

Оценка фонов в распадах Z -бозонов на детекторе АТЛАС

3 июля 2020 г.

Выполнила: Зубова Н.С.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Солдатов Е.Ю.

- Фотоны участвуют во многих физических исследованиях, связанных с проверкой Стандартной модели ($H \rightarrow Z\gamma$, $H \rightarrow \gamma\gamma$) и поиском «новой физики» ($G \rightarrow \gamma\gamma$, $\chi_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$).
- Основным фоном являются адронные струи, неправильно идентифицированные детектором, как фотоны.
- Отбор сигнальных событий осуществляется посредством различных ограничений на параметры соответствующего ливня в электромагнитном калориметре (идентификация), и условием изолированности кандидата от других частиц в событии (изоляция).
- Оптимизация данных критериев позволит производить более точную оценку соотношения сигнала к фону в событии для экспериментальных данных.

Цель работы: оптимизация изоляционного ограничения для увеличения эффективности отбора сигнальных событий.

Задачи работы

- Сравнить распределения изоляционной поперечной энергии в конусе $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} = 0.2$ и $\Delta R = 0.4$ вокруг фотона для смоделированных данных и экспериментальных данных с ускорителя.
- Сравнить фитирование этих распределений различными функциями, и вычислить разницу между положениями пиков этих распределений относительно друг друга. Полученные результаты применяются для корректировки смоделированных данных.
- Сравнить количество оцененного сигнала до и после применения корректировок по калориметрической изоляции двумерным методом боковых интервалов и методом шаблонного фитирования.

Эффективность отбора фотонов

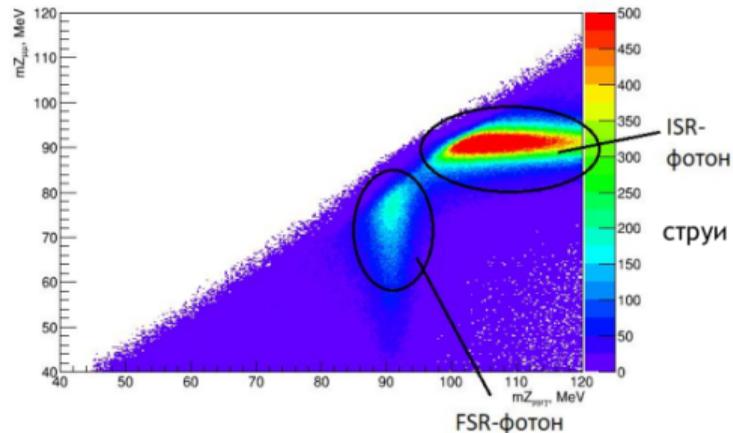
В данной работе для оценки эффективности изоляционного ограничения используется метод, основанный на чистом распаде Z -бозона с фотоном в конечном состоянии ($Z \rightarrow \ell\ell\gamma$).

Данный метод используется для фотонов с энергиями 10-100 ГэВ.

Применяются следующие ограничения на двух- и трехчастичную массу для отбора FSR-фотонов:

$$40 < m_{\ell\ell} < 83 \text{ ГэВ}$$

$$80 < m_{\ell\ell\gamma} < 100 \text{ ГэВ}$$



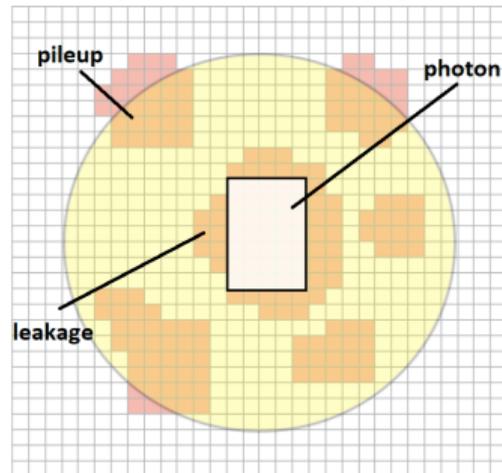
Двумерное распределение двухчастичной массы от трехчастичной

Идентификация и изоляция

Идентификационное ограничение – набор переменных, связанных с характеристиками э/м ливня, который рождает фотон в калориметре («tight» и «loose» - идентификация).

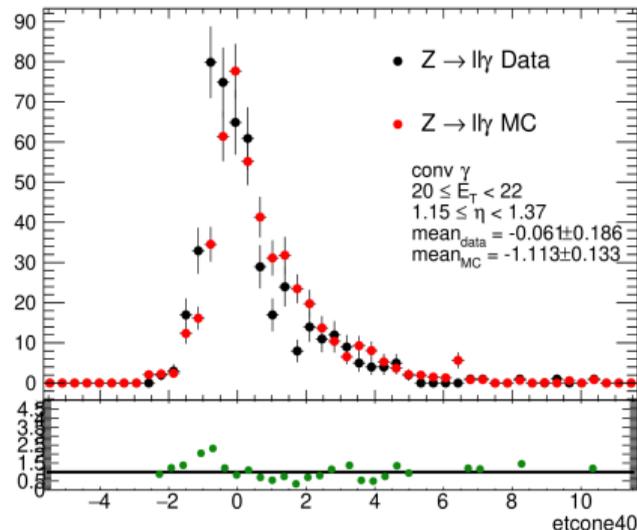
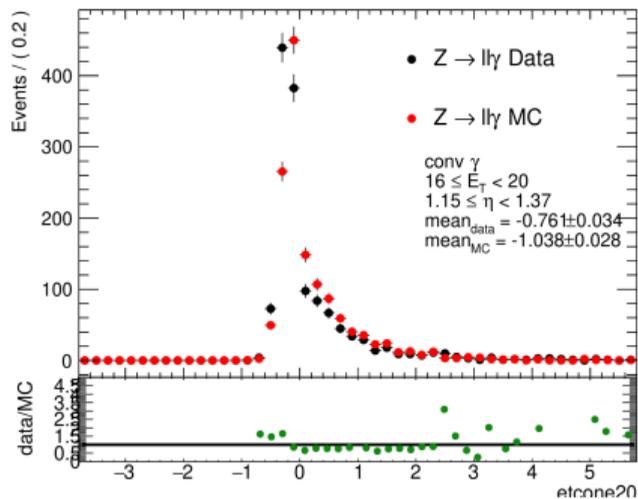
Изоляционное ограничение:

- трековая изоляция – сумма поперечных импульсов всех треков в конусе определённого радиуса;
- калориметрическая изоляция – сумма поперечной энергии топологических кластеров в электромагнитном калориметре в определенном конусе после вычитания энергии самого фотона и с поправкой на пайлап («tight» и «loose» - изоляция).



Схематическое изображение расчета калориметрической изоляции

Распределения переменных калориметрической изоляции

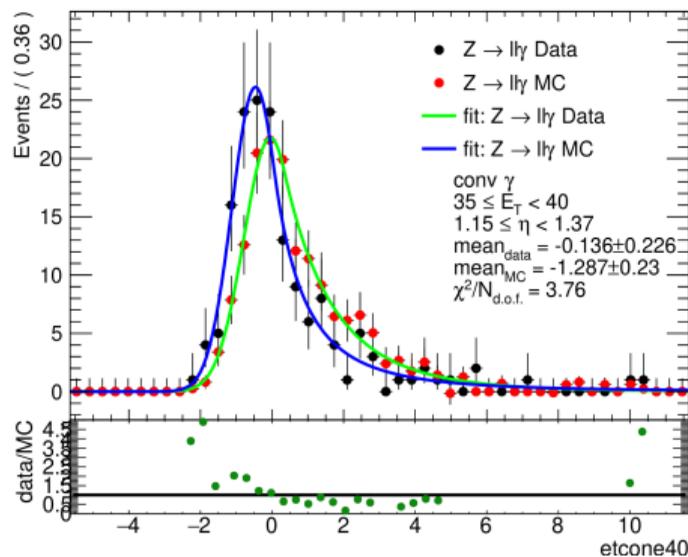
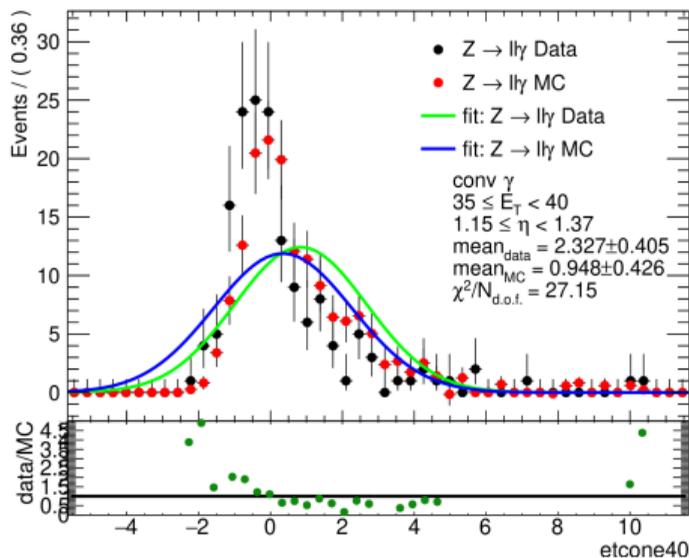


Распределения калориметрической изоляции в конусе $\Delta R < 0.2$ и $\Delta R < 0.4$ для экспериментальных данных и смоделированных данных.

Наблюдаются различия в позиции пиков распределений калориметрических изоляционных переменных между смоделированными и экспериментальными данными, вследствие недостатков моделирования ливней в электромагнитном калориметре. Смоделированные данные корректируются сдвигом с поправкой на экспериментальные.

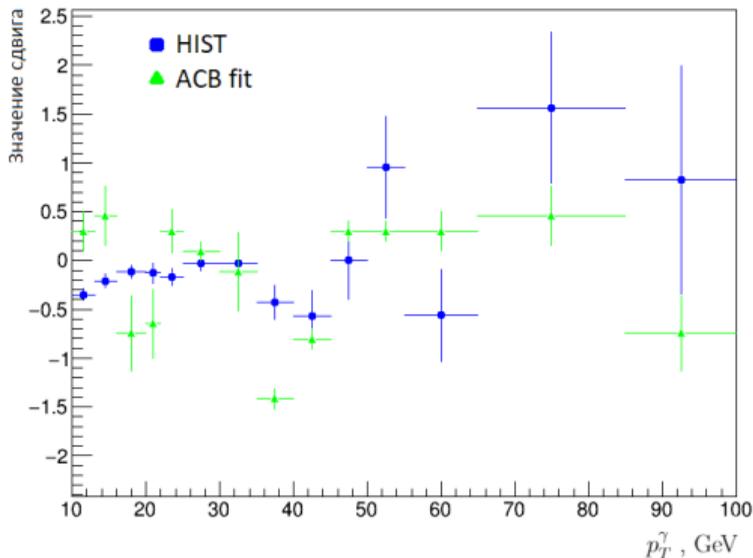
Распределения изоляционных переменных и их фитирование

Рассчитывать сдвиги также можно из фитирования распределений различными функциями.



Распределения по $E_T^{\text{iso}} |_{\Delta R < 0.2}$ и их фитирование функцией Гаусса (слева) и функцией ACB (справа) для экспериментальных данных и MC-данных. Функция ACB более точно описывает форму распределения.

Разница пиков распределений в зависимости от поперечной энергии фотона



Разница пиков в распределениях, полученные из распределений и из фитирования распределений функцией АСВ для различных значений поперечной энергии фотонов ($0 < \eta^\gamma < 0.6$).

При высоких значениях поперечного импульса фотона разница пиков, полученная из фитирования функцией АСВ имеет меньшее значение и стат. ошибку.

Оценка фона с помощью двумерного метода боковых интервалов

	<i>(Isolated)</i>	<i>(Non-isolated)</i>
<i>"Low Quality" Photon Identification</i>	C (Control Region)	D (Control Region)
<i>Standard Photon Identification</i>	A (Signal Region)	B (Control Region)

Isolation Energy [GeV]

В рамках данной работы одним из методов оценки вклада фона в данные является двумерный метод боковых интервалов. Он основан на построении областей, разделенных двумя почти некоррелирующими критериями ($R \approx 1.1$):

A: сигнальный – «tight»-идентификация и изоляция,

B – неизолрированные фотоны, «tight»-идентификация,

C – изолированные фотоны, «looseprime4»-идентификация,

D – неизолрированные фотоны, «looseprime4»-идентификация.

Оценка фона с помощью двумерного метода боковых интервалов

Можно оценить количество сигнальных событий в регионе А для экспериментальных данных по следующей формуле:

$$N_A^{sign} = N_A - (N_B - c_B N_A^{sign}) \frac{N_C - c_C N_A^{sign}}{N_D - c_D N_A^{sign}} R^{bkg},$$

где N_i – количество событий в i -м регионе, полученное из экспериментальных данных,

$$R^{bkg} = \frac{N_{A'}^{data} N_{D'}^{data}}{N_{B'}^{data} N_{C'}^{data}} - \text{корреляция между идентификацией и изоляцией},$$

$c_i = \frac{N_i^{sign}}{N_A^{sign}}$ ($i = B, C, D$) – коэффициенты утечки, которые рассчитываются из смоделированных данных.

Оценка фона с помощью двумерного метода боковых интервалов

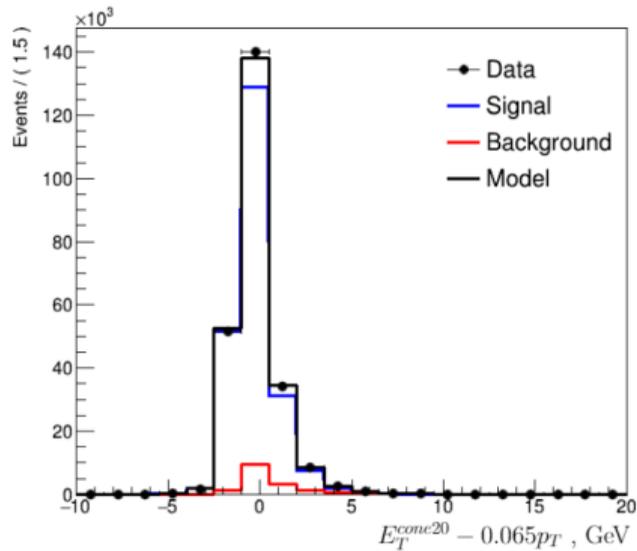
$$P = \frac{N_A^{sign}}{N_A} - \text{чистота событий в сигнальном регионе.}$$

$P = N_A^{sign} / N_A$	loose iso	loose iso corr	tight iso	tight iso corr
$10 < p_T < 15$ ГэВ	0.93 ± 0.01	0.95 ± 0.01	0.67 ± 0.02	0.74 ± 0.01
$15 < p_T < 20$ ГэВ	0.91 ± 0.01	0.93 ± 0.01	0.69 ± 0.01	0.72 ± 0.01
$20 < p_T < 100$ ГэВ	0.93 ± 0.01	0.94 ± 0.01	0.75 ± 0.02	0.79 ± 0.01

Для «loose»-изоляции значения чистоты, оцененные с помощью нескорректированных и скорректированных значений калориметрической изоляции, совпадают в пределах погрешностей.

Для «tight»-изоляции значения наиболее сильно различаются при низких значениях поперечного импульса фотона (до 7 %).

Метод шаблонного фитирования



Рассматриваются два региона:

А – сигнальный: все критерии сигнального отбора,

В – контрольный: фотоны не прошедшие «tight»- идентификацию, но прошедшие «looseprime4»- идентификацию.

Число сигнальных событий в регионах А и В оценивается из смоделированных данных. Оценка числа сигнальных событий в экспериментальных данных производится путем нормирования на число фоновых событий в регионах А и В.

Метод шаблонного фитирования

$P = N_A^{sign} / N_A$	loose iso	loose iso corr	tight iso	tight iso corr
$10 < p_T < 15$	0.93 ± 0.01	0.96 ± 0.01	0.65 ± 0.03	0.75 ± 0.02
$15 < p_T < 20$	0.89 ± 0.02	0.91 ± 0.02	0.68 ± 0.01	0.70 ± 0.01
$20 < p_T < 100$	0.95 ± 0.01	0.96 ± 0.02	0.74 ± 0.01	0.78 ± 0.02

Разница между чистотой, оцененной с помощью скорректированных и нескорректированных значений – до 10% для «tight»-изоляции. Для «loose»-изоляции и высоких значений поперечного импульса фотона значения совпадают в пределах погрешностей.

Результаты двух методов совпадают в пределах погрешностей.

- В данной работе проводилась оптимизация изоляционного ограничения для отбора сигнальных фотонных кандидатов.
- Чистота оценивалась с помощью двух методов, результаты которых совпадают в пределах погрешностей. В обоих случаях наблюдается увеличение значения чистоты сигнального региона (до 10%) для скорректированных значений изоляции для «tight»-изоляции и низких значений поперечного импульса фотона.
- Данные корректировки изоляционных переменных могут использоваться в физических анализах с «первичными» фотонами в конечном состоянии, такими как поиск и исследование процессов распада $H \rightarrow Z\gamma$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, а также для проверки процессов за пределами Стандартной модели.

Спасибо за внимание!

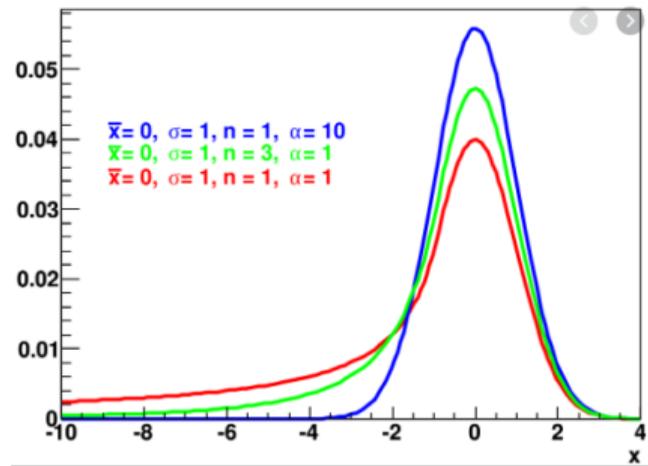
Доп. слайды

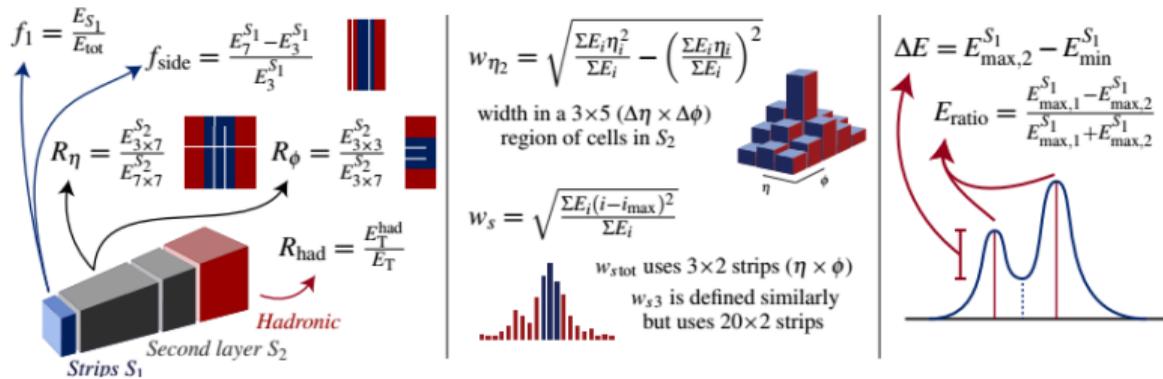
Asymmetric Crystal Ball function

$$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma_L, \sigma_R) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{A^2}{2}\right), & \text{для } A \leq \alpha \\ B \cdot (C + A)^{-n}, & \text{для } A > \alpha \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} \frac{x - \bar{x}}{\sigma_L}, & \text{для } \bar{x} \leq x, \\ \frac{x - \bar{x}}{\sigma_R}, & \text{для } \bar{x} > x \end{cases},$$

$$B = \left(\frac{n}{\alpha}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right), \quad C = \frac{n}{\alpha} - \alpha$$





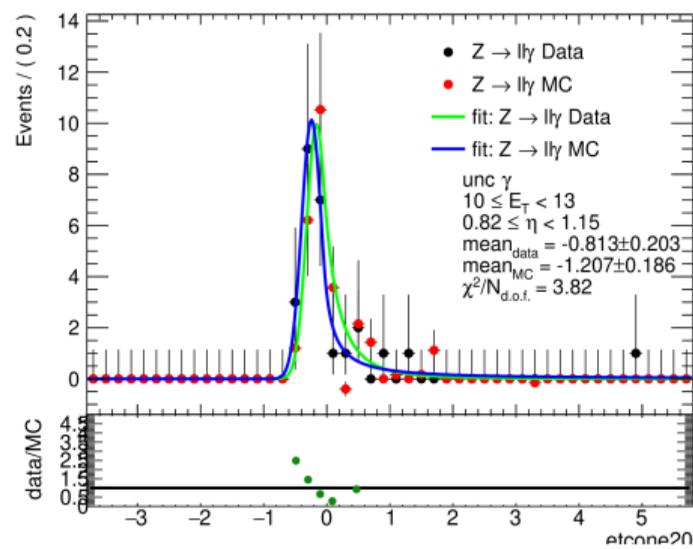
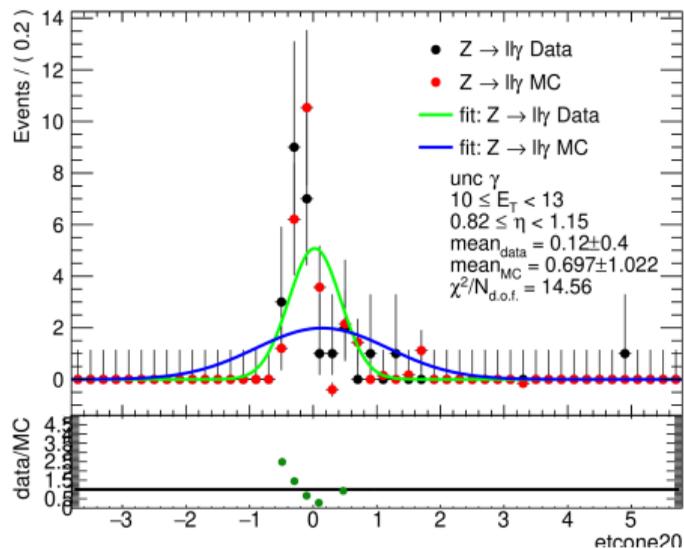
«Loose»

идентификация основана на формах ливня во втором слое электромагнитного калориметра и энергии, выделяемой в адронном калориметре. Для «tight» идентификации используется также информация из тонко сегментированного полосчатого слоя калориметра.

Menu Bit set	Recipe	Description
PhotonLoosePrime2	egammaPID::PhotonLoose +0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaEmax2_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsEratio_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsWtot_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsDEmaxs1_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaE_Photon;	All tight cuts, minus the Ws3 and Fside cuts. (E.g. "relax Ws3 and Fside") (DeltaEmax2 is kept for legacy reasons; no impact.)
PhotonLoosePrime3	egammaPID::PhotonLoose +0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaEmax2_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsEratio_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsWtot_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsDEmaxs1_Photon;	All tight cuts, minus Ws3, Fside, DeltaE.
LoosePrime4	egammaPID::PhotonLoose +0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaEmax2_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsEratio_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsWtot_Photon;	All tight cuts, minus the Ws3, Fside, DeltaE, Eratio.
LoosePrime4a	egammaPID::PhotonLoose +0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaEmax2_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsEratio_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsDEmaxs1_Photon;	All tight cuts, minus the Ws3, Fside, DeltaE, Wstot.
LoosePrime5	egammaPID::PhotonLoose +0x1 << egammaPID::ClusterStripsDeltaEmax2_Photon 0x1 << egammaPID::ClusterStripsEratio_Photon;	All tight cuts, minus the Ws3, Fside, DeltaE, Wstot, Eratio.

Table 1: Discriminating variables used for *loose* and *tight* photon identification.

Category	Description	Name	<i>loose</i>	<i>tight</i>
Acceptance	$ \eta < 2.37$, with $1.37 \leq \eta < 1.52$ excluded	–	✓	✓
Hadronic leakage	Ratio of E_T in the first sampling layer of the hadronic calorimeter to E_T of the EM cluster (used over the range $ \eta < 0.8$ or $ \eta > 1.52$)	R_{had1}	✓	✓
	Ratio of E_T in the hadronic calorimeter to E_T of the EM cluster (used over the range $0.8 < \eta < 1.37$)	R_{had}	✓	✓
EM middle layer	Ratio of the energy in $3 \times 7 \eta \times \phi$ cells over the energy in 7×7 cells centered around the photon cluster position	R_η	✓	✓
	Lateral shower width, $\sqrt{(\sum E_i \eta_i^2)/(\sum E_i) - ((\sum E_i \eta_i)/(\sum E_i))^2}$, where E_i is the energy and η_i is the pseudorapidity of cell i and the sum is calculated within a window of 3×5 cells	$w_{\eta 2}$	✓	✓
EM strip layer	Ratio of the energy in $3 \times 3 \eta \times \phi$ cells over the energy of 3×7 cells centered around the photon cluster position	R_ϕ		✓
	Lateral shower width, $\sqrt{(\sum E_i (i - i_{max})^2)/(\sum E_i)}$, where i runs over all strips in a window of $3 \times 2 \eta \times \phi$ strips, and i_{max} is the index of the highest-energy strip calculated from three strips around the strip with maximum energy deposit	$w_{s 3}$		✓
	Total lateral shower width $\sqrt{(\sum E_i (i - i_{max})^2)/(\sum E_i)}$, where i runs over all strips in a window of $20 \times 2 \eta \times \phi$ strips, and i_{max} is the index of the highest-energy strip measured in the strip layer	$w_{s 10}$		✓
	Energy outside the core of the three central strips but within seven strips divided by energy within the three central strips	f_{oak}		✓
	Difference between the energy associated with the second maximum in the strip layer and the energy reconstructed in the strip with the minimum value found between the first and second maxima	ΔE_s		✓
	Ratio of the energy difference between the maximum energy deposit and the energy deposit in the secondary maximum in the cluster to the sum of these energies	E_{ratio}		✓
	Ratio of the energy in the first layer to the total energy of the EM cluster	f_1		✓



Распределения calorиметрической изоляции в конусе $\Delta R < 0.2$ и их фитирование функцией Гаусса (слева) и функцией асимметричный Crystal Ball (справа) для экспериментальных и смоделированных данных для значений поперечной энергии $55 < E_T < 65$ ГэВ

Экспериментальные данные: данные с ускорителя за 2015-2018гг. (139 fb^{-1} , 13 ТэВ)

Данные Монте-Карло: PowhegPythia $Z \rightarrow ll\gamma$

Для событий распада $Z \rightarrow ll\gamma$ применяются следующие ограничения:

Электроны: $E_T > 10 \text{ ГэВ}$, $|\eta| < 2.47$

Мюоны: $E_T > 10 \text{ ГэВ}$, $|\eta| < 2.5$

Фотоны: $E_T > 10 \text{ ГэВ}$, $|\eta| < 2.37$

$40 < m_{Zll} < 83 \text{ ГэВ}$

$80 < m_{Zll\gamma} < 100 \text{ ГэВ}$

Мягкое «loose»-ограничение основано на изоляции в калориметре и трековой изоляции в конусе с угловым размером $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} = 0.2$ вокруг фотона:

$$E_T^{\text{iso}}|_{\Delta R < 0.2} < 0.065 \cdot E_T \text{ и } p_T^{\text{iso}}|_{\Delta R < 0.2} < 0.05 \cdot E_T;$$

Жесткое «tight» изоляционное ограничение основано на изоляции в калориметре в конусе размером $\Delta R = 0.4$ вокруг фотона и трековой изоляции в конусе размером $\Delta R = 0.2$ вокруг фотона:

$$E_T^{\text{iso}}|_{\Delta R < 0.4} < 0.022 \cdot E_T + 2.45 \text{ GeV} \text{ и } p_T^{\text{iso}}|_{\Delta R < 0.2} < 0.05 \cdot E_T.$$

Корреляция R между идентификацией и изоляцией, вычисленная из Монте-Карло данных для нескорректированных и скорректированных значений изоляции

ID/iso	loose iso	loose iso corr	tight iso	tight iso corr
looseprime3	0.97 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.99 ± 0.01
looseprime4	1.12 ± 0.01	1.12 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.09 ± 0.01
looseprime5	1.21 ± 0.01	1.20 ± 0.01	1.17 ± 0.01	1.16 ± 0.01