
- **Ожидаемые эффективности реконструкции и идентификации электронов/фотонов**
- **Калибровка электромагнитного калориметра в первых данных с использованием процесса $Z \rightarrow e e$**
- **Измерение эффективности реконструкции и идентификации электронов с использованием процесса $Z \rightarrow e e$**
- **Заключение и выводы**

Мотивация

- Исследование многих физических каналов на БАК требует **высокоэффективной регистрации и идентификации электронов и фотонов** в широком диапазоне энергий от нескольких ГэВ до \sim ТэВ:
- Важнейшие физические каналы, в которых необходимо регистрировать **изолированный электрон (или электроны)** в конечном состоянии
 - Низкоэнергетические резонансы **$J/\Psi \rightarrow ee$** ($\sigma_{J/\Psi} = 90$ мкб) и **$Y \rightarrow ee$** ($\sigma_Y = 0,7$ мкб)
 - изучение эффективности работы триггера и алгоритмов реконструкции
 - калибровка детектора
 - изучение рождения кваркония
 - Процессы SM: **$Z \rightarrow ee$** (1,14 нб), **$W \rightarrow e\nu_e$** (11,75 нб)
 - фон к процессам от "новой физики", измерение сечений для проверки КХД
 - измерения M_W с точностью $\sim 1\%$ и $\sin\theta_W$ – ограничения на массу бозона Хиггса
 - процесс **$Z \rightarrow ee$** дает уникальную возможность для калибровки ЭМ калориметра
 - Электроны с высокими p_T в процессе **$t \rightarrow Wb \rightarrow e\nu_e b$** (0,16 нб)
 - Поиск Хиггса в канале **$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$** ($m_H = 120$ ГэВ - 3,76 нб LO, 6,25 нб NLO)
 - Beyond SM: Тяжелые калибровочные бозоны с массой \sim ТэВ (**$Z' \rightarrow ee$**), каскады распадов SUSY частиц, дополнительные размерности, ...
- Ожидается ($\sigma_{\text{minbias}} \sim 70$ мб) соотношение сигнал/фон (изолированные электроны к КХД струям) в диапазоне p_T 20-50 ГэВ $\sim 10^{-5}$ (в ~ 50 раз хуже чем на Tevatron'e!!!)
- Регистрация **изолированных фотонов** с большим p_T в конечном состоянии также важна для изучения **$H \rightarrow \gamma\gamma$** ($m_H = 130$ ГэВ - 21 нб), **$G \rightarrow \gamma\gamma$** и т.д.

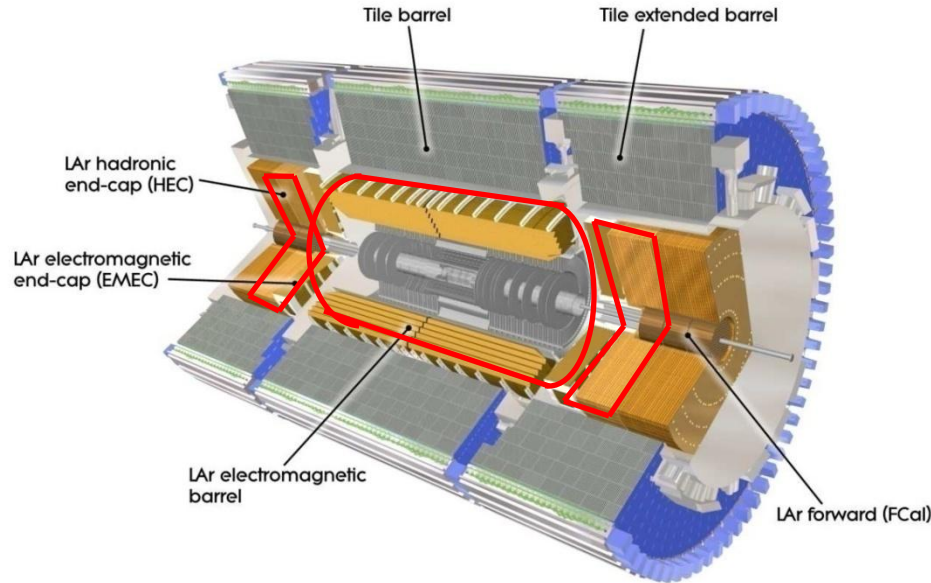
Детектор ATLAS



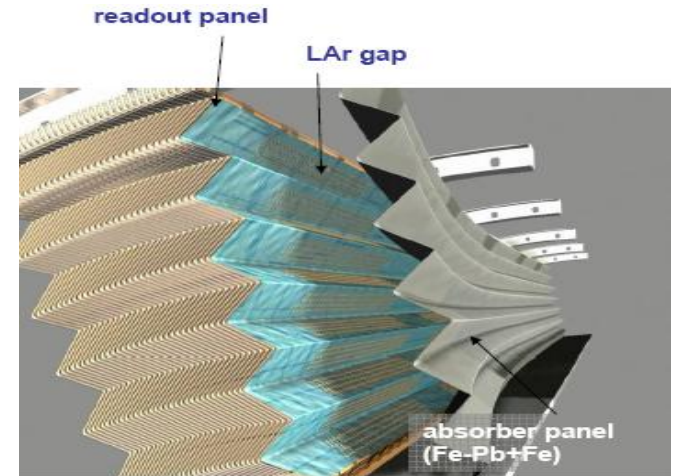
Электромагнитный калориметр

Электромагнитный калориметр:

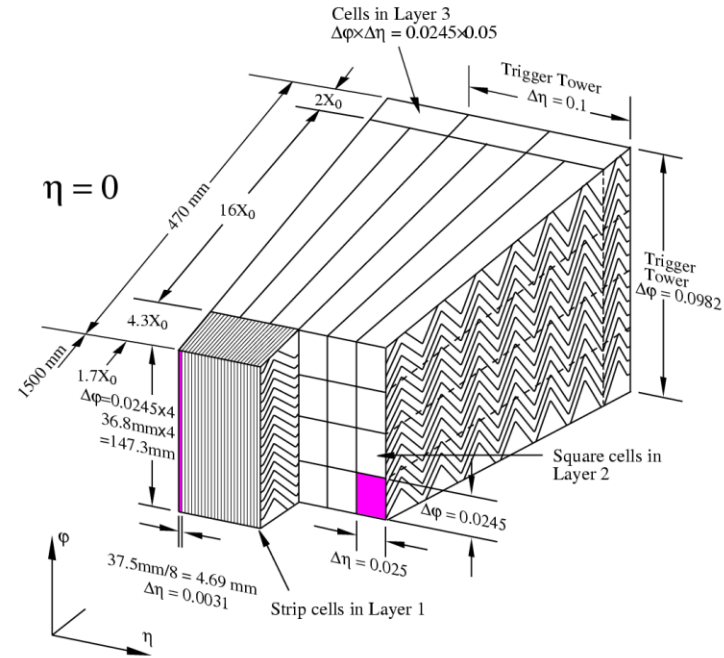
- Измерение энергии и идентификация e/γ в широком диапазоне энергий
- Pb-LAr калориметр (87 K)
- Barrel+2 End-Caps ($|\eta| < 2,5$)
- Радиационная длина 22-25 X_0
- ~170k каналов
- Криостат длиной 6,8 м, внеш. радиус 2,25 м, внутр. радиус 1,115 м
- Линейность измерения энергии $< 0,5 \%$



- Аккордеонная геометрия обеспечивает полное покрытие по ϕ и быстрое считывание сигнала
- Каждый канал калибруется при помощи электронной калибровочной системы
- Хорошее энергетическое разрешение
 - $\sigma(E)/E \sim 10\%/E^{1/2} \oplus 0,7\%$
- Отличное угловое и пространственное разрешение и возможность идентификации частиц
 - $\sigma(R\phi) \sim 9 \text{ мм}/E^{1/2}$, $\sigma(R\eta) \sim 3 \text{ мм}/E^{1/2}$



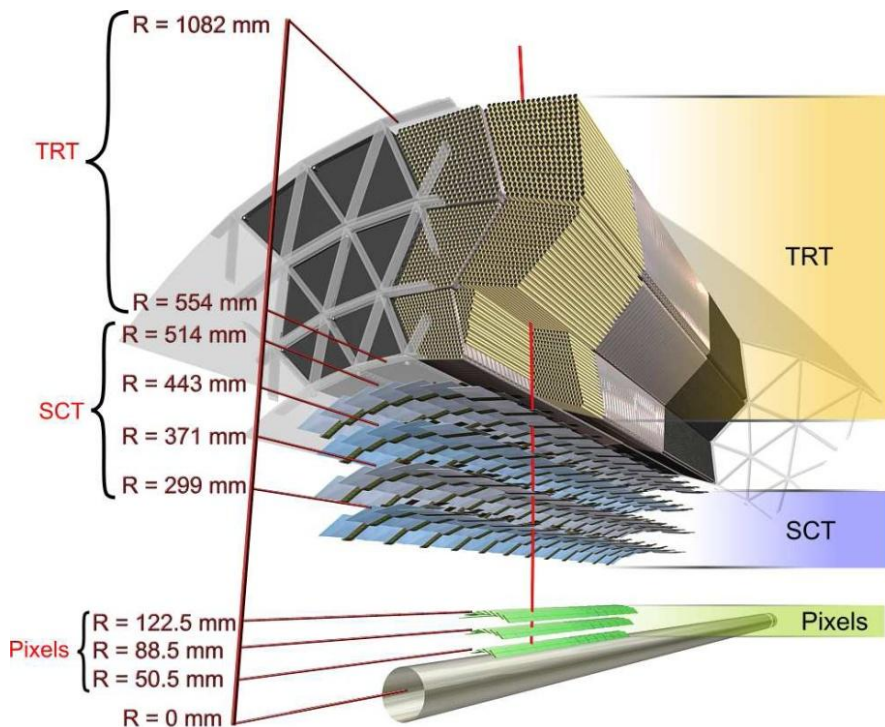
Электромагнитный калориметр



Слой	Гранулярность $\eta \times \phi$ (barrel)
Presampler	0,025×0,1
Слой 1 (Strip)	0,003×0,1
Слой 2 (Middle)	0,025×0,025
Слой 3 (Back)	0,05×0,025

- ЭМ калориметр состоит из 3-х продольных слоев и presampler'a
- 1-й слой (Strip) – для сепарации γ/π^0 вплоть до $E_T \sim 50$ ГэВ и точного определения η входящей частицы
- 2-й слой (Middle)– основной для измерения энергии э/м ливня
- 3-й слой (Back) - уточнение энергии э/м ливня, "утекающей" из калориметра
- Presampler - для уточнения координат и энергии ливня.

Внутренний детектор (трекер)



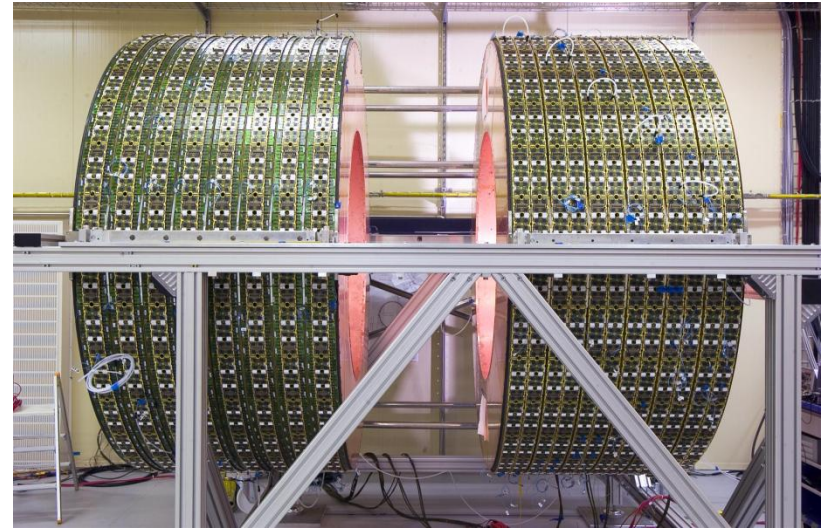
Внутренний детектор:

- **Пиксельный детектор:**
 - barrel - 3 слоя, 67М каналов
 - end-cap – 3 слоя 6,6М каналов
- **Полупроводниковый трекер SCT (Semi Conductor Tracker):**
 - barrel - 8 слоев, ~2М каналов
 - end-cap – 9 слоев, ~2М каналов
- **Детектор переходного излучения TRT (Transition Radiation Tracker):**
 - barrel - 73 слоев, ~53к каналов
 - end-cap - 160 слоев, ~123к каналов

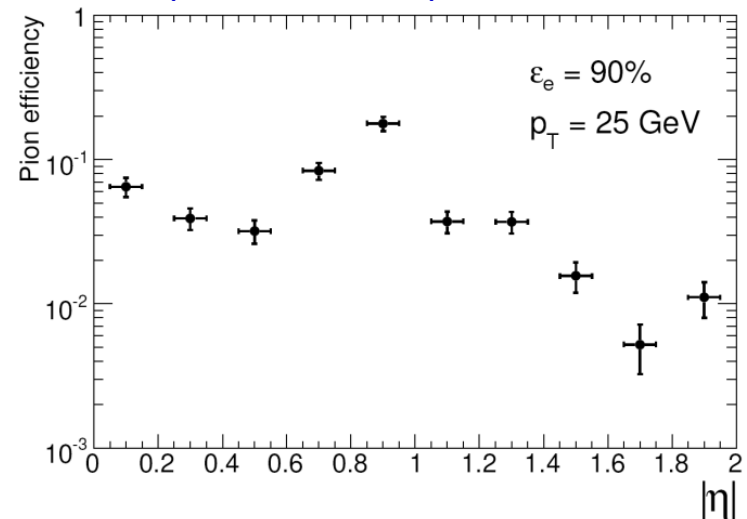
Детектор TRT

Детектор переходного излучения (Transition Radiation Tracker)

- Самый крупный детектор ПИ в мире
- Дрейфовые трубки диаметром 4 мм, наполненные газовой смесью на основе Хе, между которыми расположен радиатор в форме волокон (центральная часть) или пленок (торцевая часть)
- Важный вклад в общее разрешение по импульсу заряженных частиц
- Играет важную роль при идентификации электронов, взаимной проверке и дополнении калориметра, особенно при энергиях меньше 25 ГэВ
- Вносит вклад в реконструкцию и идентификацию сегментов электронных треков от фотонных конверсий вплоть до 1 ГэВ и электронов, которые оставили значительную часть энергии в кремниевых детекторах



Эффективность идентификации пионов при фиксированной эффективности идентификации электронов



Эффективность трекинга и восстановления конверсий

Восстанавливаются треки с $p_T > 0,5$ ГэВ и $|\eta| < 2,5$.

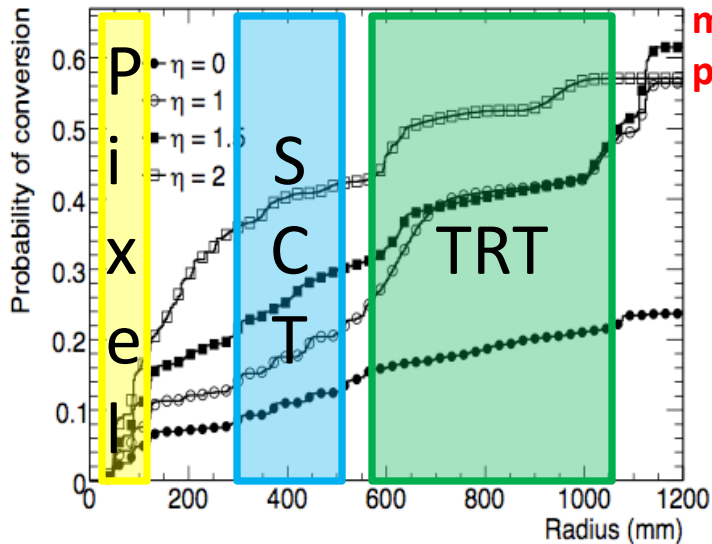
Существует три алгоритма поиска треков:

- Inside-out (начиная от пикселей/SCT, экстраполируя в TRT)
- Outside-in (начиная с TRT, экстраполируя к пикселям)
- Только TRT

Хорошая эффективность в большей части детектора для треков с небольшим импульсом

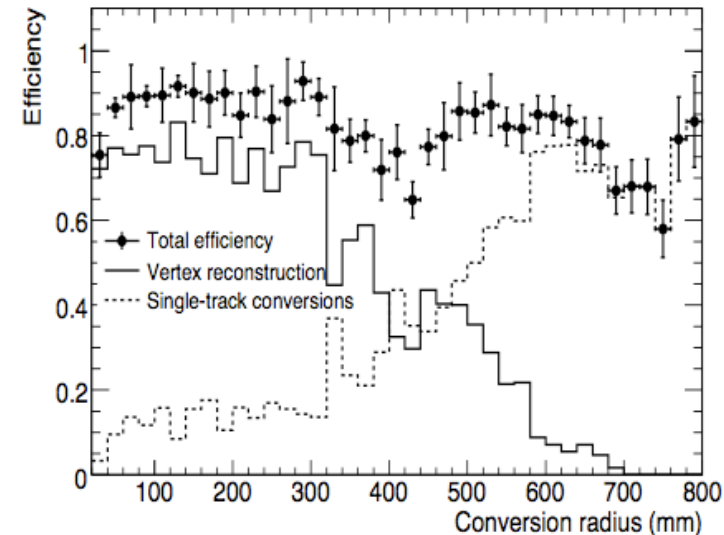
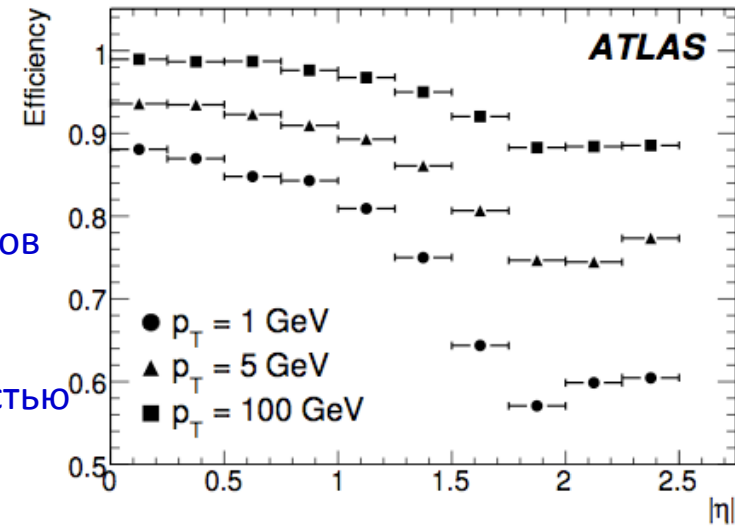
- 10-50% фотонов конвергируют до выхода из SCT
- Для $R_c < 50$ см, вершины конверсий находятся с эффективностью $\sim 80\%$, для больших радиусов, ищутся треки только в TRT для увеличения эффективности

• Эффективность восстановления конверсии $\sim 80\%$ для $R_c < 80$ см



7 апреля 2009 г.

Single-electron tracking efficiency



ПИЯФ, семинар ОФВЭ

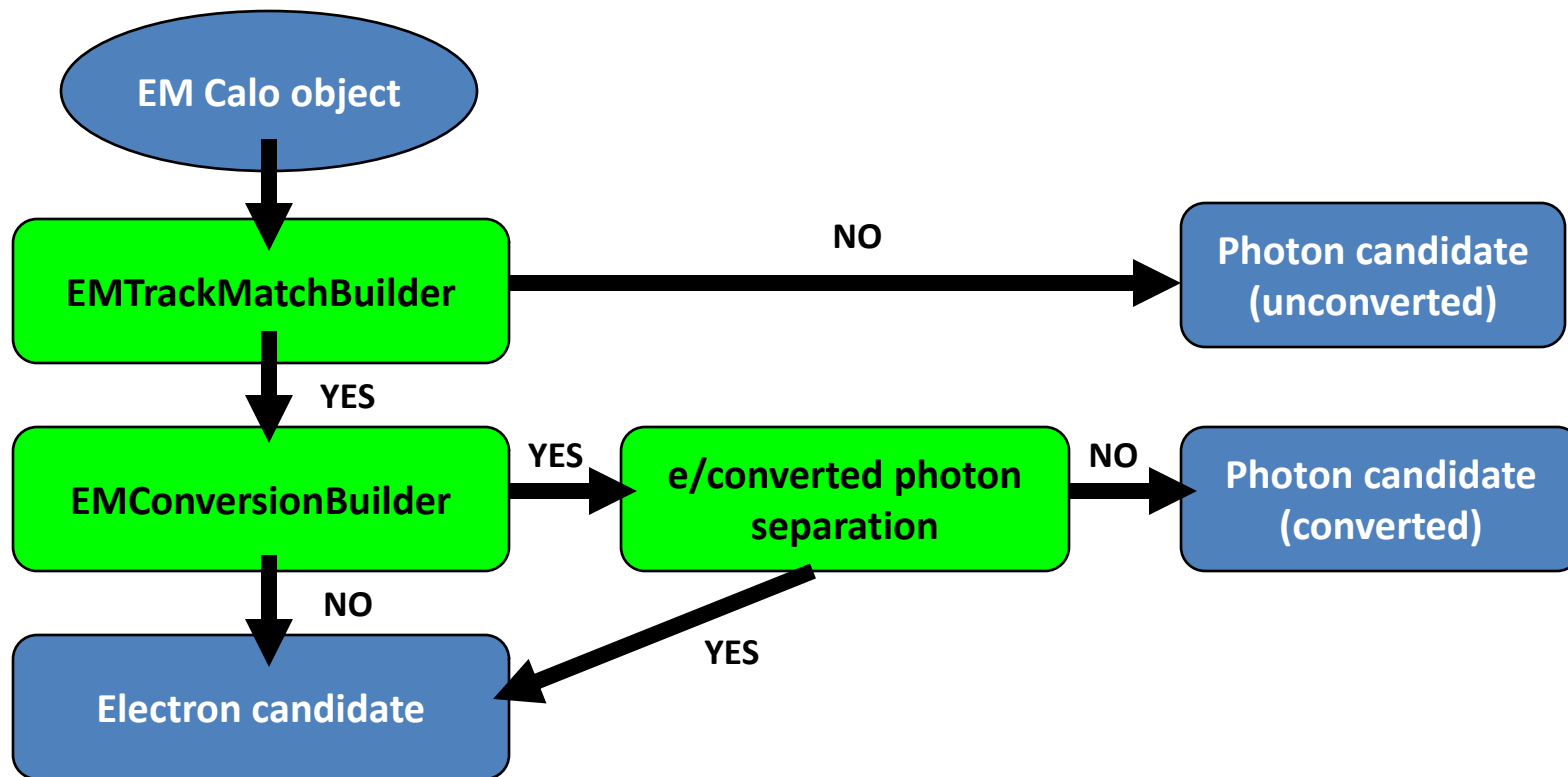
9

Описание работы алгоритма реконструкции

Реконструкция и идентификация электронов и фотонов осуществляется в несколько этапов:

- Начинается с калориметрических ячеек, прокалиброванных по энергии
- Строится **кластер**, используя фиксированное окно $\Delta\eta \times \Delta\phi = 5 \times 5$ ячеек вокруг локального максимума по энергии. Положение кластера определяется как положение центра тяжести энергии в окне;
- "Сшиваем" ($\Delta\eta$, $\Delta\phi$) кластер с **треками**, подходящими по энергии ($E/p < 10$) и проверяем **гипотезу** о природе частицы:
 - Электрон – есть трек, "сшитый" с кластером,
 - Конвертировавший фотон - есть трек, "сшитый" с кластером и алгоритм восстановления конверсии определил, что этот трек от конверсии
 - Фотон – нет трека
- Ранняя классификация позволяет применять различную корректировку к электронным и фотонным кандидатам
- Заново строим кластер:
 - Размер зависит от гипотезы частицы e/γ и области калориметра (EC/barrel)
 - Применяются калибровки для кластеров
- Вычисляем дискриминирующие переменные, чтобы подавить фон (струи) и отобрать e/γ
 - Простые отборы (cuts)
 - Мультивариационные методы: (likelihood, H-матрица, etc)

Диаграмма работы ПО алгоритма реконструкции



Коррекция положения кластера по η и ϕ

В зависимости от гипотезы о типе частицы используется разный размер кластера. Для электрона кластер шире, т.к. электрон дает более широкий ливень и трек изогнут в магнитном поле:

– Barrel:

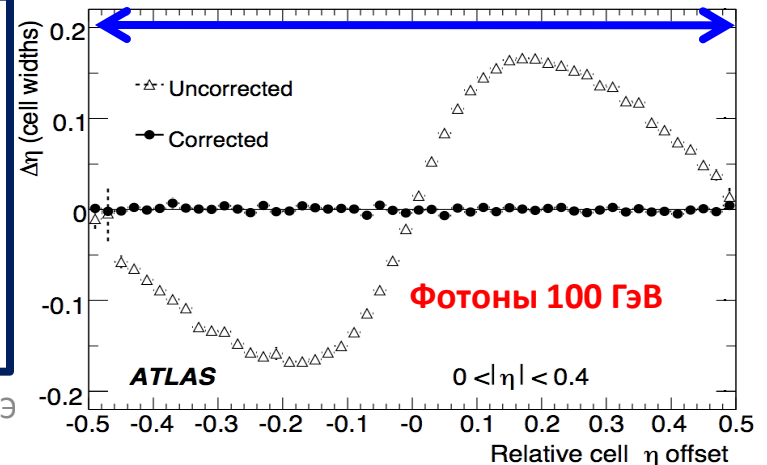
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 3 \times 7$ для электронов
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 3 \times 5$ для фотонов
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 5 \times 5$ для конвертировавших фотонов

– End-cap: $\Delta\eta \times \Delta\phi = 5 \times 5$ и для электронов, и для фотонов

Позиция кластера **по η** вычисляется в каждом слое калориметра отдельно как центр тяжести распределения энергии по ячейкам кластера. Из-за дискретности измерения по η возникает S-образная форма зависимости между измеренным положением максимума и реальным. Для коррекции используется МС. Строится эмпирическая функция и путем фитирования определяются её параметры. Параметры слабо зависят от типа частицы e/γ и энергии

Положение кластера **по ϕ** так же корректируется, но только во 2-м слое калориметра (Middle), т.к. у него наилучшая гранулярность по ϕ . Ошибка в измерении ϕ зависит от длины ливня относительно к аккордеонной структуре калориметра

1 ячейка во 2-м слое калориметра



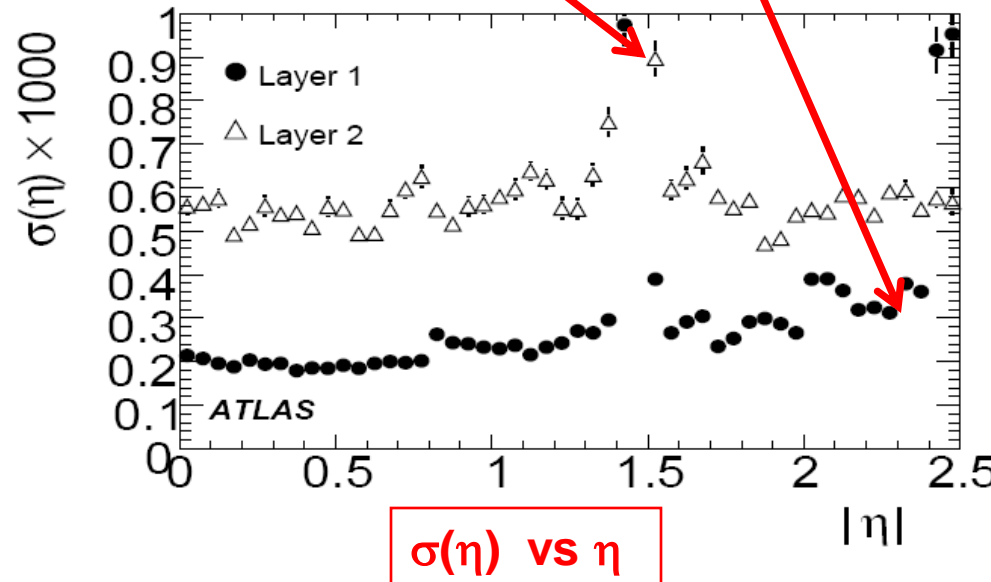
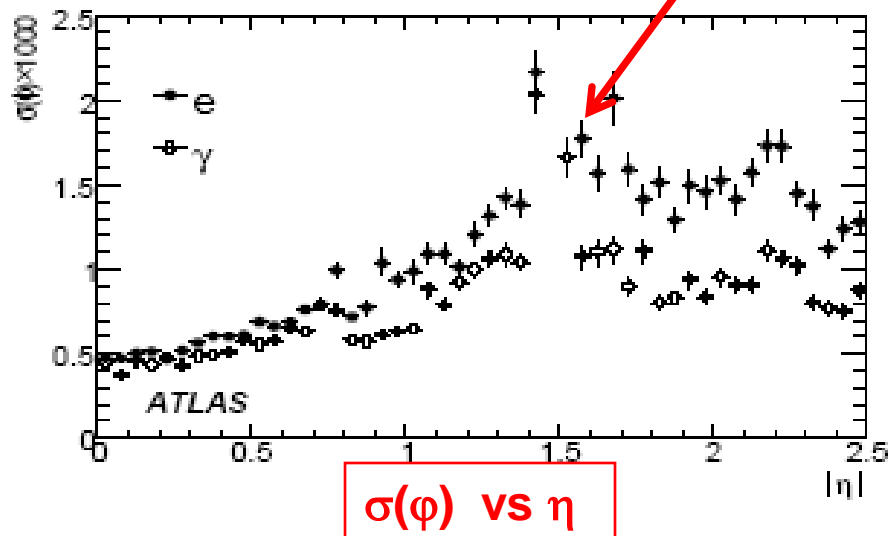
Разрешение по η и ϕ

После всех коррекций по η и ϕ

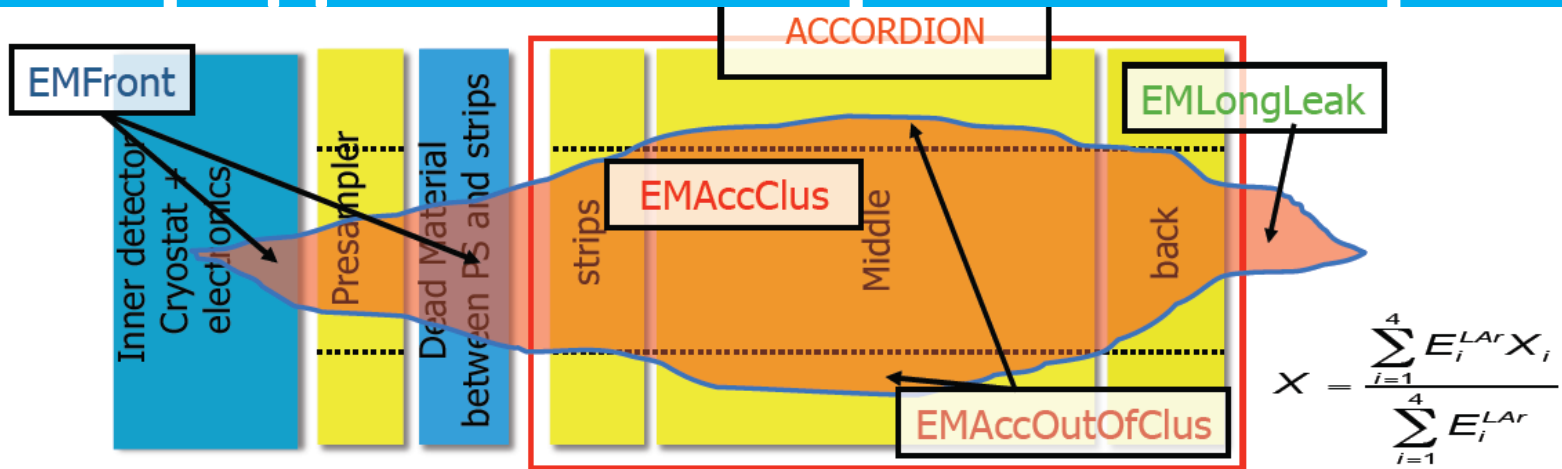
- Разрешение **по η** для $\gamma \sim 3 \times 10^{-4}$ в 1-ом слое (Strip) и $\sim 6 \times 10^{-4}$ во 2-ом слое (Middle) калориметра
- Разрешение **по ϕ** $0,5-1,5 \times 10^{-3}$

Переходная область EC-barrel.
Дополнительное вещество перед калориметром

Гранулярность в 1-ом слое



Определение энергии кластера



$$E^{reco} = F(E_{acc}^{reco}, \eta) \cdot E_{ps}^{cl IAr} + S_{acc}(X, \eta) \cdot \left(\sum_{i=13} E_i^{cl IAr} \right) (1 + C_{out}(X, \eta)) \cdot (1 + f_{leak}(X, \eta))$$

Energy deposited in front of calo

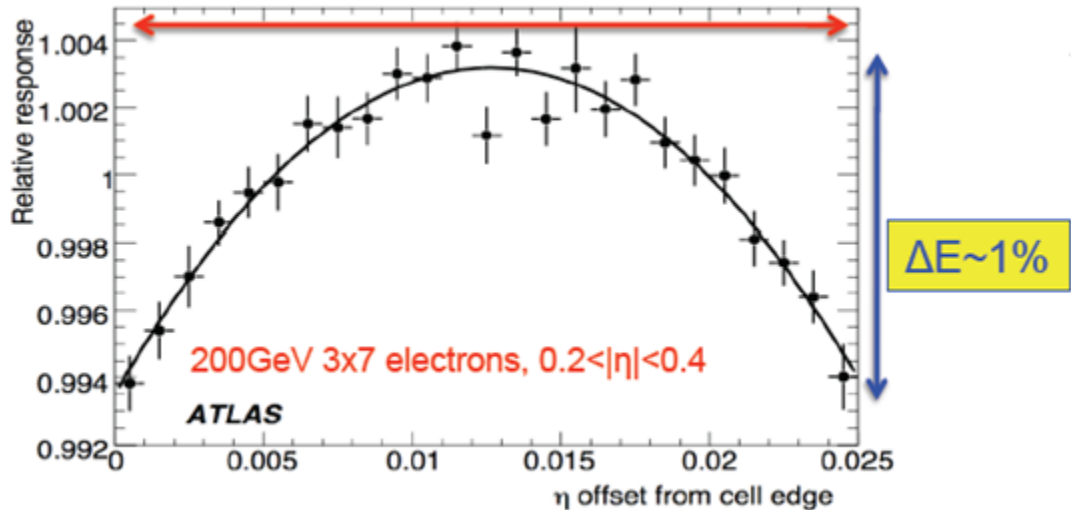
Energy deposited into the cluster

Energy deposited out of cluster

Energy deposited behind calo

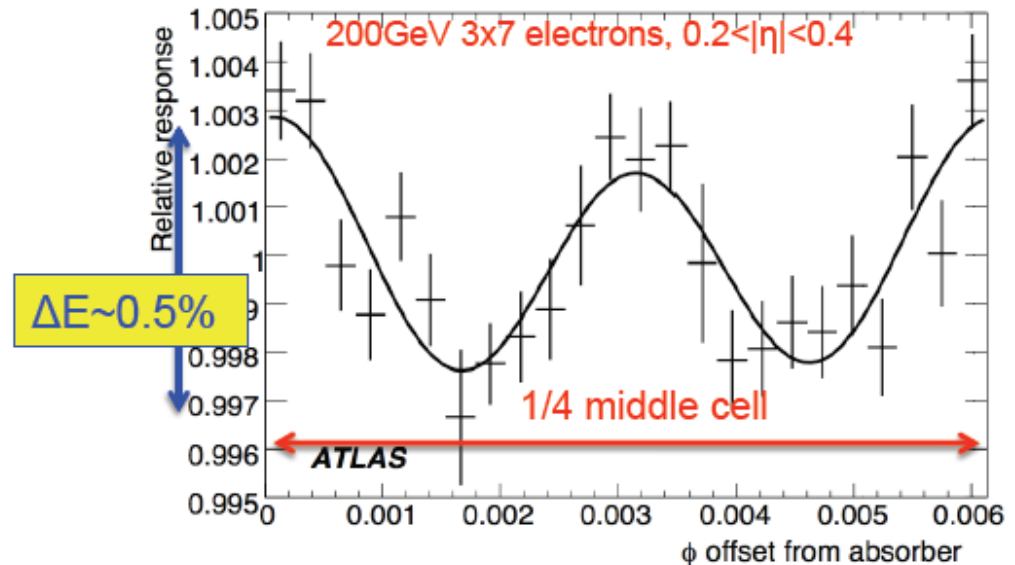
- **Суммируем** энергию, выделенную в каждом слое калориметра и presampler.
- Вводим **поправки** на энергию выделенную: перед калориметром, после калориметра и вне размеров кластера.
- Поправки параметризуются как функции продольного положения центра тяжести X кластера и η . Параметры функций определяются симуляцией.
- Энерговывделение в **пассивном веществе** изучалось путем использования специальной симуляции (калибровочные хиты).

Коррекция модуляций энергии кластера по η и ϕ

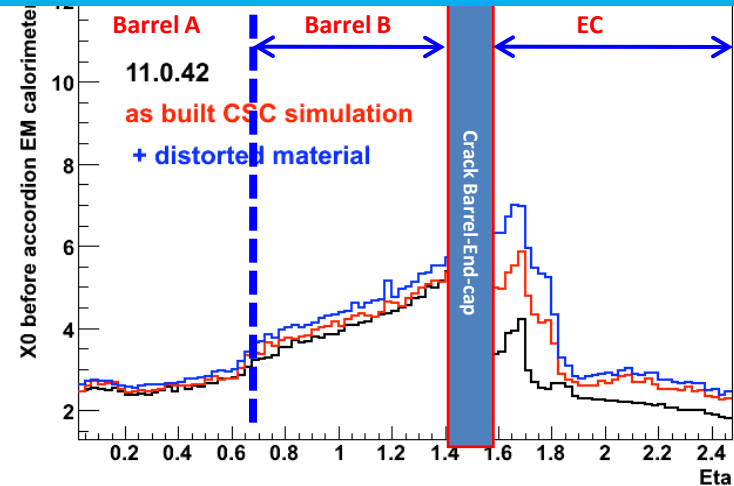
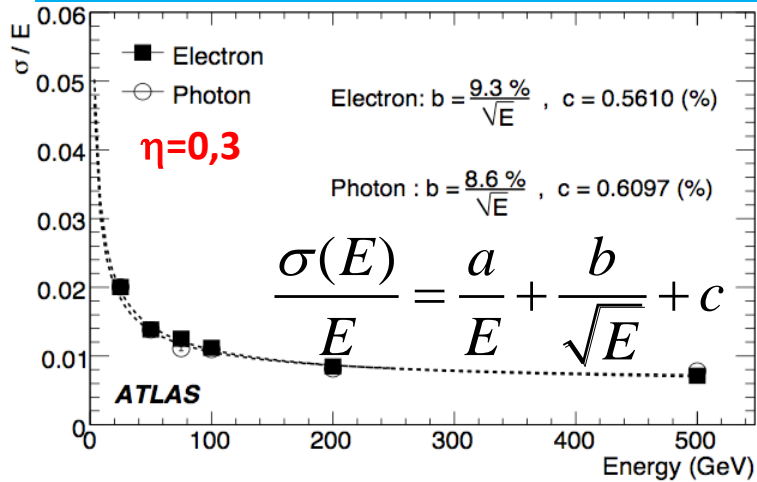


Модуляция по η возникает из-за конечного размера ячейки калориметра.

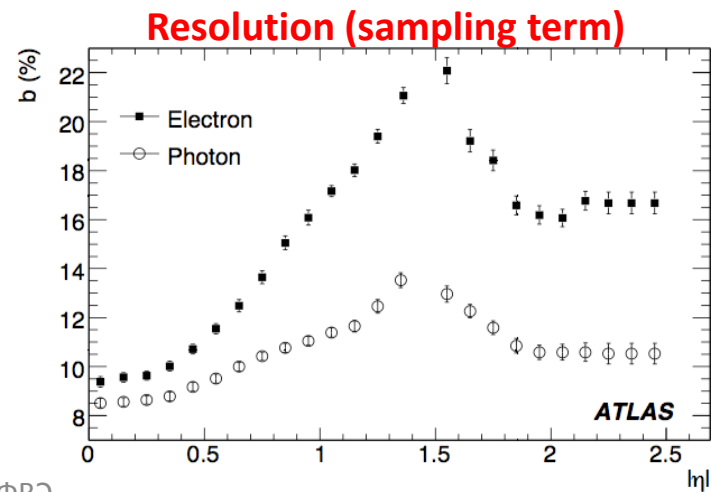
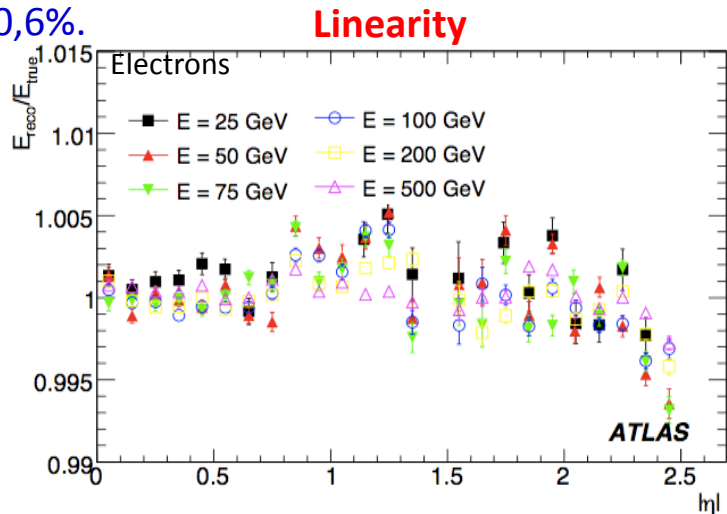
Модуляция по ϕ отражает внутреннюю структуру ячейки калориметра (чередование электродов и поглотителей).



Разрешение и линейность э/м калориметра



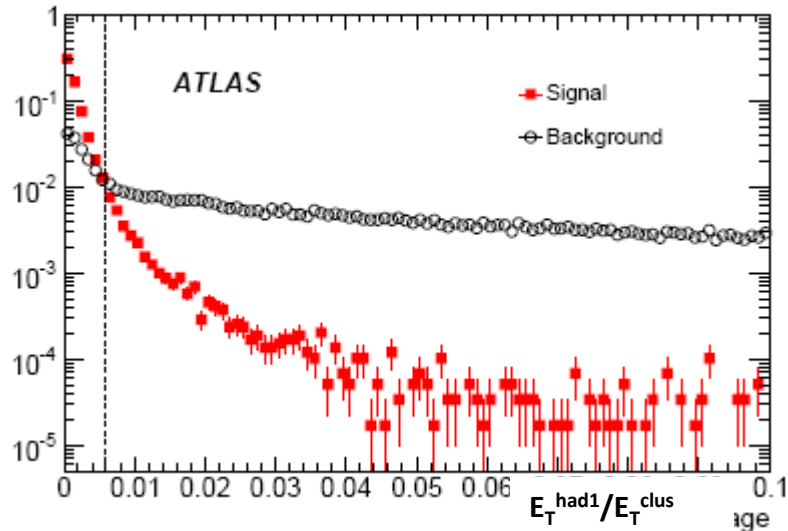
- Количество в-ва перед электромагнитным калориметром для реального детектора оказалось значительно больше, чем оценивалось изначально (!!!! Сюрпризы еще впереди)
- Линейность (E_{reco}/E_{true}) лучше 0,5% и для электронов, и для фотонов
- Sampling term для электронов меняется от ~8% в центре до 22% в торцевой части. Постоянный член <0,6%.



Идентификация e/γ - калориметрические переменные

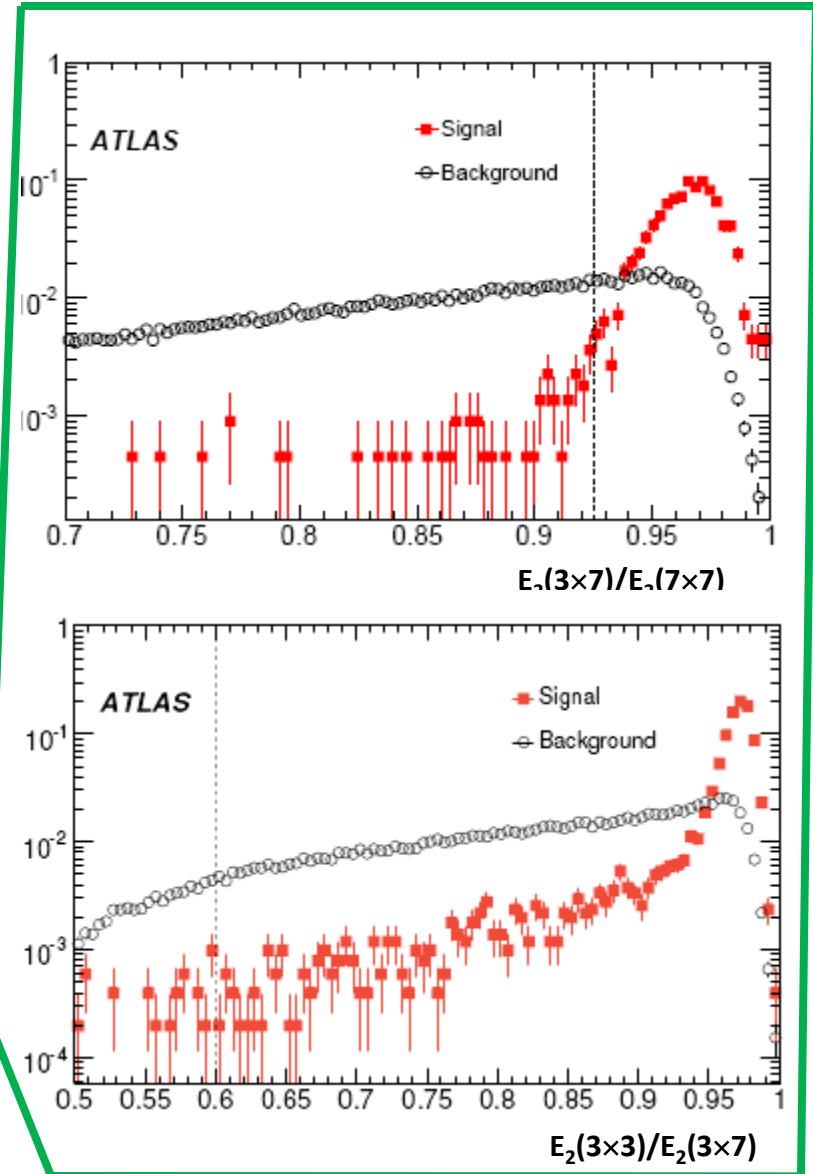
Переменные, используемые для идентификации фотонов и электронов и подавления фона от КХД струй:

- Утечка в адронный калориметр $E_T^{\text{had1}}/E_T^{\text{clus}}$

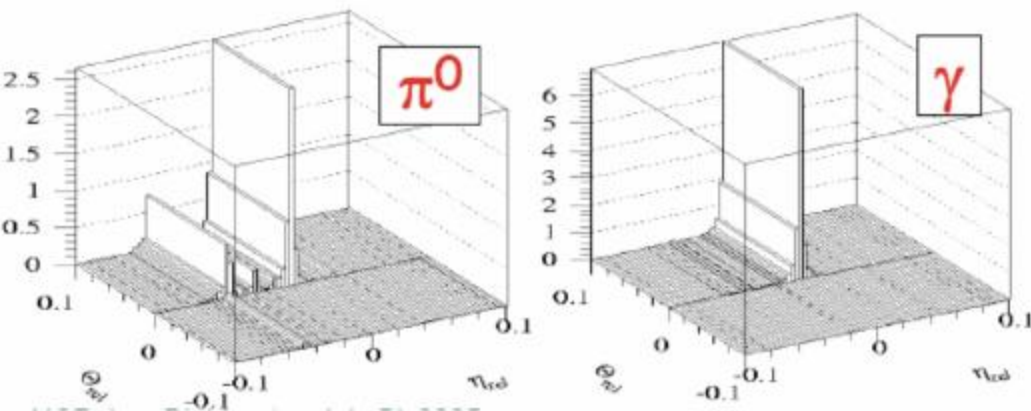


- Использование особенностей энерговыведения в 2-ом слое ЭМ калориметра $E(3 \times 7)/E(7 \times 7)$, $E(3 \times 3)/E(3 \times 7)$ (фотоны)

- Фотоны от распада $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Фон струй от КХД жестких процессов

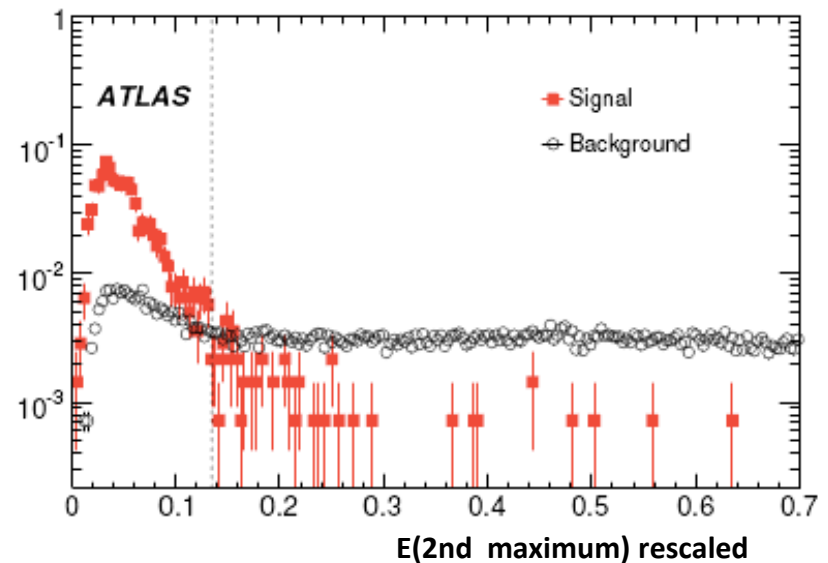
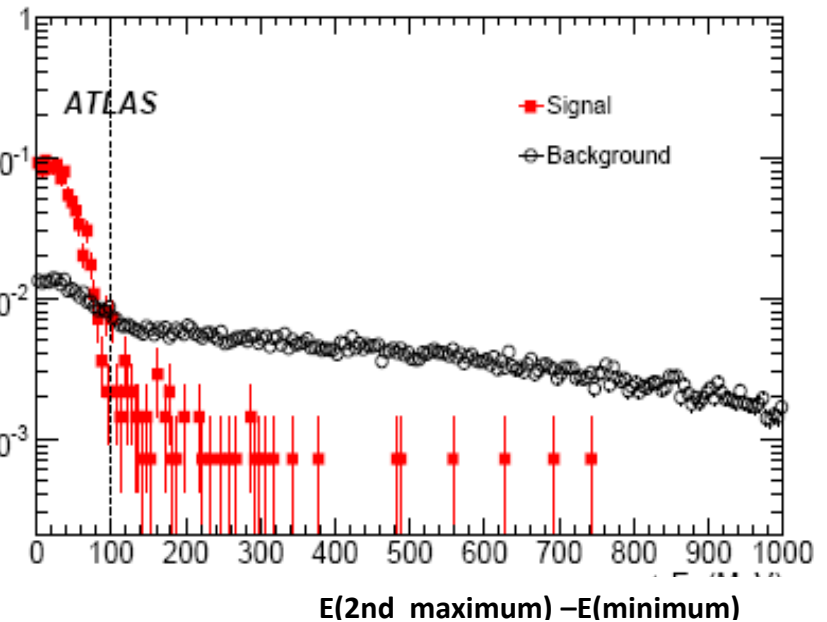


Идентификация e/γ - калориметрические переменные



Для отделения изолированных фотонов от КХД струй содержащих π^0 используются особенности энерговыведения в 1-ом слое (Strip), имеющем высокую гранулярность по η . Для пионов должно быть два отдельных пика (распад на два фотона), в то время, как для фотонов только один.

- Фотоны от распада $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Фон струй от КХД жестких процессов



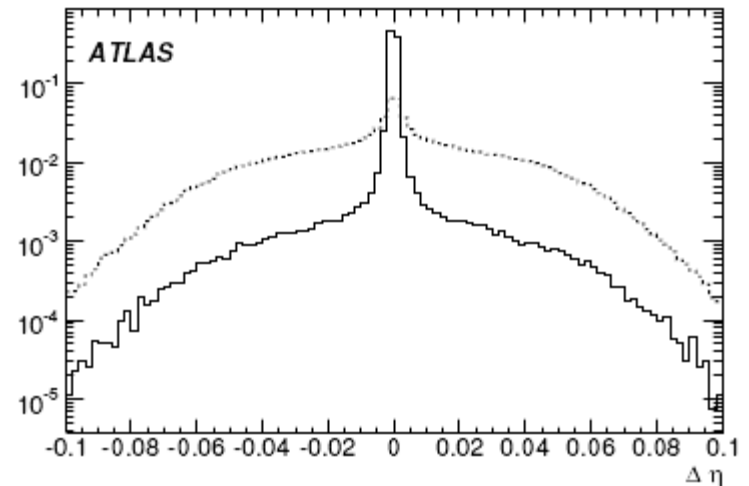
Идентификация e/γ - трековые переменные

Только для электронов применяются переменные, связанные с треком:

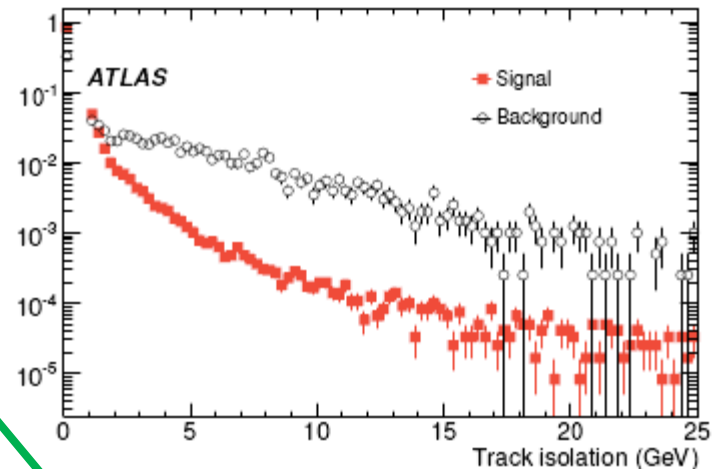
- Качество трека:
 - число хитов в пиксельном детекторе
 - число хитов во всех кремниевых детекторах (пиксели+SCT)
 - число хитов в TRT
 - прицельный параметр
- Количество хитов в TRT от переходного излучения

- Изоляция кластера

Качество сшивки трека с кластером ($\Delta\eta$ и $\Delta\phi$, E/p) – для электронов



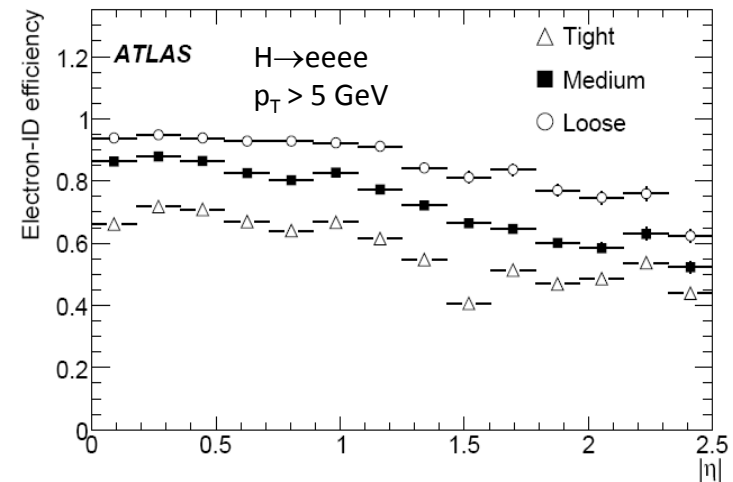
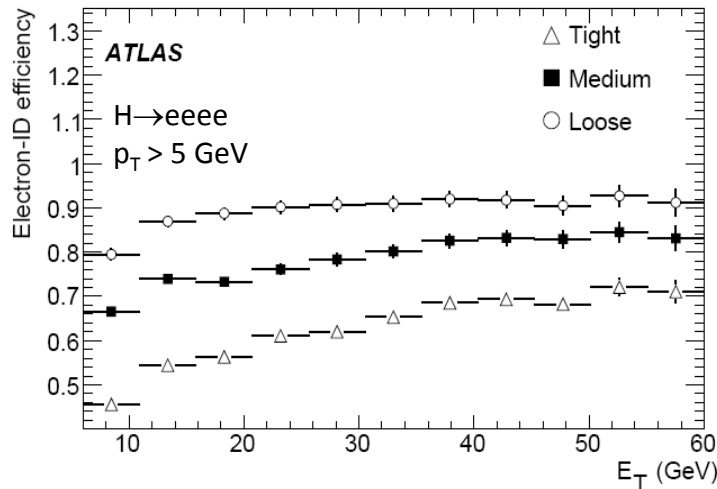
Изоляция в калориметре – для фотонов



Идентификация электронов – метод дискриминационных переменных

- Используется три набора переменных – Loose, Medium и Tight, которые используют следующие переменные:
 - **Loose** – утечка в адронный калориметр, форма ливня во 2-ом слое э/м калориметра
 - **Medium** - Loose + форма ливня в 1-ом слое, сшивка трека, число хитов в Pixel и SCT
 - **Tight** - Все доступные переменные – Medium + TRT + число хитов в 1-м слое Pixel

Отбор	Эффективность (%)	Режекция струй
Loose	88	560
Medium	77	2200
Tight	64	10^5



Состав фона

Доля оставшихся кандидатов делится на следующие категории:

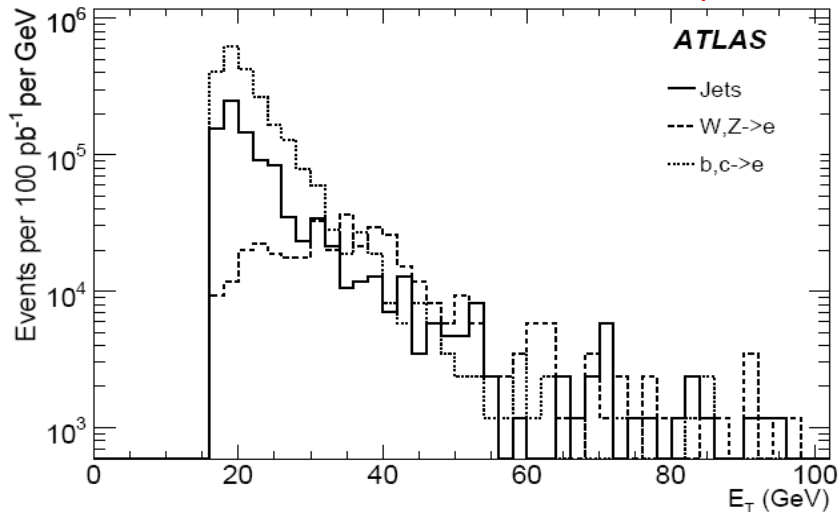
- изолированные электроны – от распадов W, Z и t-кварка
- неизолированные – от распадов b- и c-кварков

Оставшийся фон разделяется на 2 категории:

- электроны от фотонных конверсий и далацевские распады (первый член в скобках)
- заряженные адроны (второй член)

	di-jet $E_T > 17$ GeV			min. bias $E_T > 8$ GeV	
Набор отборов	Изолированные	Неизолированные	Струи	Неизолированные	Струи
Medium	1,1%	7,4%	91,5% (5,5%+86,0%)	9,0%	91,0% (5,0%+86,0%)
Tight	10,5%	63,3%	26,2% (8,3%+17,9%)	77,8%	22,2% (7,1%+15,1%)

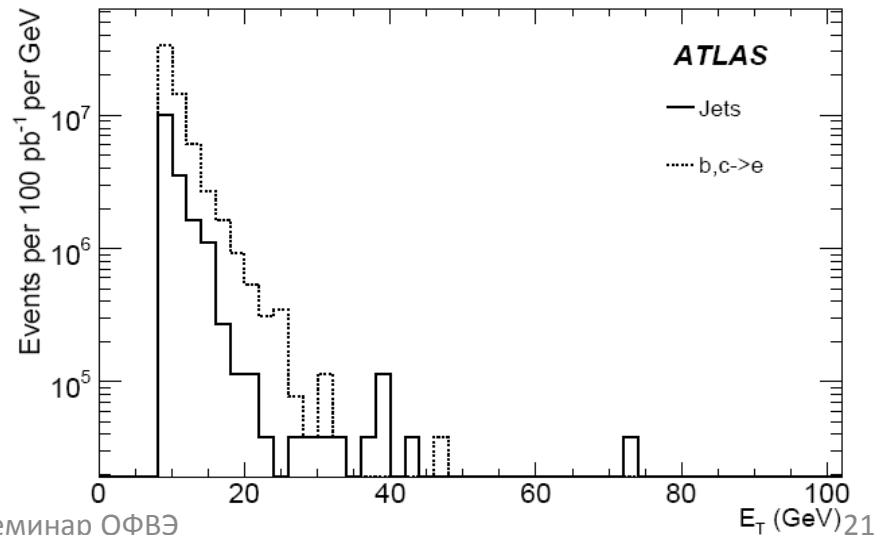
di-jet $E_T > 17$ GeV



7 апреля 2009 г.

ПИАФ, семинар ОФВЭ

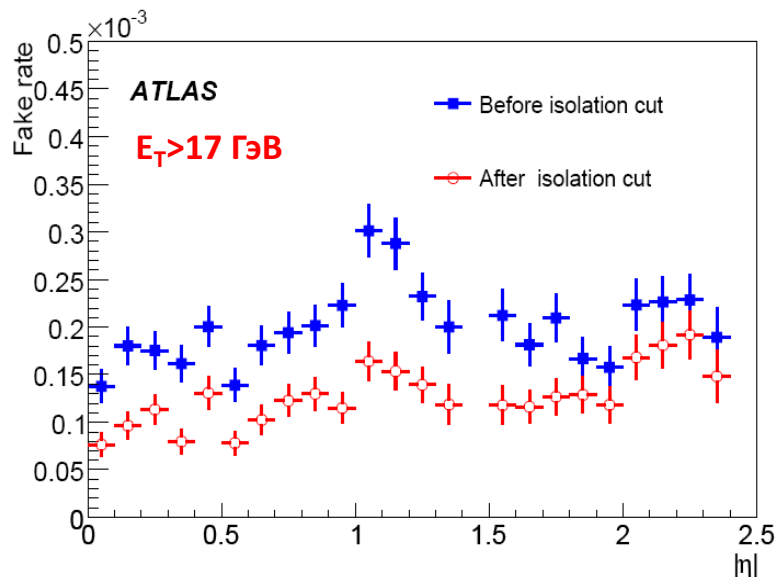
min.-bias $E_T > 8$ GeV



E_T (GeV) 21

Идентификация фотонов

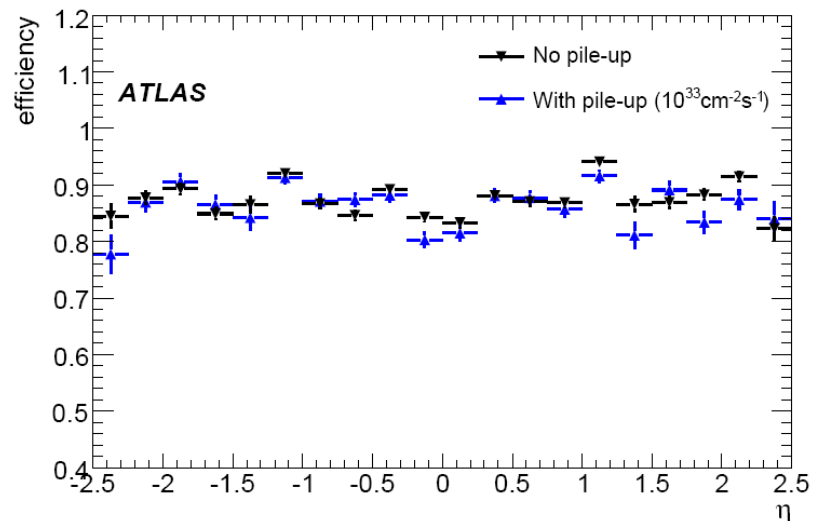
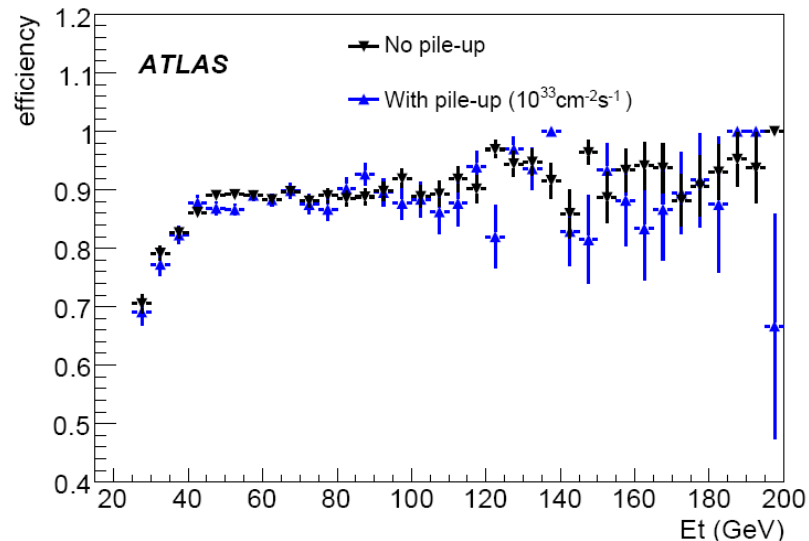
Fake rate = 1/jet rejection



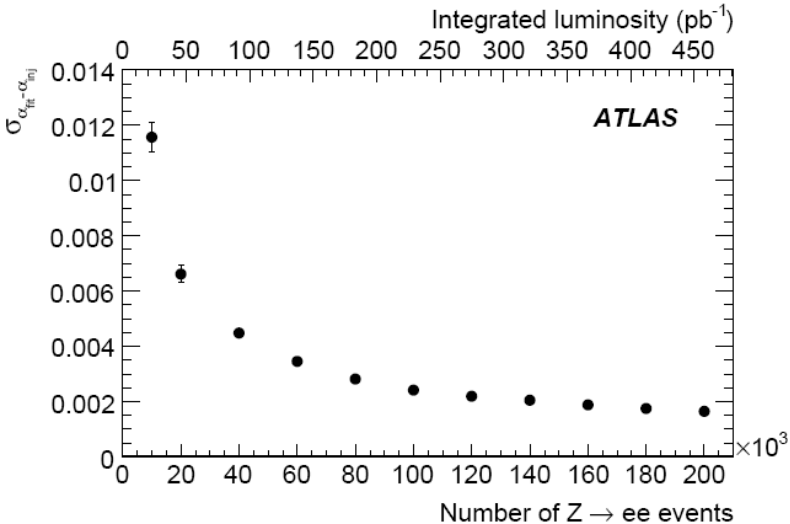
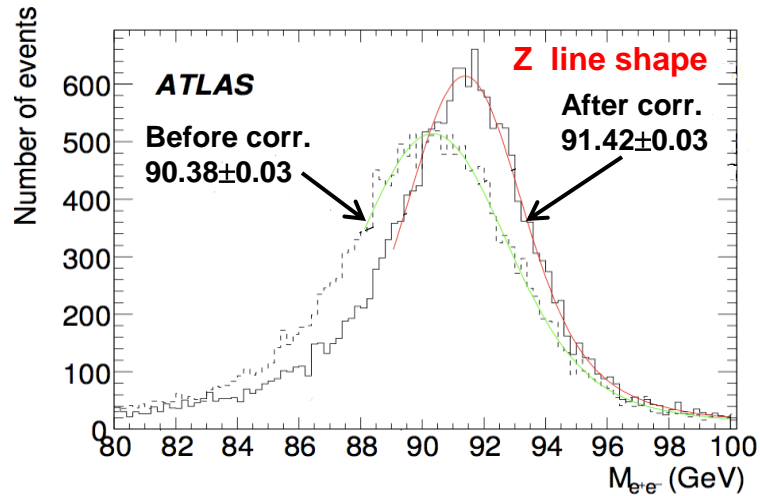
Для идентификации фотонов используются такие же переменные (и условие на отсутствие сшивки с треком):

- Только один predetermined набор переменных, т. к. фон от КХД струй остается все равно большим!!!
- Общая эффективность $\sim 80\%$, с коэффициентом режекции ~ 8000 (при применении условия изоляции)
- Коэффициент режекции сильно зависит от партона:
 - Для глюонов $\sim 3 \cdot 10^4$
 - Для кварков $\sim 3 \cdot 10^3$

- Фотоны от распада $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Фон струй от КХД жестких процессов



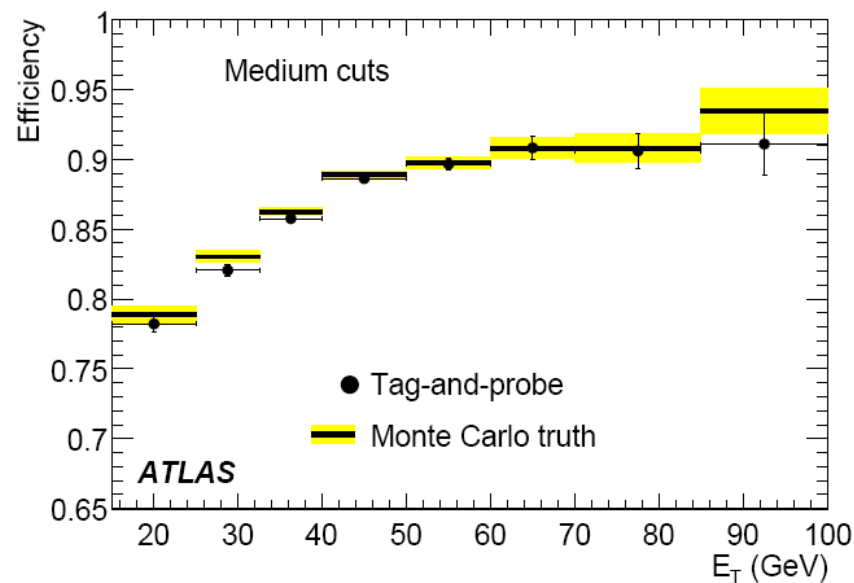
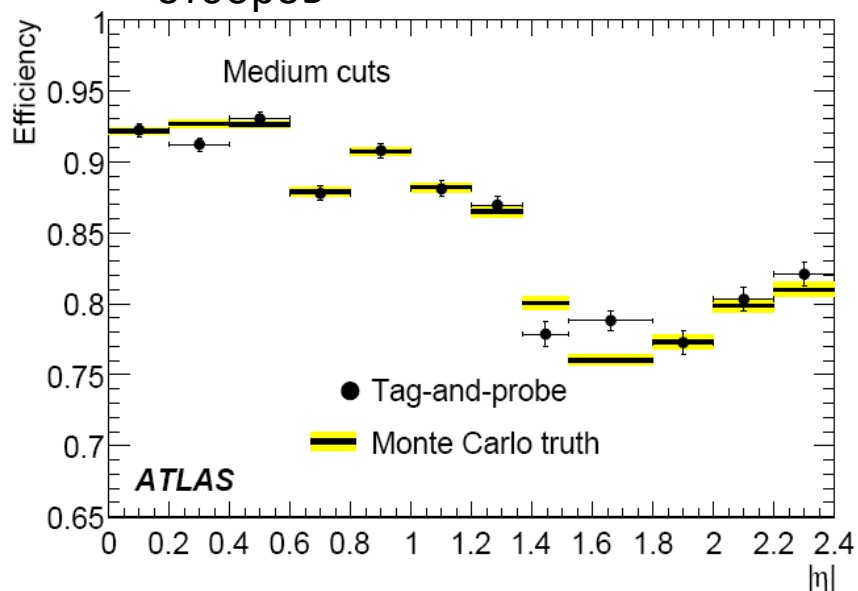
Калибровка ЭМ калориметра в процессе $Z \rightarrow ee$



- Известно из результатов тестовых пучков – отклик ЭМ калориметра однороден $<0,5\%$ только в области $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0,2 \times 0,4$
- Причина – неоднородность температуры, HV, распределение материала перед калориметром
- Необходимо сделать перекалибровку 384 локальных областей ЭМ калориметра
- Цель - global constant term в разрешении калориметра $<0,7\%$
- Идея – использовать $Z \rightarrow ee$ данные , что позволит также провести дополнительную энергетическую калибровку с точностью $\sim 0,1\%$
- С использованием симуляции строится референсная (свертка RBW и функции разрешения) форма распределения для инвариантной массы $Z \rightarrow ee$
- Измеренная энергия параметризуется для каждой области $E_{\text{reco}_i} = E_{\text{true}_i} (1 + \alpha_i)$
- Путем фитирования экспериментальной формы распределения по инвариантной массе с референсной определяются параметры α_i
- Параметры α_i используются далее для поправок измеряемой энергии в ЭМ калориметре
- Точность метода сильно зависит от точности описания пассивного вещества в детекторе перед калориметром

Измерение эффективности реконструкции/идентификации электронов

- Экспериментальные неопределенности идентификации электронов – основной источник систематических ошибок. Необходимо измерить из данных, а не только определять из МС.
- Идея tag&probe метод и данные $Z \rightarrow ee$:
 - Выбирается электронные пары с инвариантной массой вблизи массы Z бозона
 - Один электрон (tag) должен пройти все отборы идентификации. Отборы самые жесткие, чтобы подавить максимально фон под Z пиком
 - Используя отобранные данные можно определить эффективность регистрации второго электрона (probe) при прохождении определенного (любого) набора отборов



Заключение

- Идентификация и реконструкция электронов и фотонов является важной составляющей для изучения процессов СМ и поиска новой физики на БАК
- Алгоритмы реконструкции и идентификации e/γ достаточно хорошо развиты и проверены на МС, космическом излучении и данных тестовых пучков
- Процедура калибровки калориметра была отработана на тестовых пучках. Абсолютная шкала энергии для э/м калориметра известна с точностью $\sim 2\%$, линейность измерения энергии лучше $\sim 0,5\%$ для диапазона энергий 20-250 ГэВ
- Обозначен круг приоритетных задач, которые будут изучаться при наборе первых данных:
 - Изучение относительной выстройки э/м калориметра к внутреннему детектору
 - Определение энергетической шкалы и калибровка ЭМ калориметра по распадам $Z \rightarrow e\bar{e}$
 - Настройка алгоритмов реконструкции и идентификации e/γ
 - Измерение (из данных, а не из МС!) эффективности реконструкции и идентификации электронов (tag&probe метод)
 - Изучение распределения вещества перед калориметром с помощью конверсии
 - Изучение min.bias событий и определение соотношения E/p (калориметр к трекеру)