

Новый алгоритм реконструкции струй от быстрых W - и Z -бозонов

О.В.Зенин

ИФВЭ

Мотивация

- Поиск состояний $WW/ZZ/WZ$ с инвариантной массой $M_{VV} = O(1 \text{ ТэВ})$.
- $\text{Br}(W \rightarrow \text{jets}) \simeq 70\% \Rightarrow$ увеличение статистики в разы по сравнению с $W \rightarrow \ell\nu$.
- При $p_T^{W,Z} \sim M_{VV} \sim 1 \text{ ТэВ}$ распад $W/Z \rightarrow \text{jets}$ сколлимирован в конусе $\Delta R \sim M_{W,Z}/M_{VV} \sim 0.1$ вокруг $\vec{p}_{W,Z}$
- Реконструкция стандартными алгоритмами AntiKt0.4(0.6) неэффективна (слипание струй, выпадение из конуса части более мягкой струи от $V \rightarrow jj$, засорение pileup/UE).
- В ATLAS используется реконструкция алгоритмами Aachen–Cambridge, (Anti)Kt с избыточным конусом $R = 0.6 - 1.2$ с последующей очисткой и выявлением субструктуры $J \rightarrow jj$ (см., например, [CERN-PH-EP-2015-204](#)). Алгоритмы очистки (*pruning*, *trimming*, *grooming*) имеют произвольные параметры, оптимизируемые для максимального подавления фона от КХД-струй при фиксированной эффективности идентификации $W/Z \rightarrow J$.

Задача: построить алгоритм реконструкции струи

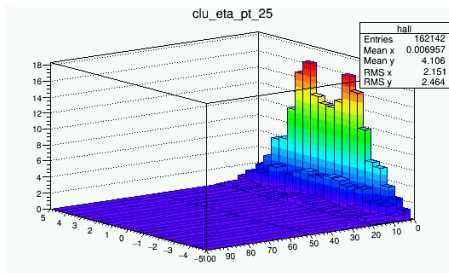
- с минимумом произвольных параметров
- без фиксированного конуса
- автоматически подавляющий pileup
- не требующий дополнительной очистки реконструированной струи
- не хуже использующихся в АТЛАС алгоритмов (см. [CERN-PH-EP-2015-204](#)) по соотношению эффективности для сигнала $W/Z \rightarrow J$ ($= 50\%$) / подавление КХД-фона $\sim 1/50$ при $p_T(W/Z \rightarrow J) > 200 \text{ GeV}$, $\mu = 0 - 30$.

Алгоритм

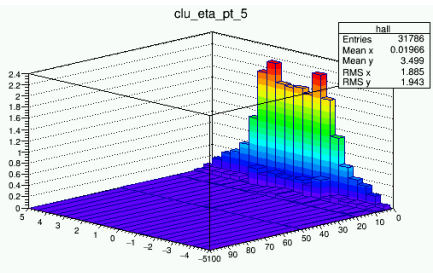
- Используем CaloCalTopCluster'ы с $E_T^{clus} > 0.5, 1, 2 \text{ GeV}$.
Информация из Inner Detector не используется (кроме числа реконструированных вершин $type=1,3$).
- В кластеризации участвуют 4-импульсы двух входящих партонов, оцененные по $\Sigma \vec{p}^{clus}$ в калориметре.
- Для каждой пары объектов сравнивается вероятность прихода хотя бы одного из $pileup/UE$ (1), и вероятность прихода одного из них из сигнала с излучением второго объекта (2). Если (1)>(2), пара игнорируется, если (2)>(1) – добавляется к списку кандидатов на объединение. Пара с максимальной вероятностью (2) объединяется, при этом для объединения вероятность прихода из сигнала наследуется от констит்யюента с максимальной вероятностью прихода из сигнала. Объекты с массой $> Q_{max} = const \cdot M_W$ замораживаются (свободный параметр $const = 0.1 - 1$)
- Вероятность прихода кластера из $pileup$ для событий с данным $N_{type1 vtx} - 1$ вычисляется из событий MinBias/ZeroBias.

Алгоритм (оценка pileup)

- Разбиение фазового объема по p_T, η произвольно (см. рис.) и предполагается изотропным по ϕ . Разбиение по ϕ : находим плоскость реакции, $\phi_0 = \sum_{clus} p_T^{clus} (\phi_{clus} - (\phi_Z + \pi)) / \sum_{clus} p_T^{clus}$, и ширину ведущей струи по ϕ , $\Delta(\phi - \phi_0)^2 = \sum_{clus} p_T^{clus} (\phi_{clus} - (\phi_0))^2 / \sum_{clus} p_T^{clus}$. Узкий бин по $\phi - [\phi_0 - \Delta\phi, \phi_0 + \Delta\phi]$, остальное делим на три бина с равной шириной.



$N_{vtx1} = 25$



$N_{vtx1} = 5$

Алгоритм

Если в бине $[p_T, \eta, \phi]$ ожидается b кластеров из pileup/UE, то в событии $Z + X$ при n кластерах в этом бине, вероятность для одного кластера прийти из pileup/UE

$$w_b = \frac{b \cdot 1 + b + \dots + b^{n-1} / (n-1)!}{n \cdot 1 + b + \dots + b^n / n!}$$

а вероятность прийти из сигнала $w_s = 1 - w_b$.

Вероятность излучения частицы 2, $(1+2) \rightarrow 1+2$, $Q = p_1 + p_2$ в бин $[\Delta p_{T2}, \Delta \eta_2, \Delta \phi_2]$:

$$w_{rad} \sim \max[w_{s1}, w_{s2}] \times \frac{\alpha_S}{\pi} \cdot C \frac{Q_0}{p_0^{(2)}} \frac{p_T^{(2)} \Delta p_T^{(2)}}{Q^2} \Delta \eta^{(2)} \frac{\Delta \phi^{(2)}}{2\pi}$$

Если $w_{rad} > 1 - w_{s1}w_{s2}$, то добавляем пару 1+2 в список кандидатов на объединение, если $w_{rad} < 1 - w_{s1}w_{s2}$ – игнорируем.

$\frac{\alpha_S}{\pi} \times C$ – свободный параметр, фиксируем его на $0.1 \sim \frac{\alpha_S(M_Z)}{\pi} \cdot (C_A, C_F)$

При реконструкции не используются условия на p_T и форму струи

Кинематика из [CERN-PH-EP-2015-204](#): $M_{W'} = 1000 \text{ GeV}$,
 $W' \rightarrow W(J)Z(\mu^+\mu^-)$:

- Сигнал $W'(1000 \text{ GeV}) \rightarrow WZ$: $350 < p_{truth W}^T < 500 \text{ GeV}$,
 $|y_{truth W}| < 1.2$

`mc15_13TeV.302221.MadGraphPythia8EvtGen_A14NNPDF23L0_HVT_AgV1_VcWZ_1lqq_m1000`

- Фон $Z + jets$: $350 < |\Sigma \vec{p}_{q,g}^T| < 500 \text{ GeV}$, $|y_{\Sigma q,g}| < 1.2$, $|y_{q,g}| < 2.5$

`mc15_13TeV.361405.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt280_500_CVetoBVeto`

`mc15_13TeV.361406.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt280_500_CFilterBVeto`

`mc15_13TeV.361407.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt280_500_BFilter`

- Реконструкция: $300 < p_{reco J}^T < 500 \text{ GeV}$, $|y_{reco J}| < 1.2$

$M_{W'} = 500 \text{ GeV}$:

- Сигнал $W'(500 \text{ GeV}) \rightarrow WZ$: $200 < p_{truth\ W}^T < 250 \text{ GeV}$,
 $|y_{truth\ W}| < 1.2$

mc15_13TeV.302216.MadGraphPythia8EvtGen_A14NNPDF23LO_HVT_Agv1_VcWZ_1lqq_m0500

- Фон $Z + jets$: $200 < |\Sigma \vec{p}_{q,g}^T| < 250 \text{ GeV}$, $|y_{\Sigma q,g}| < 1.2$, $|y_{q,g}| < 2.5$

mc15_13TeV.361402.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt140_280_CVetoBVeto

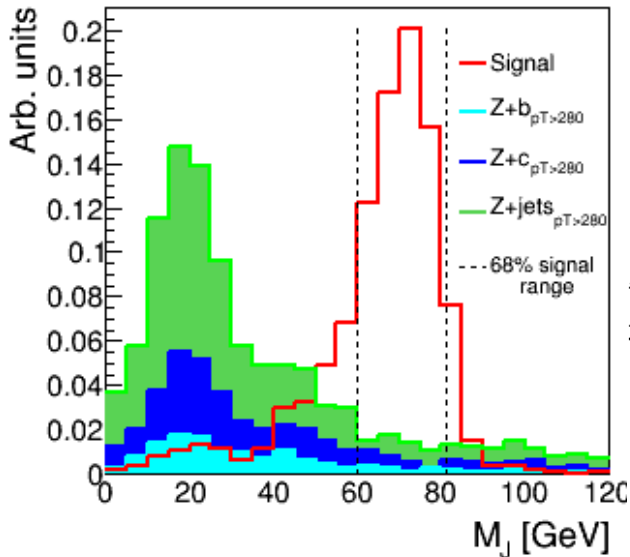
mc15_13TeV.361403.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt140_280_CFilterBVeto

mc15_13TeV.361404.Sherpa_CT10_Zmumu_Pt140_280_BFilter

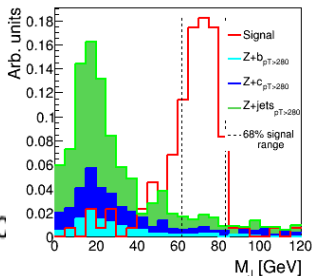
- Реконструкция: $150 < p_{reco\ J}^T < 250 \text{ GeV}$, $|y_{reco\ J}| < 1.2$

- Для сигнала подбирается минимальное по ширине окно M_J , содержащее 68% событий, отобранных по p_J^T , y_J струи с максимальным в событии p_T .
- Для оценки эффективности подавления КХД-струй из $Z + jets$ спектр $p_{\Sigma q, g}^T, |y_{q, g}| < 2.5$ перевзвешивается к распределению $p_{truth\ W}^T$ сигнала $W' \rightarrow WZ$ (близко к процедуре [CERN-PH-EP-2015-204](#)).
- Дальнейшие обрезания по структурным переменным подбираются так, что эффективность для сигнала $\epsilon = 50\%$.
- Результаты без перевзвешивания фона $Z + jets$ тоже показаны.

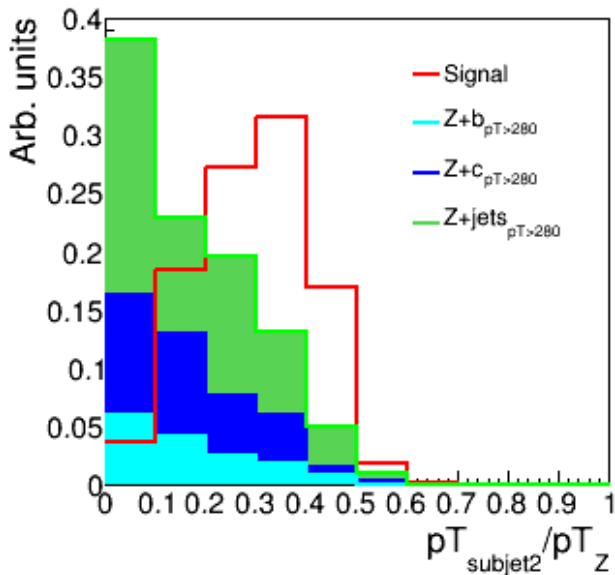
$350 < p_T^J < 500 \text{ GeV}$, $|y| < 1.2$ (cf. CERN-PH-EP-2015-204)



68% сигнала между двумя вертикальными штриховыми линиями. Слева $\bar{\mu} = 15$, при $\bar{\mu} \simeq 25$ картинка практически не меняется:



$350 < p_J^T < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, обрезания: x_2

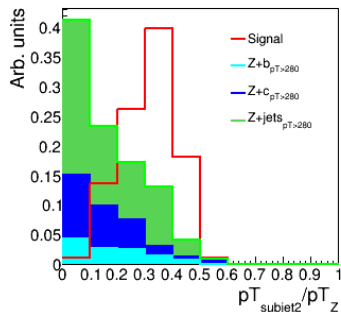


Основное подавление
фона в сигнальном окне

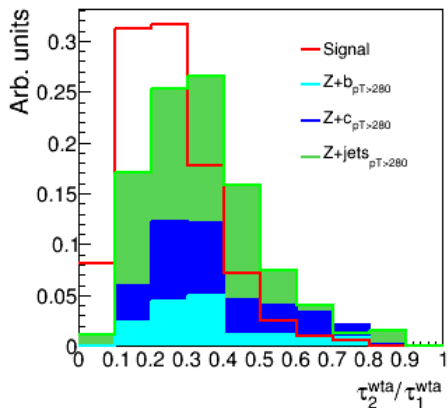
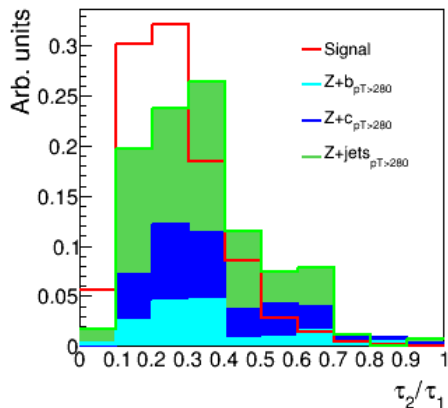
M_J за счет

$$x_2 = p_T^{\text{subjet2}} / p_T^Z < 0.1$$

$$\bar{\mu} \sim 25:$$



$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, структ. переменные: $\frac{\tau_2}{\tau_1}$



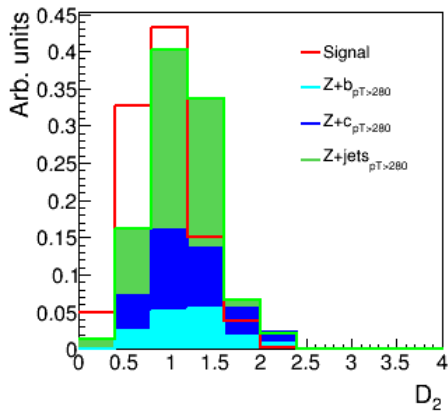
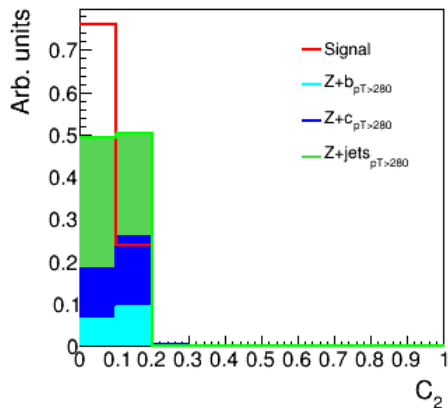
τ_2/τ_1 характеризуют наличие в массивной струе двух узких суб-струй

► см. определения $\tau_{1,2}, C_2, D_2$

$\tau_2^{wta}/\tau_1^{wta} < 0.37$ дает $\epsilon_{signal} = 50\%$

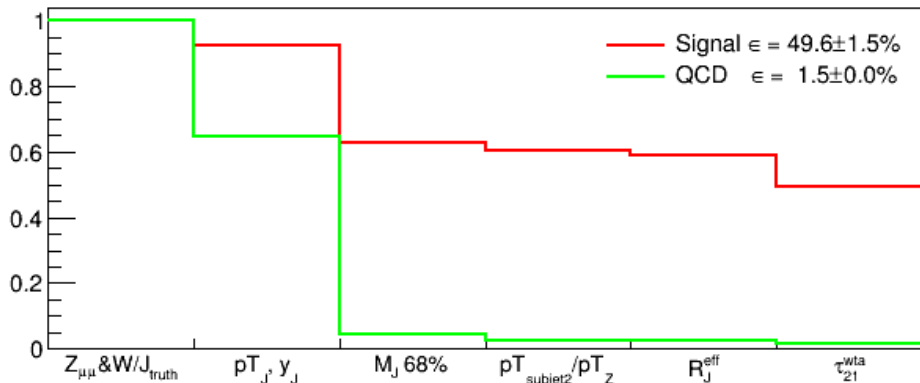
(можно обрезать и по другим переменным: C_2, D_2 – см. след. слайд)

$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, структурные переменные:
 C_2, D_2



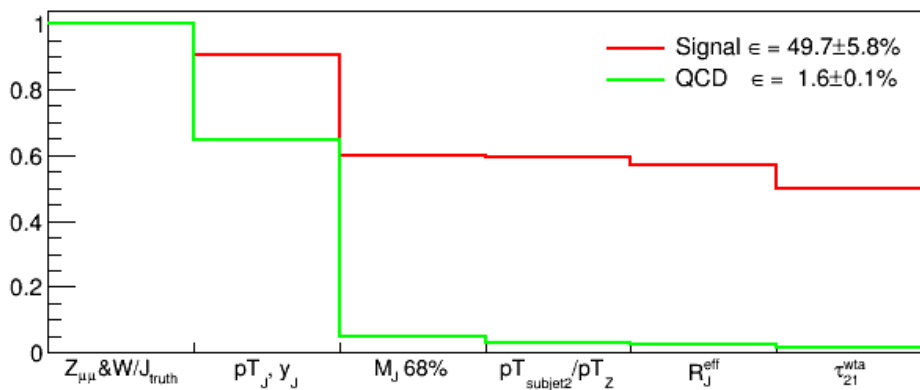
$350 < p_T^J < 500 \text{ GeV}, |y| < 1.2$

Эффект обрезаний по $M_J, x_2, \tau_2^{wta} / \tau_1^{wta}$

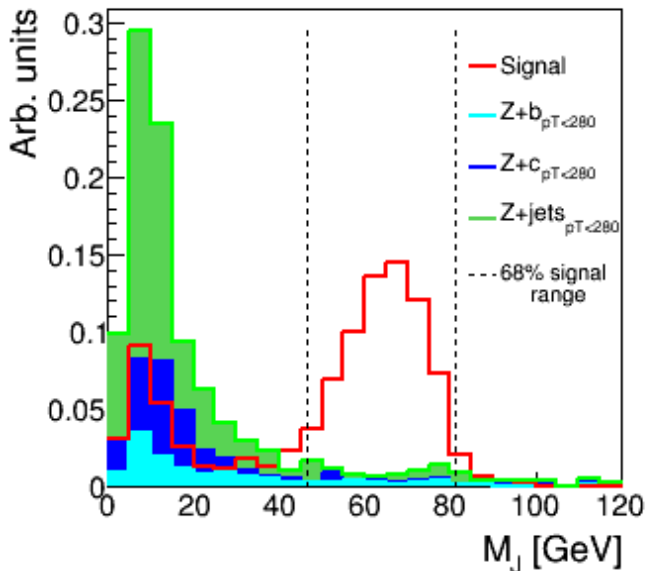


Ср. [CERN-PH-EP-2015-204](#) (Fig. 14): в той же кинематике при $\epsilon_{\text{signal}} = 50\%$ лучшее подавление фона $\epsilon_{\text{QCD}} \simeq 2\%$ дает алгоритм Cambridge/Aachen $R = 1.0$, pruned ($R_{\text{cut}} = 0.5$, $Z_{\text{cut}} = 0.15$), обрезание по $C_2^{\beta=1}$. ▶ СМ. ϵ_{signal} VS ϵ_{bkg}

То же для $\mu > 20$, $\bar{\mu} \simeq 25$ (обрезания те же)

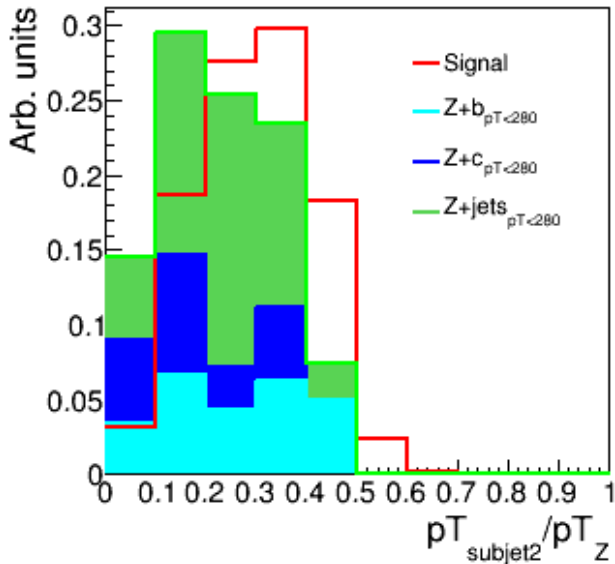


$200 < p_T^J < 250$ GeV, $|y| < 1.2$ (cf. CERN-PH-EP-2015-204)



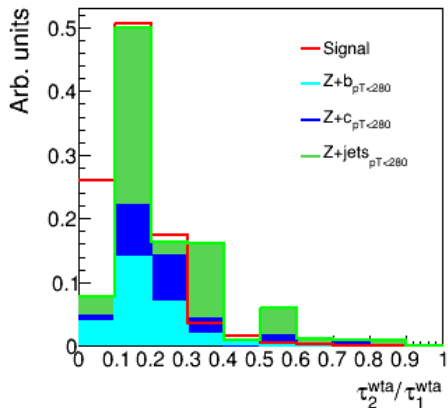
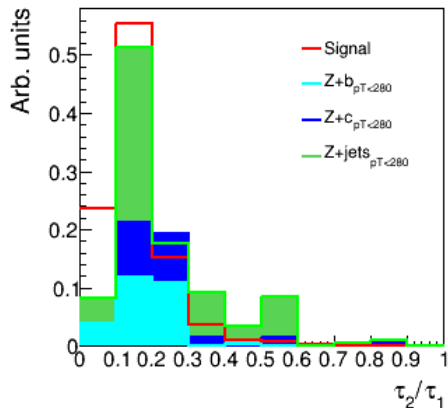
68% сигнала между двумя вертикальными штриховыми линиями. Здесь $\bar{\mu} = 15$, при $\bar{\mu} \simeq 25$ разрешение для сигнала ухудшается.

$200 < p_J^T < 250$ GeV, $|y| < 1.2$, обрезания: x_2



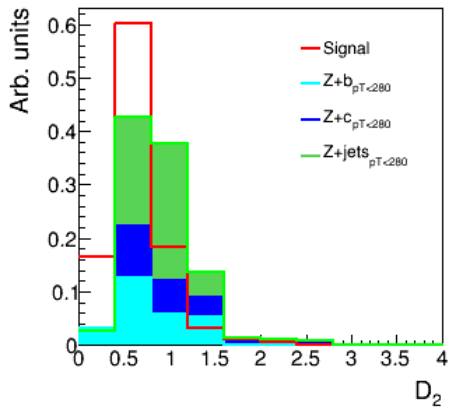
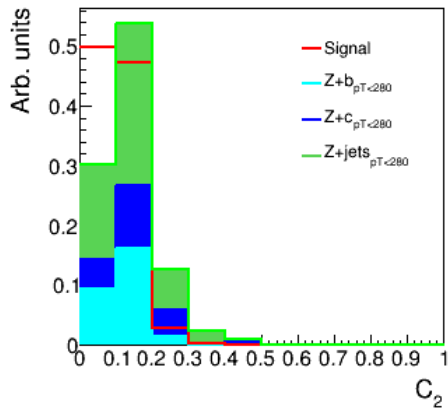
Основное подавление фона в сигнальном окне M_J за счет $x_2 = p_T^{\text{subjet2}} / p_T^Z < 0.18$

$200 < p_T^J < 250$ GeV, $|y| < 1.2$, структ. переменные: $\frac{\tau_2}{\tau_1}$



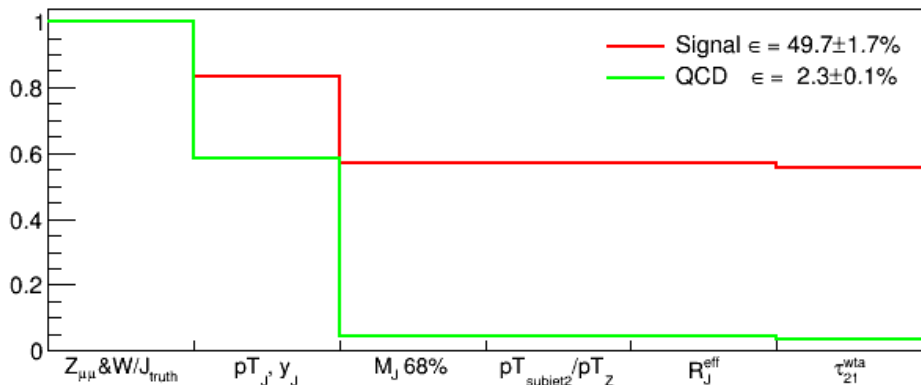
$\tau_2^{wta}/\tau_1^{wta} < 0.21$ дает $\epsilon_{signal} = 50\%$, можно обрезать и по другим переменным: C_2 , D_2

$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, структурные переменные:
 C_2, D_2



$200 < p_T^J < 250 \text{ GeV}, |y| < 1.2$

Эффект обрезаний по $M_J, x_2, \tau_2^{wta} / \tau_1^{wta}$

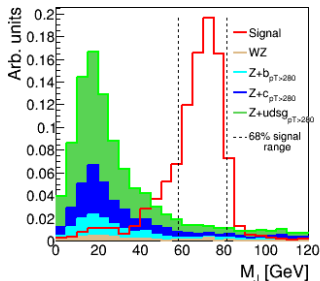
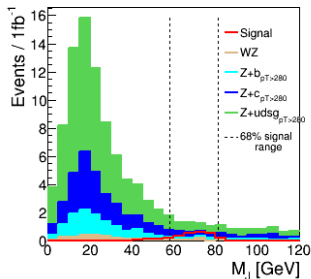


Ср. CERN-PH-EP-2015-204 (Fig. 15): в той же кинематике при $\epsilon_{\text{signal}} = 50\%$ лучшее подавление фона $\epsilon_{\text{QCD}} \simeq 2\%$ дает алгоритм anti- k_T $R = 1.0$, trimmed ($f_{\text{cut}} = 5\%$, $R_{\text{sub}} = 0.2$), обрезание по $D_2^{\beta=1}$.

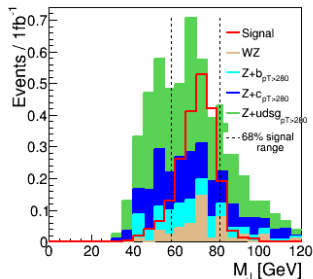
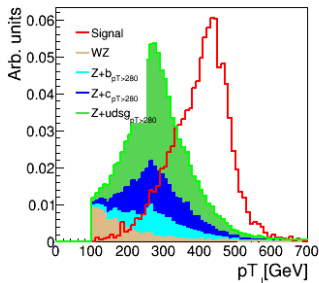
► СМ. ϵ_{signal} VS ϵ_{bkg}

$W'(1000\text{GeV}) \rightarrow W(J)Z(\mu^+\mu^-)$, фон $Z + jets$ и ZW без перевзвешивания

После ре-
конструкции
 $W \rightarrow J$:

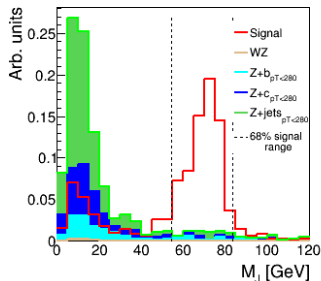
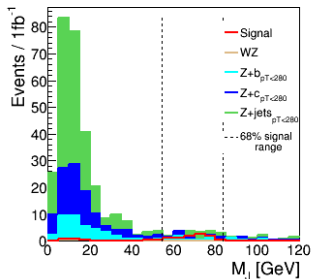


После обреза-
ний:

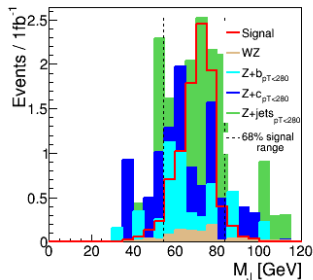
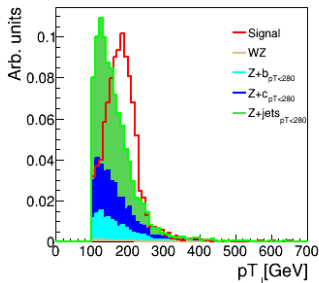


$W'(500\text{GeV}) \rightarrow W(J)Z(\mu^+\mu^-)$, фон $Z + jets$ и ZW без перевзвешивания

После ре-
конструкции
 $W \rightarrow J$:



После обре-
заний:



Выводы, вопросы

- Метрика построения струи с “pileup-фильтром” дает результаты не хуже, чем использующиеся в АТЛАСе сложные алгоритмы A/C, AntiKt ($R=0.6-1.2$) + “jet grooming” (cf. [CERN-PH-EP-2015-204](#))
- Новый алгоритм имеет меньше свободных параметров, чем используемые в АТЛАСе, и имеет прозрачный физический смысл.

Вопросы **[TODO]**:

- Resolved vs. unresolved $V \rightarrow jj$ с $Q_{max}/M_V \sim 0.1 - 0.2$?
- Другие структурные переменные?
- Калибровка E_J , M_J : пик W у нас выглядит как узкий резонанс + “радиационный хвост”, так как теряется часть более мягкой суб-струи. Форму хвоста (то есть вероятность потери мягкого g в $W \rightarrow qqg$) можно получить по известному распределению g в $W \rightarrow qqg$ и известной плотности pileup \Rightarrow поправка к реконструированному импульсу и массе струи.
- Доложить в группе jet substructure.

Backup

Структурные переменные

$$R_J^{eff} = \sum_i p_{T_i} \Delta R_{i,J} / \sum_i p_{T_i}$$

$$\tau_0 = \sum_i p_{T_i}, \quad \tau_1 = \frac{1}{\tau_0} \sum_i p_{T_i} \Delta R(i, J)$$

$$\tau_1^{wta} = \frac{1}{\tau_0} \sum_i p_{T_i} \Delta R(i, \text{hardest in } J)$$

$$\tau_2^{wta} = \frac{1}{\tau_0} \sum_i p_{T_i} \min \{ \Delta R(i, \text{hardest in } \text{subject}_1), \Delta R(i, \text{hardest in } \text{subject}_2) \}$$

$$\tau_{21}^{wta} = \tau_2^{wta} / \tau_1^{wta}$$

Структурные переменные: корреляторы

$$E_{CF} 0(\beta) = 1,$$

$$E_{CF} 1(\beta) = \sum_{i \in J} p_{T_i},$$

$$E_{CF} 2(\beta) = \sum_{i < j \in J} p_{T_i} p_{T_j} (\Delta R_{ij})^\beta,$$

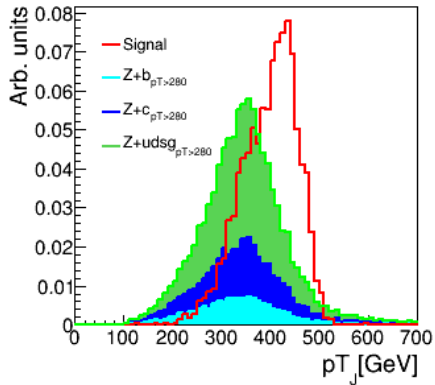
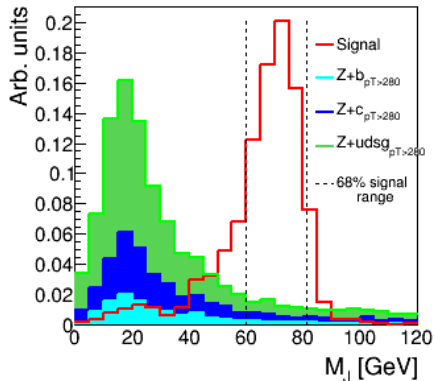
$$E_{CF} 3(\beta) = \sum_{i < j < k \in J} p_{T_i} p_{T_j} p_{T_k} (\Delta R_{ij} \Delta R_{ik} \Delta R_{jk})^\beta,$$

$$e_2^{(\beta)} = \frac{E_{CF} 2}{E_{CF} 1^2}, \quad C_2^{(\beta)} = \frac{e_3^{(\beta)}}{(e_2^{(\beta)})^2},$$

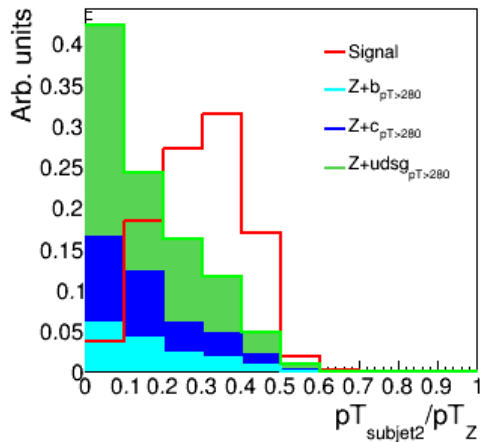
$$e_3^{(\beta)} = \frac{E_{CF} 3}{E_{CF} 1^3}, \quad D_2^{(\beta)} = \frac{e_3^{(\beta)}}{(e_2^{(\beta)})^3}$$

Без перевзвешивания $Z + jets$

$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$ (cf. CERN-PH-EP-2015-204)

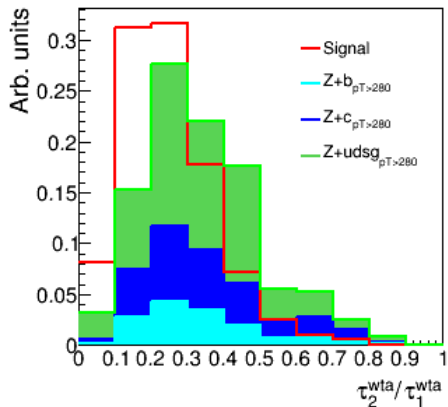
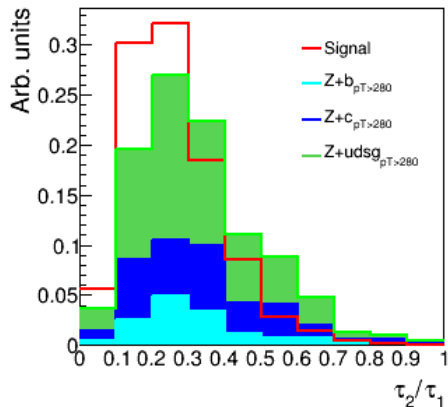


$350 < p_J^T < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, обрезания: x_2



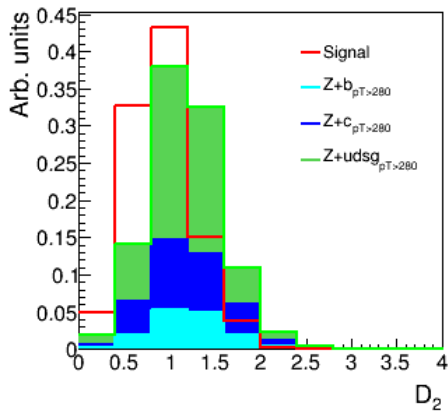
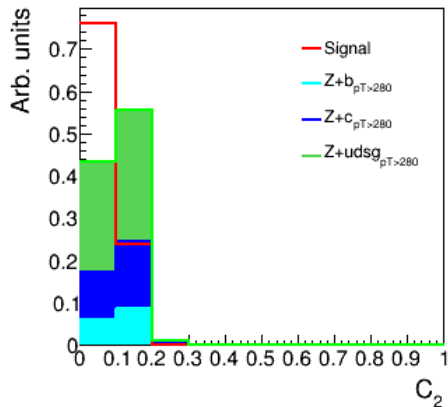
Основное подавление фона в сигнальном окне M_J за счет $x_2 = p_T^{\text{subject2}} / p_T^Z < 0.1$

$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, структ. переменные: $\frac{\tau_2}{\tau_1}$



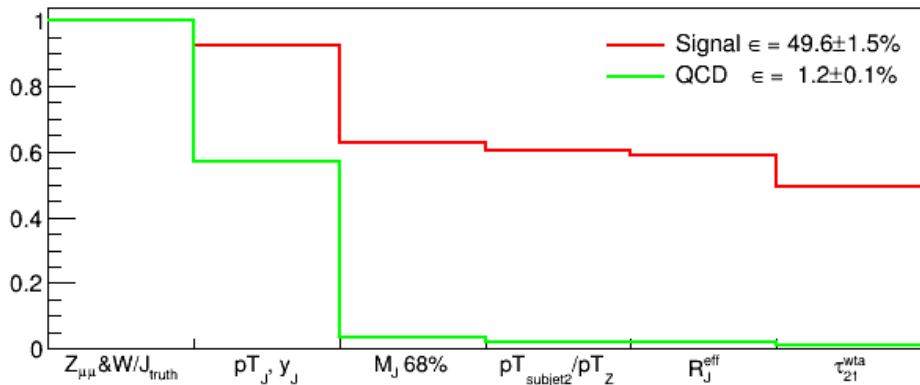
$\tau_2^{wta}/\tau_1^{wta} < 0.37$ дает $\epsilon_{signal} \simeq 50\%$

$350 < p_T^J < 500$ GeV, $|y| < 1.2$, структурные переменные:
 C_2, D_2

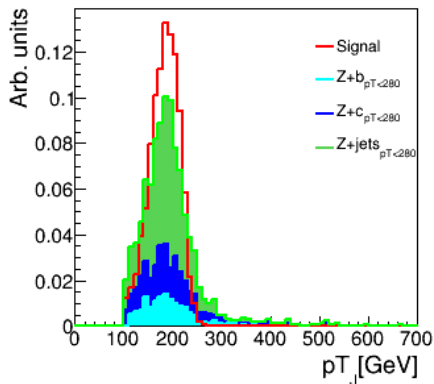
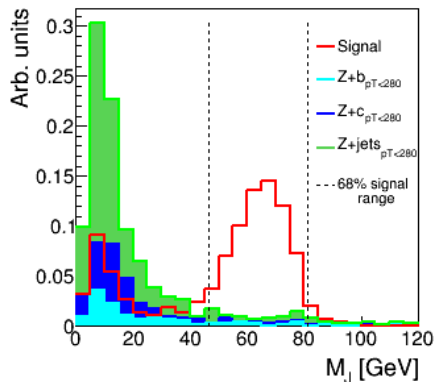


$350 < p_T^J < 500 \text{ GeV}, |y| < 1.2$

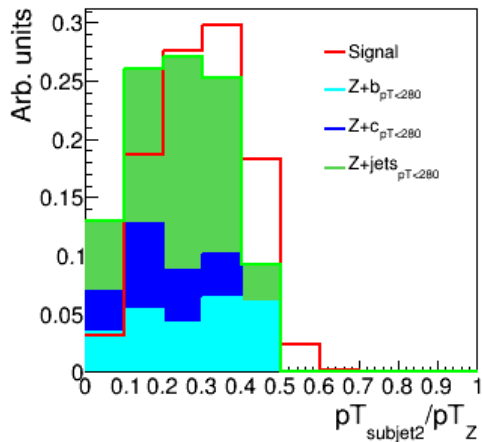
Эффект обрезаний по $M_J, x_2, \tau_2^{wta} / \tau_1^{wta}$



$200 < p_T^J < 250$ GeV, $|y| < 1.2$ (cf. CERN-PH-EP-2015-204)

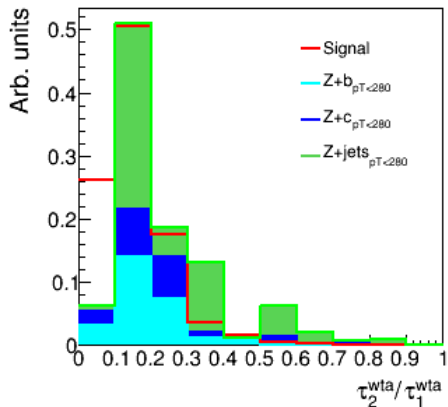
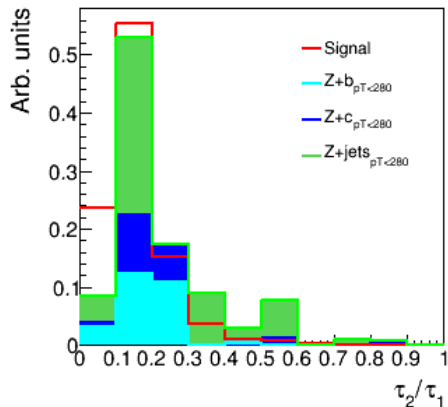


$200 < p_J^T < 250$ GeV, $|y| < 1.2$, обрезания: x_2



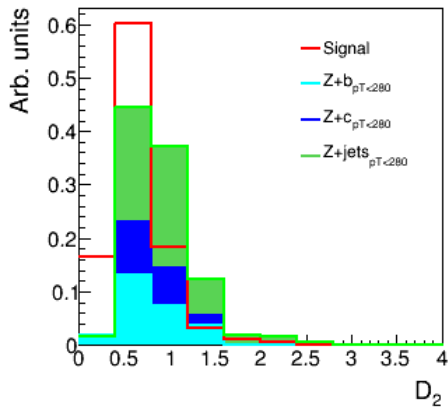
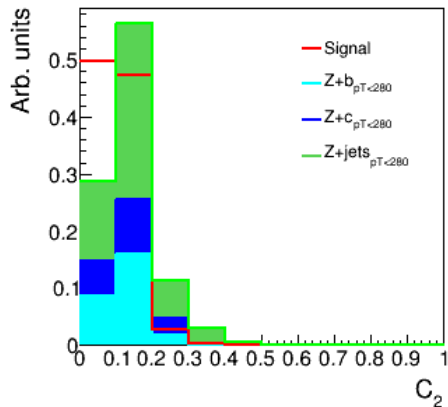
Основное подавление фона в сигнальном окне M_J за счет $x_2 = p_T^{\text{subjet2}} / p_T^Z < 0.18$

$200 < p_T^J < 250$ GeV, $|y| < 1.2$, структ. переменные: $\frac{\tau_2}{\tau_1}$



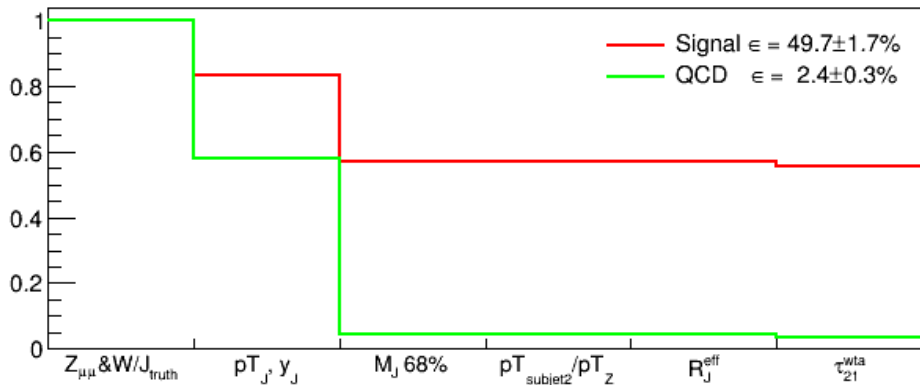
$\tau_2^{wta}/\tau_1^{wta} < 0.24$ дает $\epsilon_{signal} \simeq 50\%$

$200 < p_T^J < 250$ GeV, $|y| < 1.2$, структурные переменные:
 C_2, D_2

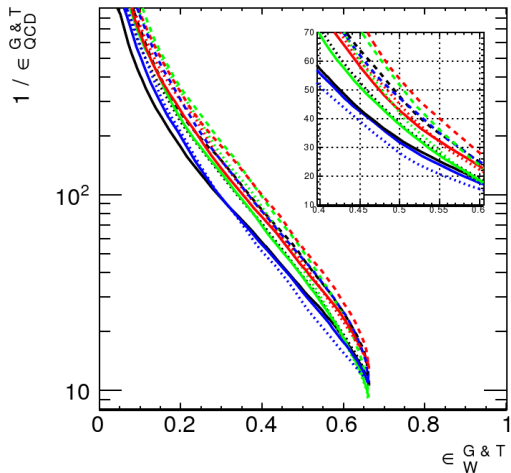


$200 < p_T^J < 250 \text{ GeV}, |y| < 1.2$

Эффект обрезаний по $M_J, x_2, \tau_2^{wta} / \tau_1^{wta}$



ϵ_{signal} VS. $\epsilon_{\text{QCD bkg}}$, $350 < p_T(J) < 500$ GeV
(CERN-PH-EP-2015-204)



ATLAS Simulation Internal

$\sqrt{s} = 8$ TeV Jet 4-momentum not calibrated

$|\eta^{\text{Truth}}| < 1.2$, $350 < p_T^{\text{Truth}} < 500$ GeV, M Cut

- $C_2^{(\beta=1)}$ with anti- k_t $R=1.0$ jets

 $D_2^{(\beta=1)}$ Trimmed ($f_{\text{cut}}=5\%$, $R_{\text{sub}}=0.2$)

 τ_{21}^{wta}
- $C_2^{(\beta=1)}$ with anti- k_t $R=1.0$ jets

 $D_2^{(\beta=1)}$ Trimmed ($f_{\text{cut}}=5\%$, $R_{\text{sub}}=0.3$)

 τ_{21}^{wta}
- $C_2^{(\beta=1)}$ with C/A $R=1.0$ jets

 $D_2^{(\beta=1)}$ Pruned ($R_{\text{cut}}=0.5$, $Z_{\text{cut}}=0.15$)

 τ_{21}^{wta}
- $C_2^{(\beta=1)}$ with C/A $R=1.2$ jets

 $D_2^{(\beta=1)}$ Split-Filtered ($\mu=1$, $R_{\text{sub}}=0.3$, $y_{\text{filt}}=15\%$)

 τ_{21}^{wta}

← назад

ϵ_{signal} VS. $\epsilon_{\text{QCD bkg}}$, $200 < p_T(J) < 250$ GeV
(CERN-PH-EP-2015-204)

