

«Поиск лептокварков первого поколения при парном рождении в протон- протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS»

Апробация диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Каменщиков Андрей Александрович

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Мягков Алексей Григорьевич



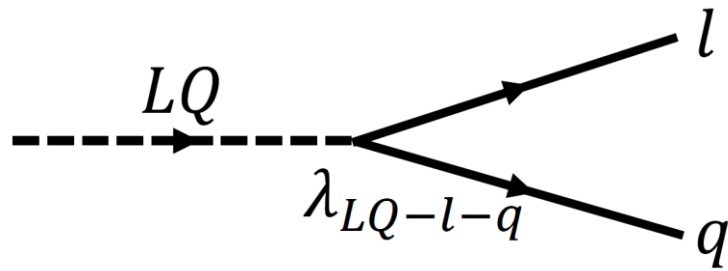
1. Модель лептокварков;
2. История поиска лептокварков;
3. Детектор ATLAS;
4. Условия первичного отбора;
5. Оценка вкладов фоновых и сигнальных процессов;
6. Стратегия анализа;
7. Систематические неопределённости;
8. Статистическая проверка новой модели;
9. Результат поиска лептокварков;
10. Личный вклад, выступления и публикации.

- Предсказаны несколькими расширениями SM:
 - GUT (SU(5), ограниченная SU(5) - основная для данной работы, SU(15));
 - модель Пати-Салама SU(4);
 - модель суперструн;
 - модель техницвета;
- Образуют 3 поколения, подобно кваркам и лептонам;
- LQ и продукты его распада принадлежат одному поколению;

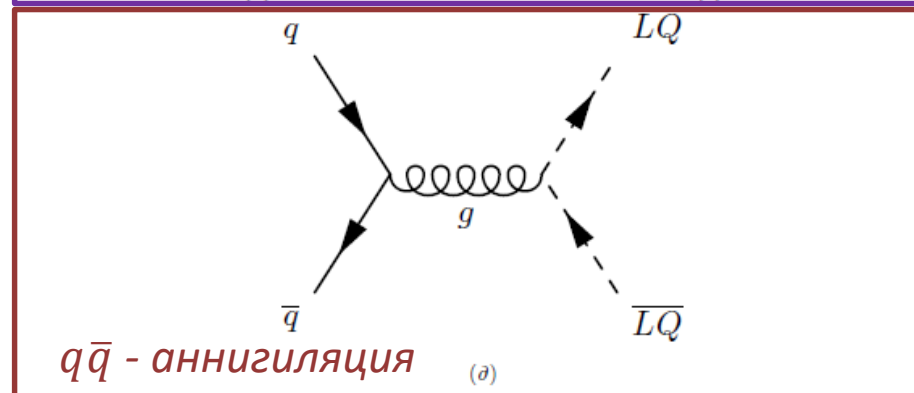
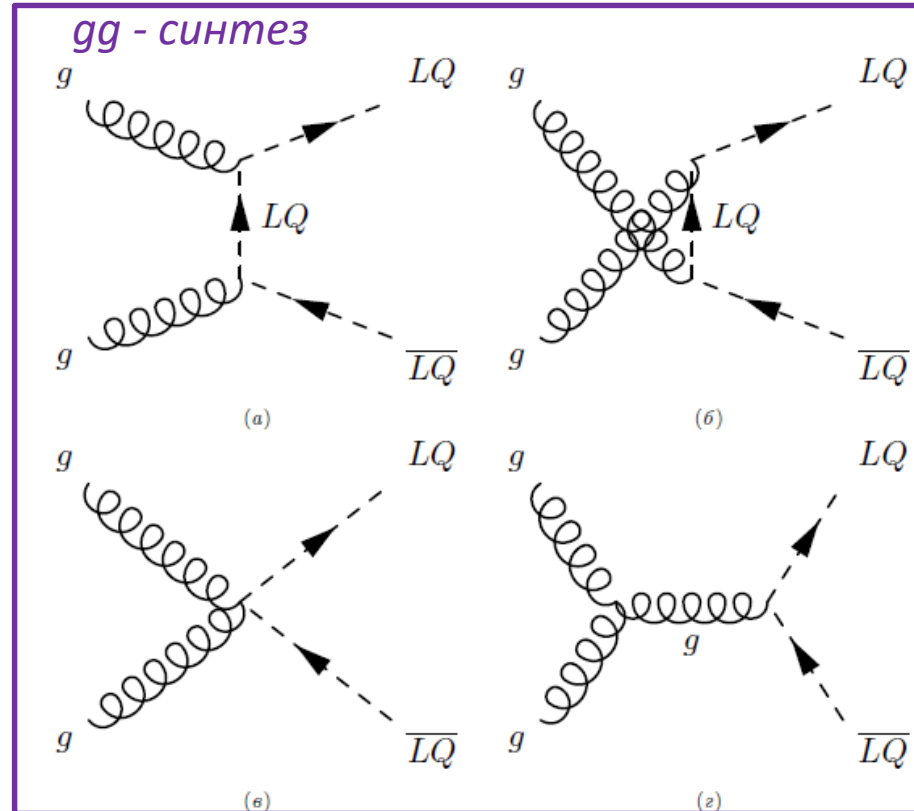
ЛЕПТОНЫ	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_τ

КВАРКИ	u	c	t
	d	s	b

- Являются переносчиками:
 - одновременно **L** и **B** зарядов;
 - дробного электрического заряда;



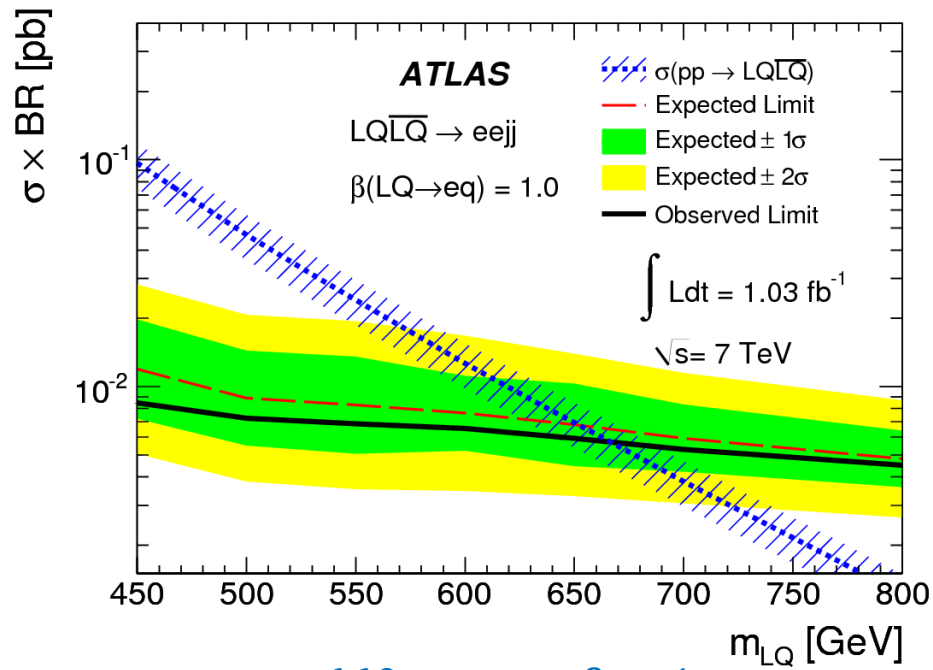
- λ_{LQ-l-q} ограничена экспериментами HERA – распад **мгновенный**;
- Парное рождение LQ в pp взаимодействиях:
 - зависит от α_S ;
 - не зависит от λ_{LQ-l-q} ;



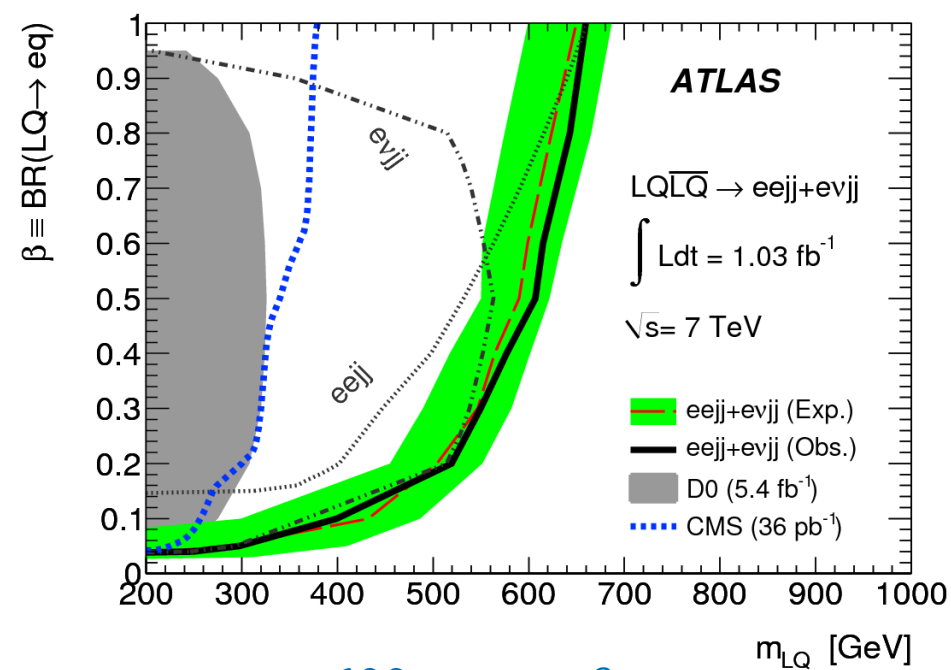
Эксперименты:

- H1 и ZEUS на HERA;
- OPAL и DELPHI на LEP;
- D0 и CDF на Tevatron;
- Истра и Ока на У-70;
- ATLAS, CMS и LHCb на LHC; ATLAS:

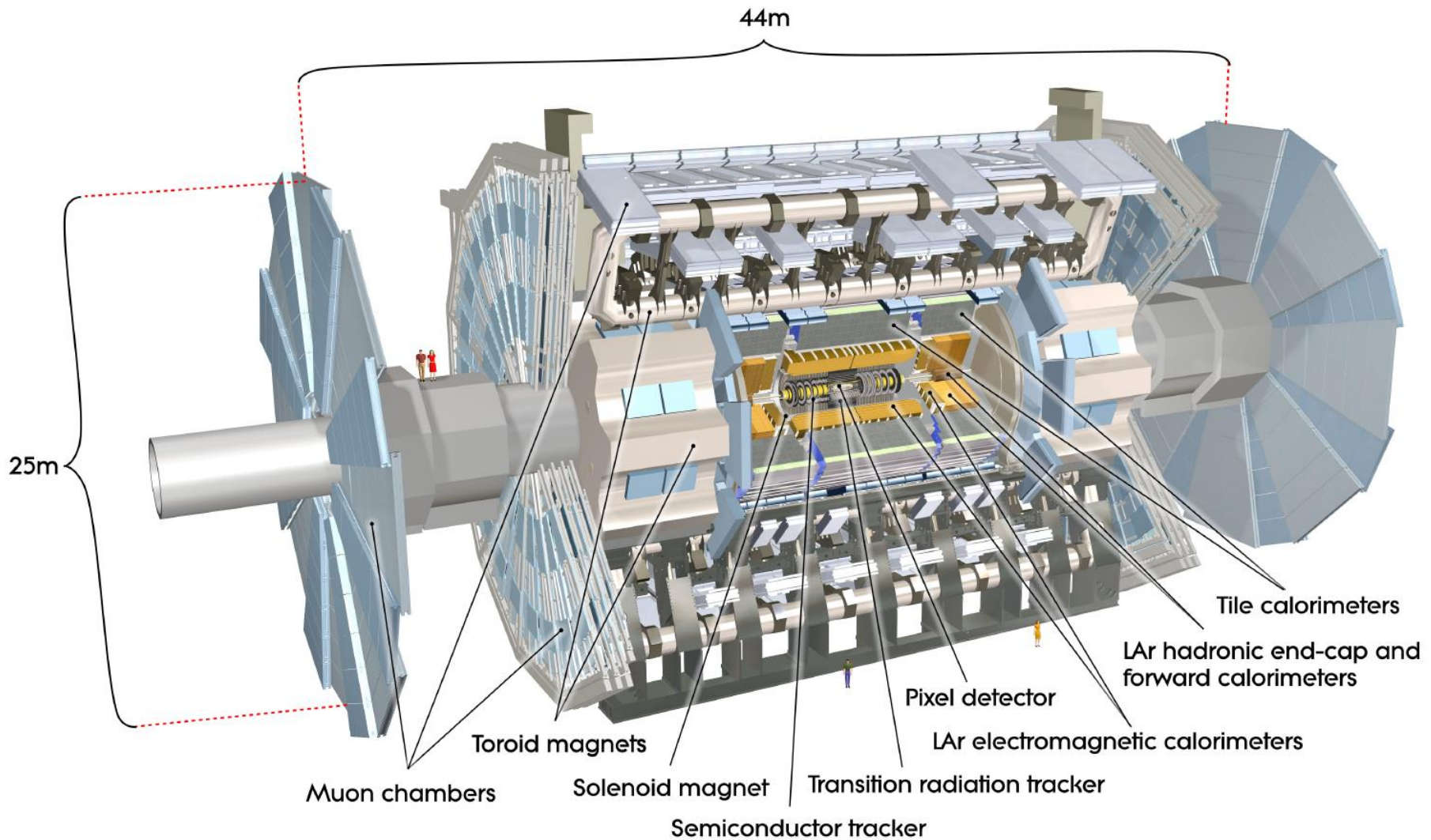
Анализировались процессы
одиночного и
парного рождения LQ



$m_{LQ1} > 660 \text{ ГэВ}$ при $\beta = 1$



$m_{LQ1} > 600 \text{ ГэВ}$ при $\beta = 0.5$



Основные компоненты: трековый детектор, калориметр и мюонный спектрометр.

Электроны:

- реконструкция либо в Calo, либо в Calo+Track;
- ассоциация с PV: $|d_0| < 1$ мм, $|z_0| < 5$ мм;
- $p_T > 30$ ГэВ;
- $0 < |\eta| < 1.37$ или $1.52 < |\eta| < 2.47$;

Мюоны (специально для $t\bar{t}$ CR):

- треки скомбинированы в ID и MS;
- требования ассоциация с PV: $|d_0| < 0.2$ мм, $|z_0| < 1$ мм;
- $p_T > 30$ ГэВ;
- $|\eta| < 2.47$;
- изоляция $p_T^{\Delta R < 0.2} / p_T < 0.2$;
- требования кол-ва хитов в мюонных триггерных камерах.

Струи:

- реконструкция AntikT4 с $\Delta R < 0.4$
- $p_T > 30$ ГэВ;
- $|\eta| < 2.8$;
- критерий качества "looser";
- отсутствие совпадения с лептонами, $\Delta R > 0.4$.

События (общий случай):

- двухплечевой (пара фотонов) триггер;
- строго 2 объекта-электрона;
- идентификация эл-в «medium»;
- асимметричный отбор пары электронов:
 - $p_T > 40$ (30) ГэВ для (суб)лидирующего электрона;
 - $E_T^{\Delta R < 0.2} < 0.007 \times E_T + 5$ ГэВ ($E_T^{\Delta R < 0.2} < 0.022 \times E_T + 6$ ГэВ);
- не менее 2 струй, 2 лидирующие рассматриваются далее.

События ($t\bar{t}$ CR):

- триггер одного «medium» электрона;
- строго 1 электрон (критерии для сублидирующего) и 1 мюон;
- не менее 2 струй;

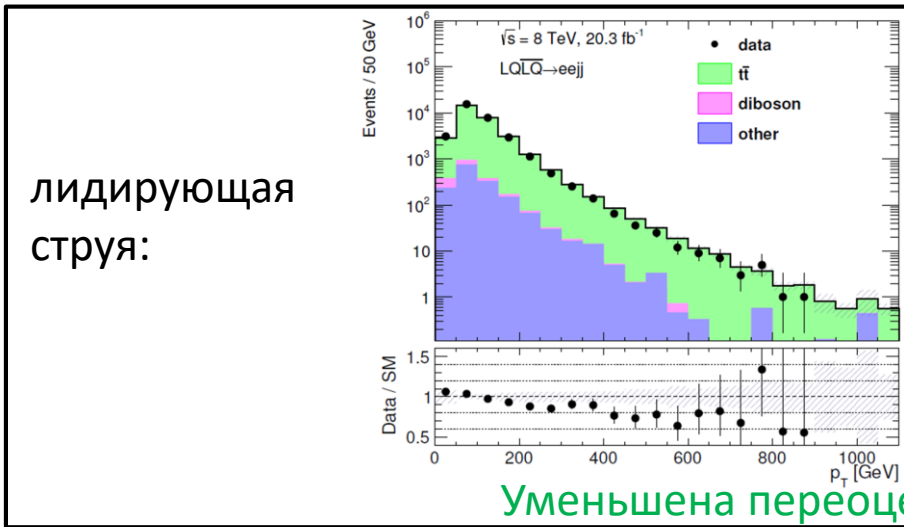
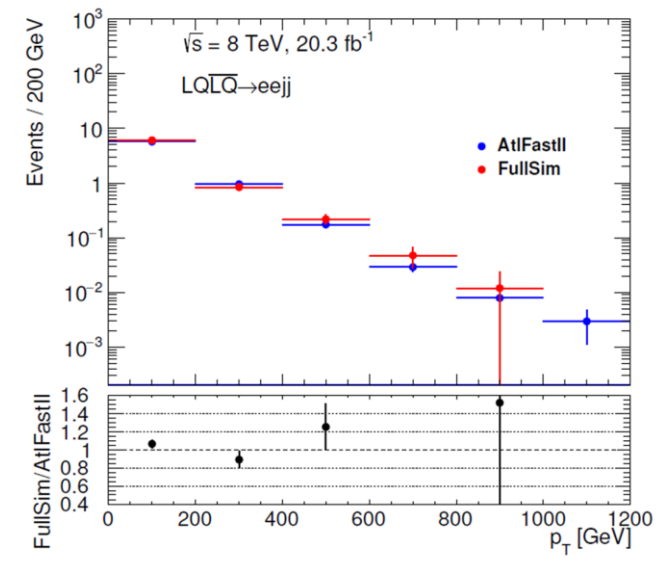
Оценка вклада фоновых и сигнальных процессов с помощью образцов MC

- Основные:
 - $Z/\gamma^* \rightarrow ee$: Sherpa 1.4.1;
 - $t\bar{t}$: Powheg+Pythia 6;
 - WW, WZ, ZZ : Herwig 6.52;
 - Wt : MC@NLO 4.01;
 - $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$: Sherpa 1.4.1;
 - $LQL\bar{Q}$ (300 ÷ 1300 ГэВ, шаг 50 ГэВ): Pythia 8;

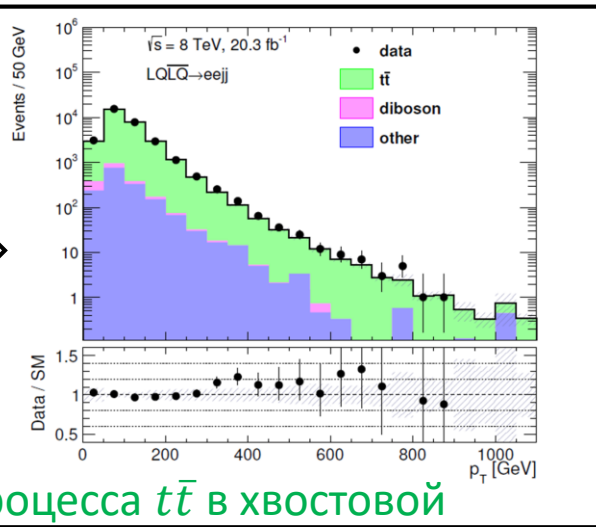
Коррекция MC	<ul style="list-style-type: none"> триггер; изоляция l; идентификация l; реконструкция l; загрузка; положение PV;
--------------	--

- Вспомогательные:
 - $Z/\gamma^* \rightarrow ee$: ALPGEN 2.14 + JIMMY 4.31;
 - $t\bar{t}$: Sherpa 1.4.1;
 - одионый t (s -канал): MC@NLO 4.01;
 - одионый t (t -канал): AcerMC 3.8 + Pythia 8;
 - W +струи: ALPGEN 2.14 + JIMMY 4.31;

Быстрая/полная симуляция.
Лидирующая струя:



коррекция
 $p_T^{t\bar{t}}$



Уменьшена переоценка вклада процесса $t\bar{t}$ в хвостовой части

- $\{N_{TT}, N_{TL}, N_{LT}, N_{LL}\}$ – измеряемые величины (вклады); T – все условия первичного отбора, L – изменённый первичный отбор: минимальные критерии идентификации триггера;
- $\{N_{RR}, N_{RF}, N_{FR}, N_{FF}\}$ – истинные величины;
- $r_{1(2)}, f_{1(2)}$ – истинная и ложная эффективности лидирующего (сублидирующего) электрона.

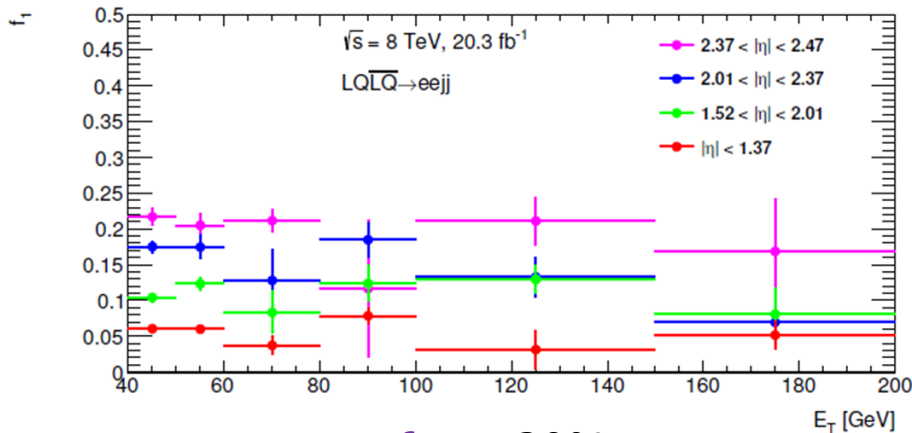
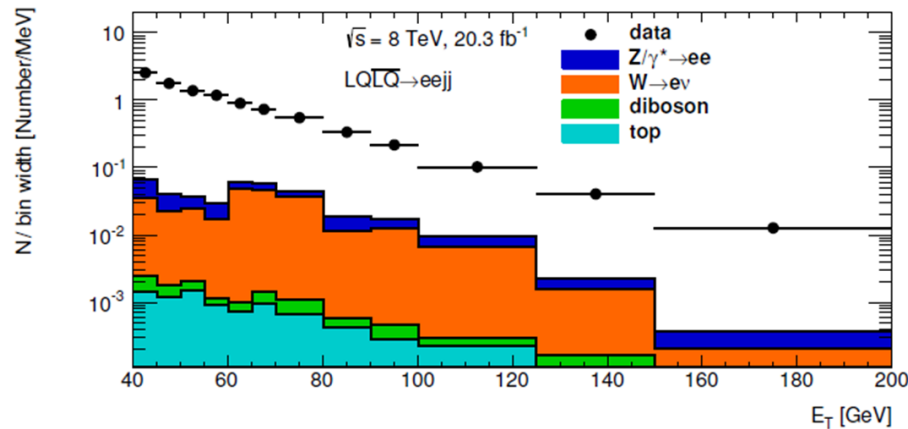
$$\begin{bmatrix} N_{TT} \\ N_{TL} \\ N_{LT} \\ N_{LL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{RR} \\ N_{RF} \\ N_{FR} \\ N_{FF} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_1 r_2 & r_1 f_2 & f_1 r_2 & f_1 f_2 \\ r_1 (1 - r_2) & r_1 (1 - f_2) & f_1 (1 - r_2) & f_1 (1 - f_2) \\ (1 - r_1) r_2 & (1 - r_1) f_2 & (1 - f_1) r_2 & (1 - f_1) f_2 \\ (1 - r_1) (1 - r_2) & (1 - r_1) (1 - f_2) & (1 - f_1) (1 - r_2) & (1 - f_1) (1 - f_2) \end{bmatrix}$$

Оценка вклада фоновых процессов с помощью матричного метода

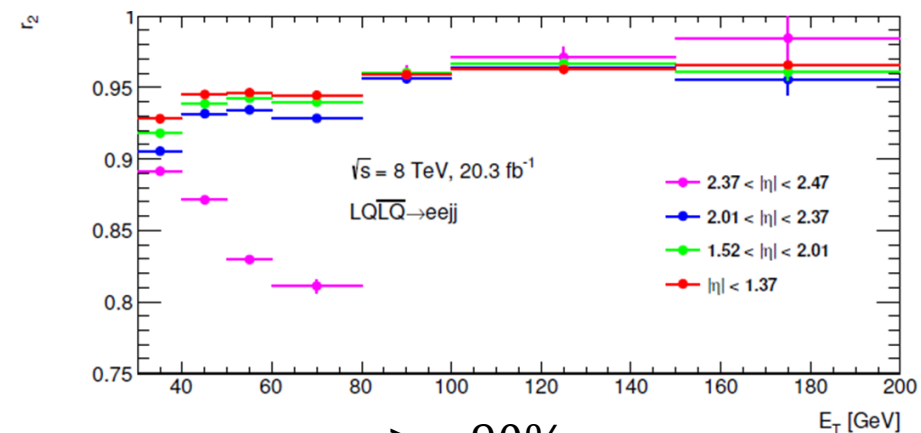
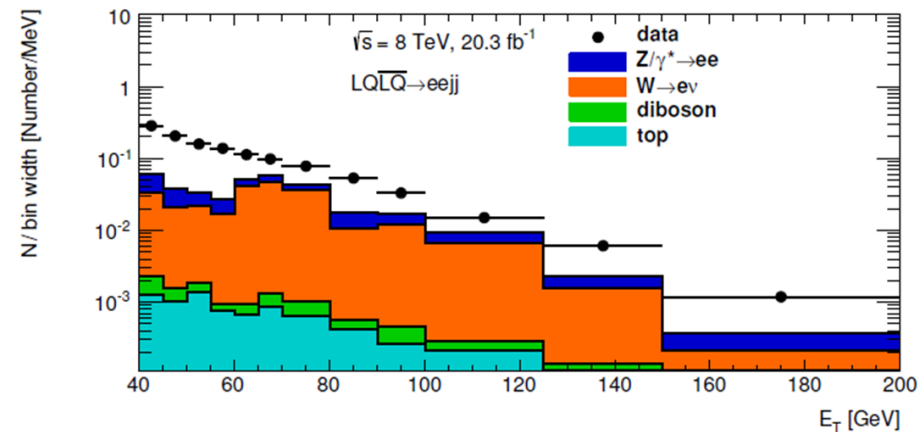
Измерение r – методом «тэга и зонда» (выборка событий $Z \rightarrow ee$, ($|m_{T\&P} - 91| \leq 10$ ГэВ)), f – обратного «тэга и зонда» (выборка событий с множественными струями в данных, подавление вклада истинных электронов от W ($E_T^{mis.} < 25$ ГэВ), Z ($|m_{T\&P} - 91| \geq 20$ ГэВ), идентичный знак зарядов тэга и зонда).

Лидирующий L:



$f < \sim 20\%$

Лидирующий T:

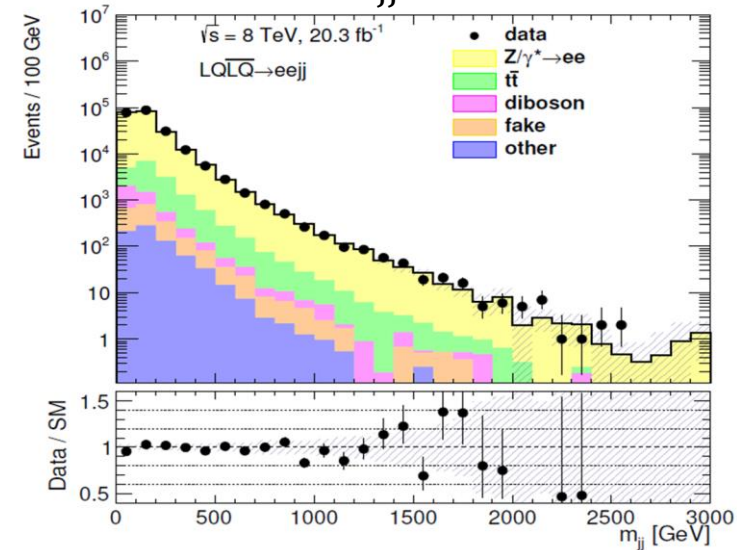


$r > \sim 90\%$

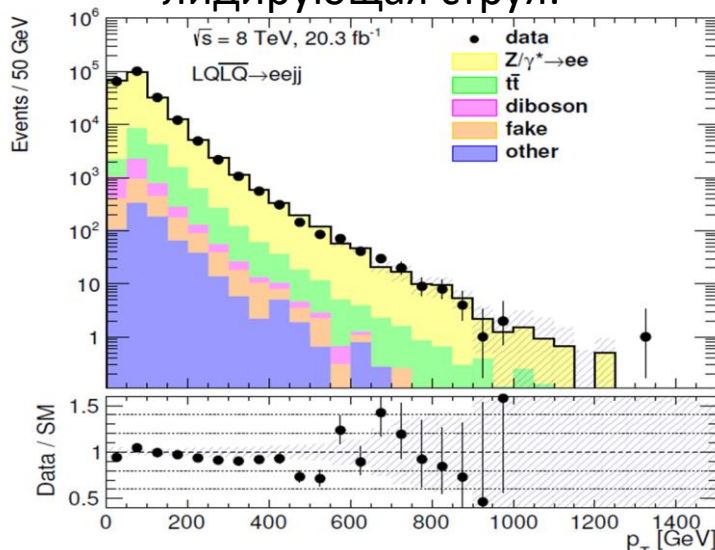
Источники фона:

- Основные:
 - Z / γ^* (MC+CR), 92% - вклад распада Z преобладает после первичного отбора;
 - $t\bar{t}$ (MC+CR), 6%;
- Второстепенные:
 - WW, WZ, ZZ (MC), 1.1%;
 - Ложные лептоны (MM), 0.6%;
 - Одиночный t (Wt) (MC), 0.3%;
 - $Z \rightarrow \tau\tau$ (MC), 0.06%.

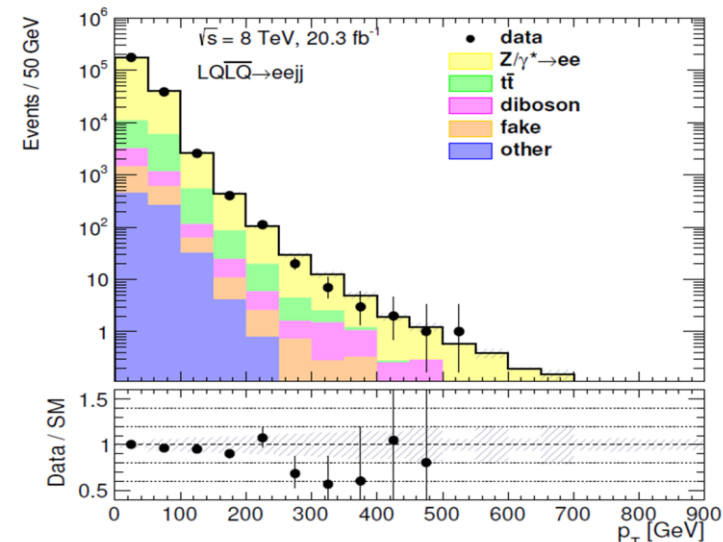
m_{jj} :



лидирующая струя:

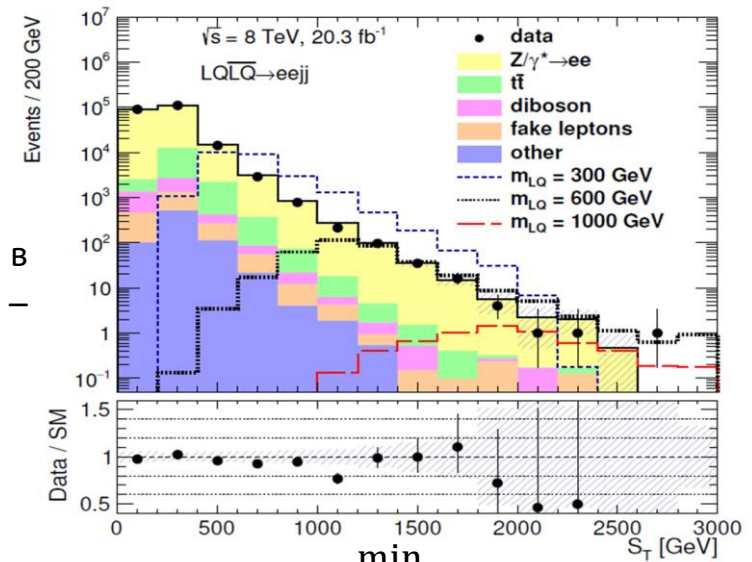


сублидирующий электрон:

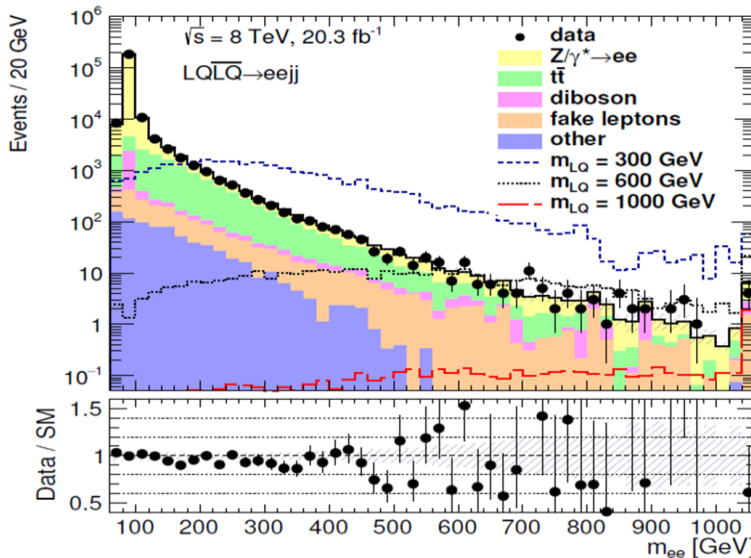


- Основные соображения при выборе:
 - физический смысл и обоснованность переменной;
 - эффективность;
 - надёжность моделирования переменной в образцах MC;
 - баланс надёжности анализа и его чувствительности к LQ;
- 3 дискриминирующие переменные:
 - Наименьшая из двух реконструированных масс LQ в событии, m_{LQ}^{\min} . Рассматриваются все комбинации l и j – выбирается пара с меньшей Δm_{LQ} ;
 - $S_T = p_T^{l1} + p_T^{l2} + p_T^{j1} + p_T^{j2}$;
 - m_{ll} ;
- Эффективность $\{m_{LQ}^{\min}, S_T, m_{ll}\}$ подтверждена BDT.

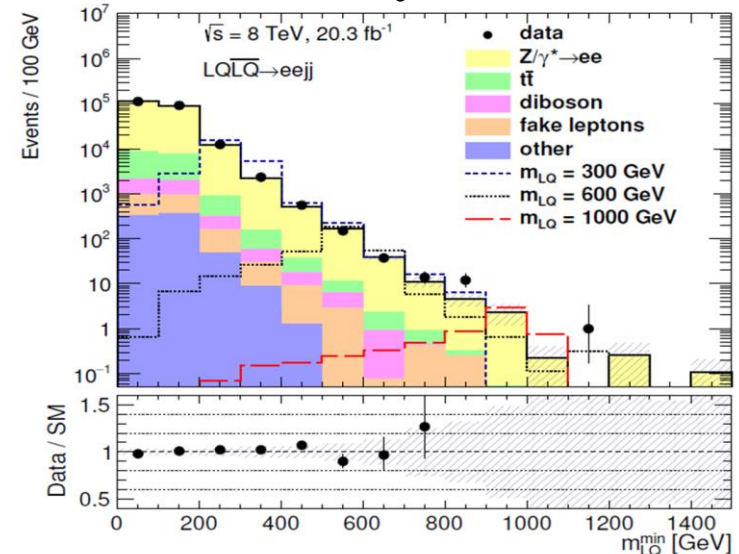
S_T :



m_{ee} :



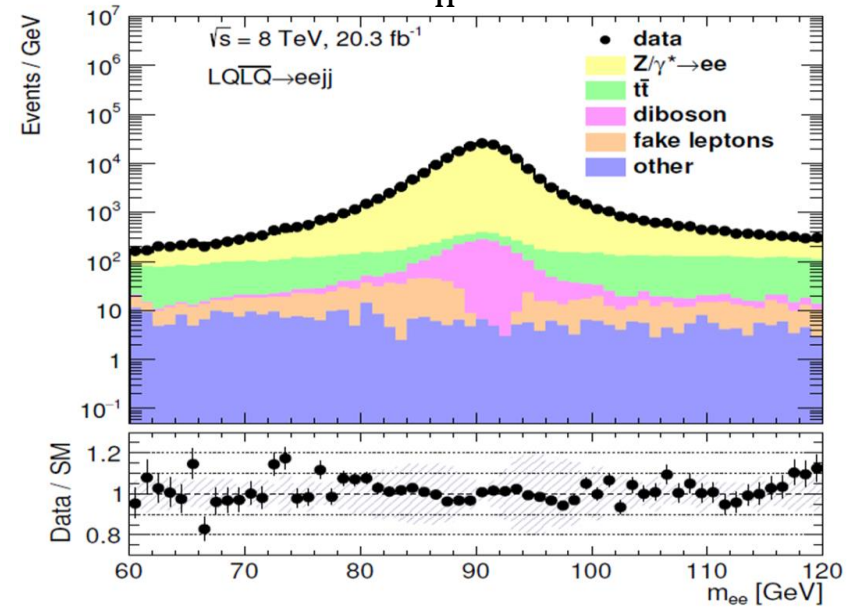
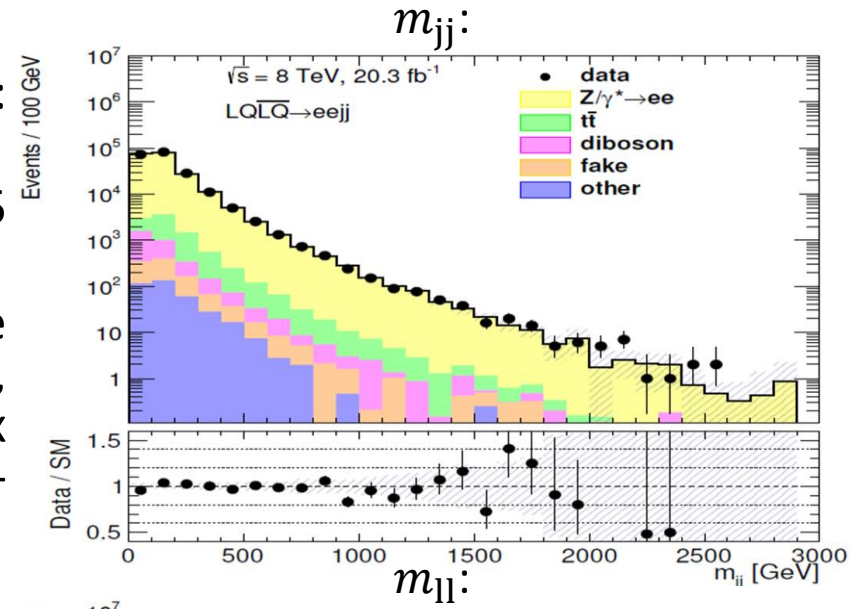
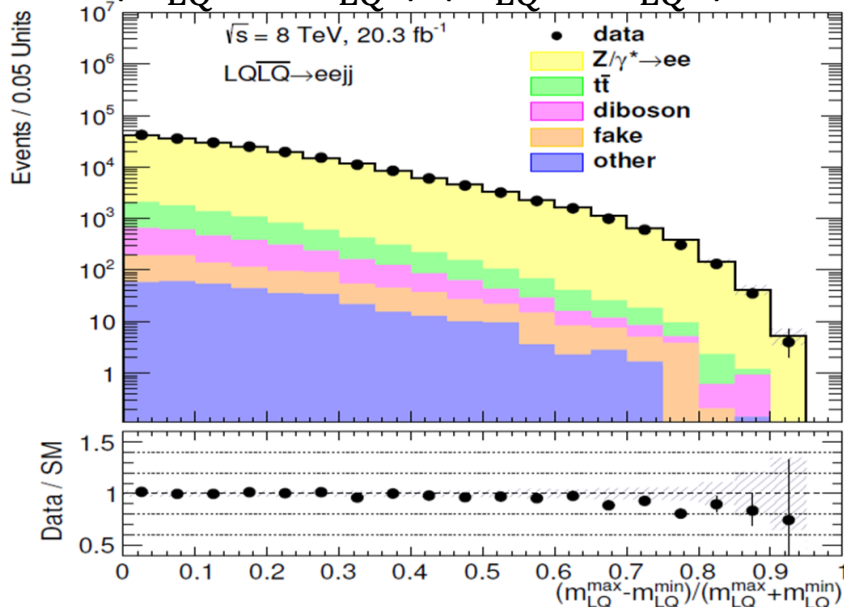
m_{LQ}^{\min} :



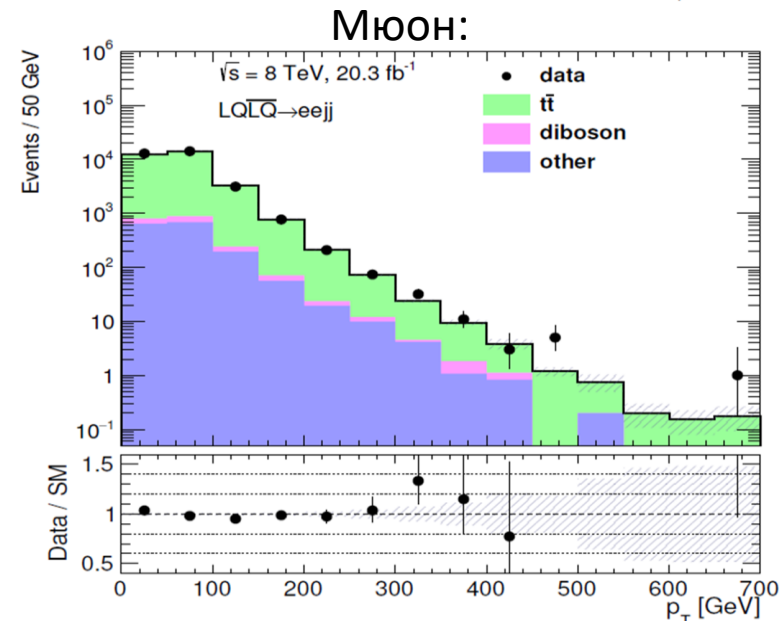
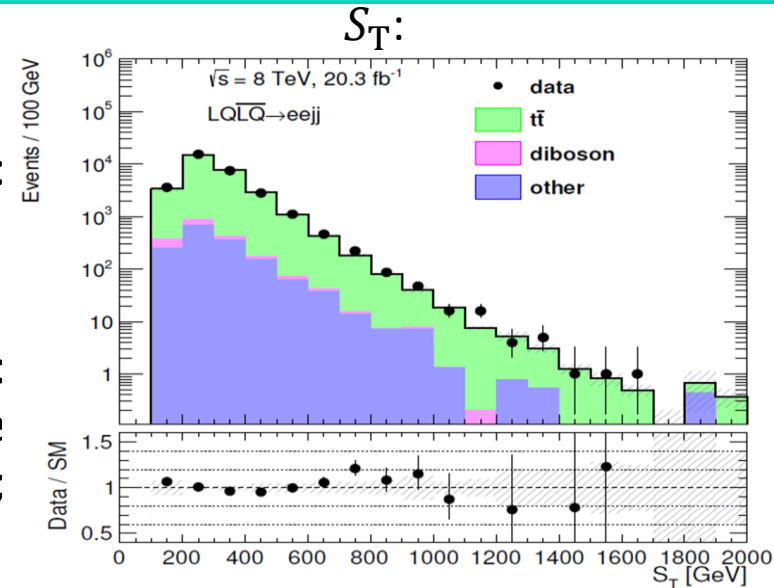
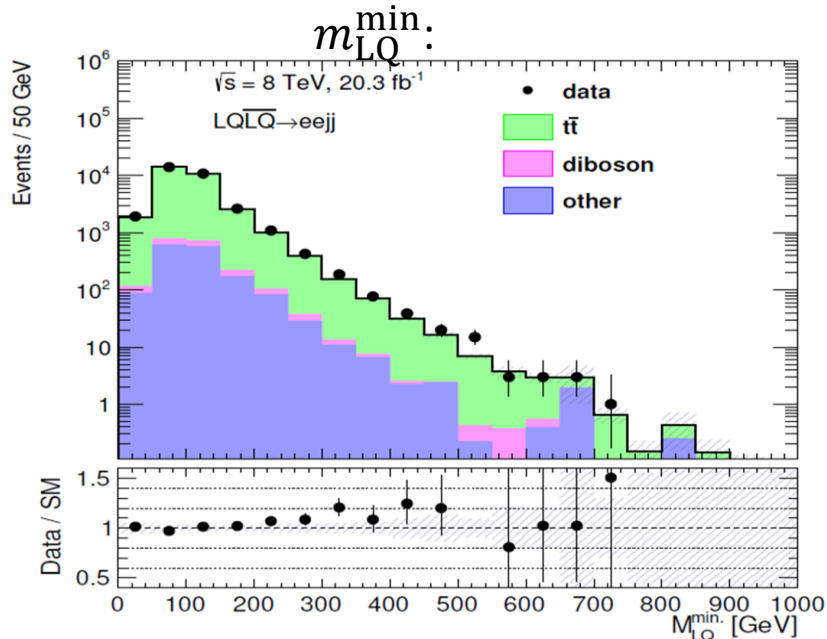
Контрольные области (CR). Z/γ^* .

- Окно $60 \text{ ГэВ} < m_{ll} < 120 \text{ ГэВ}$;
- Статистическая обеспеченность данных: 204361 событий;
- Преобладает вклад процесса $Z \rightarrow ee$ (95 %);
- Эффективное измерение: оценка нормировки Z/γ^* , подавление неопределённостей; описывается соотношением LF.

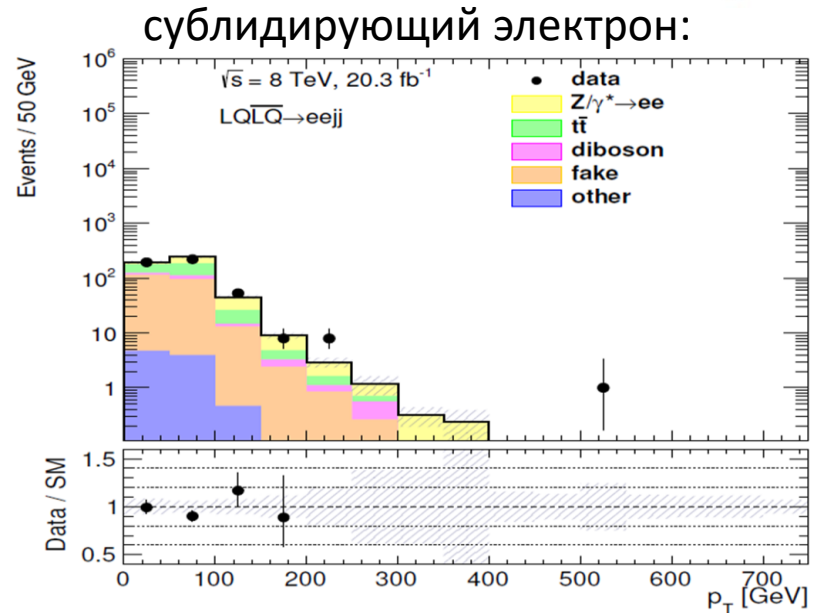
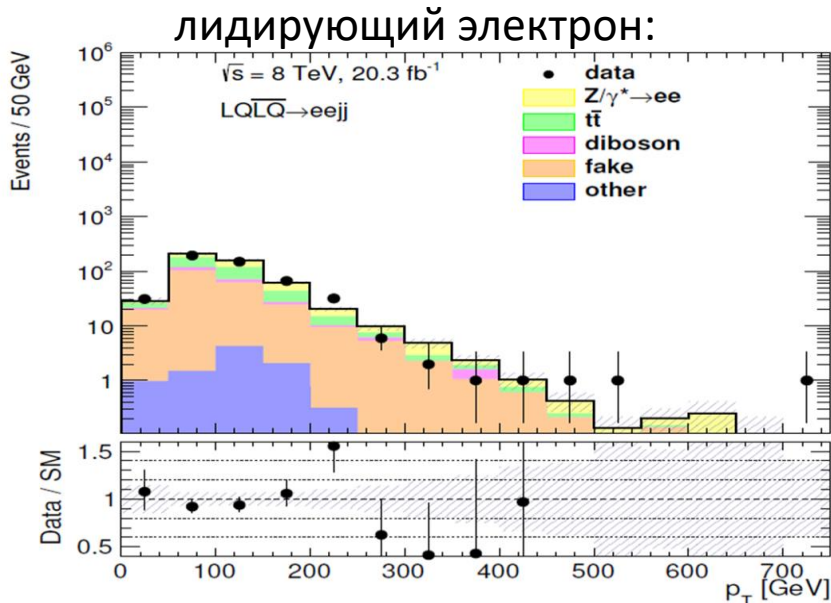
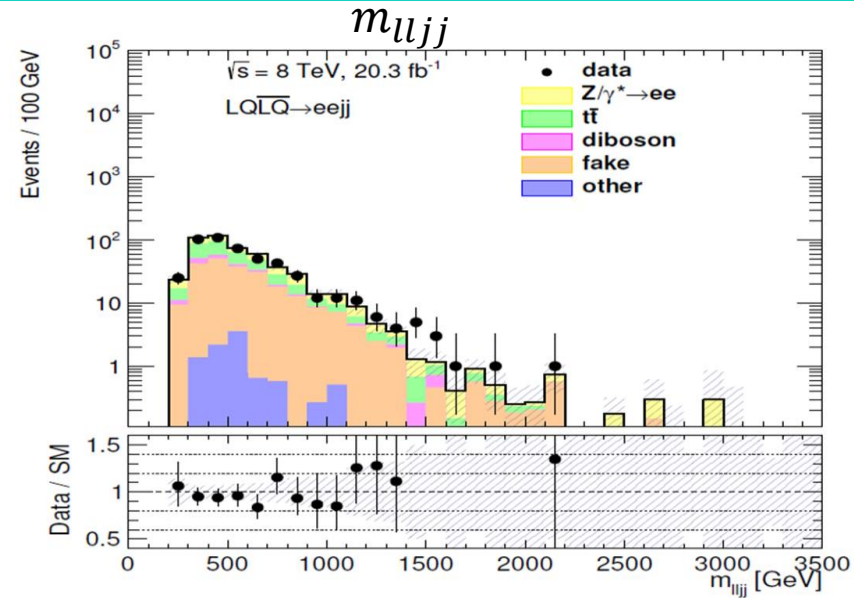
$$(m_{LQ}^{\max} - m_{LQ}^{\min}) / (m_{LQ}^{\min} + m_{LQ}^{\max}):$$



- Изменённый (специальный) первичный отбор;
- Статистическая обеспеченность данных: 31200 событий;
- Преобладает вклад процесса $t\bar{t}$ (93 %);
- Эффективное вспомогательное измерение: оценка нормировки $t\bar{t}$, подавление систематических неопределённостей; описывается соот-щим членом LF.



- Проверка состоятельности оценки фона MM;
- Дополнительные (к первичным) условия отбора:
 - $m_{ll} > 160$ ГэВ (подавление вклада событий от распада Z-бозона);
 - идентичный знак заряда лептонов события (события QCD);
- Преобладает вклад фона **ЛОЖНЫХ ЛЕПТОНОВ**, а также Z / γ^* и $t\bar{t}$ с некорректно восстановленным знаком заряда лептона;
- Не входит в LF; служит целям мониторинга.

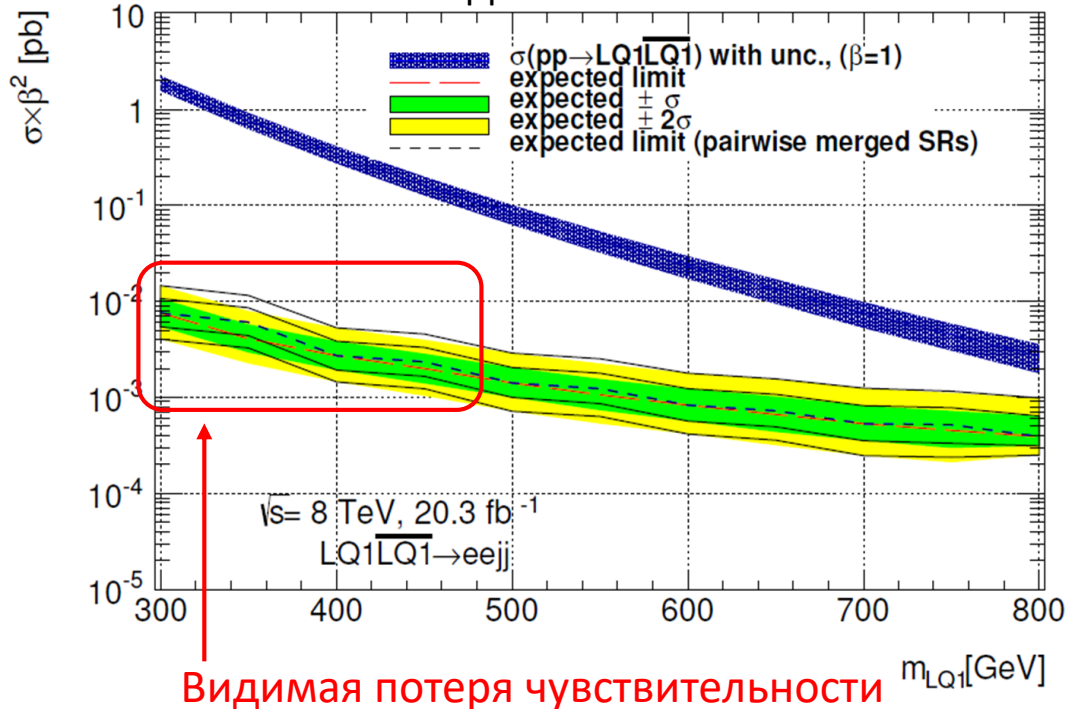


Критерий значимости Z (медиана):

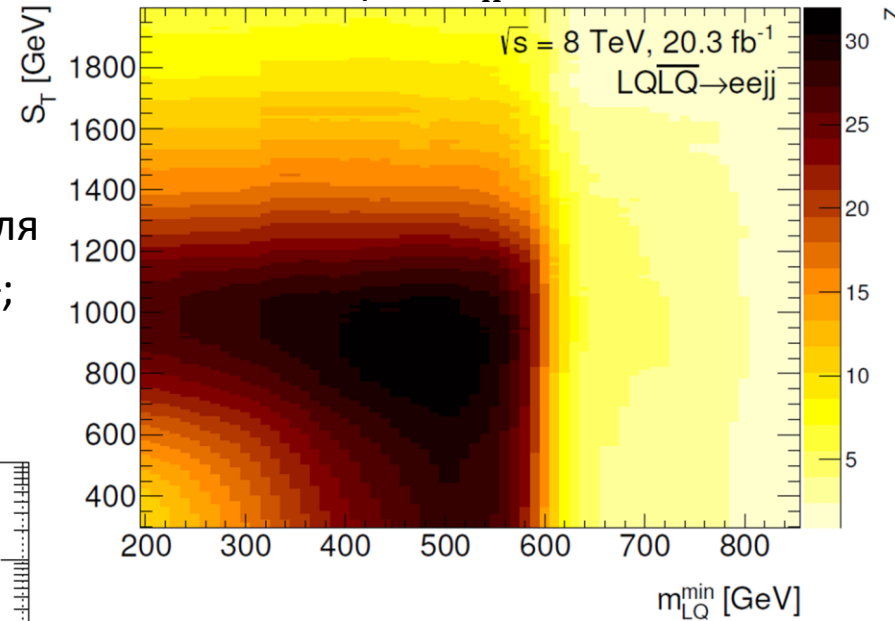
$$Z = \sqrt{2[(S + B) \ln(1 + S/B) - S]},$$

3D оптимизация условий отбора “>” для дискриминирующих переменных $\{m_{LQ}^{\min}, S_T, m_{ll}\}$;

Индивидуальная оптимизация или попарное объединение SR:



Срез $m_{ll} > 180$ ГэВ:



Оптимизированный набор SR:

	LQ masses [GeV]	$m_{\ell\ell}$ [GeV]	S_T [GeV]	m_{LQ}^{\min} [GeV]
SR1	300	130	460	210
SR2	350	160	550	250
SR3	400	160	590	280
SR4	450	160	670	370
SR5	500–550	180	760	410
SR6	600–650	180	850	490
SR7	700–750	180	950	580
SR8	800–1300	180	1190	610

- Измерение светимости;
- Электроны:
 - эффективность реконструкции (реконструкция, триггер, идентификация, изоляция);
 - энергетическая шкала (калибровка);
 - энергетическое разрешение;
- Струи:
 - энергетическая шкала (калибровка), 15 s.s. (сокращённый кортеж);

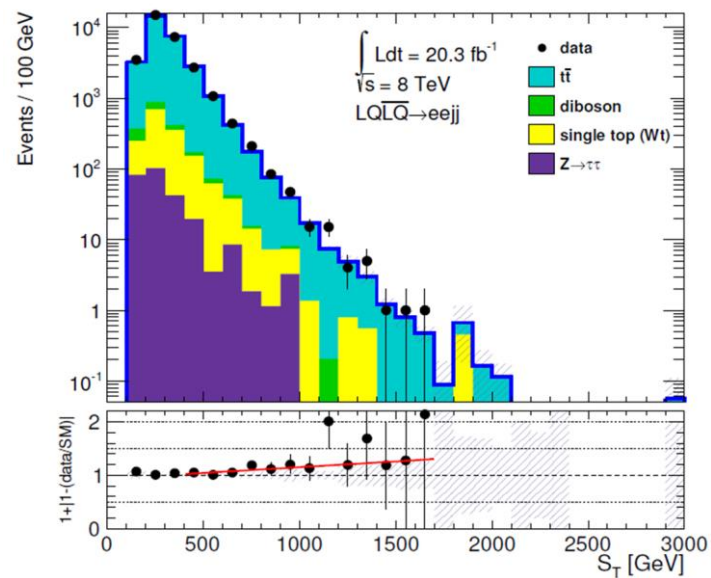
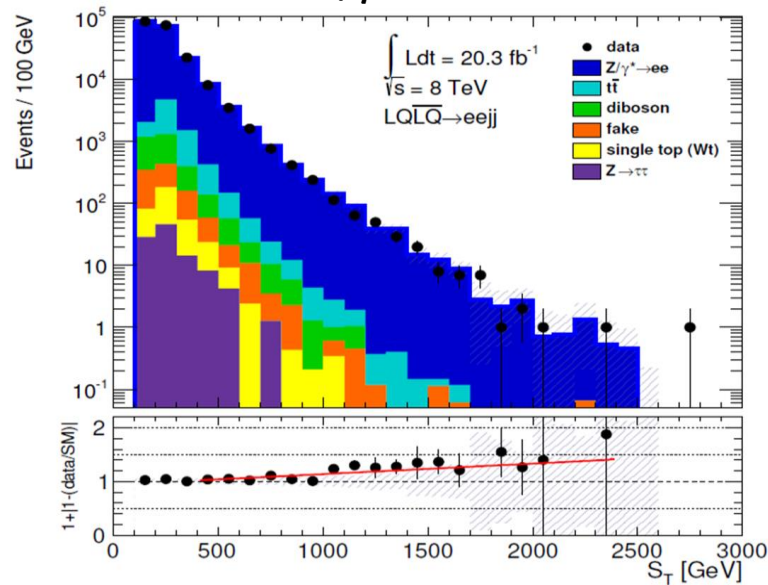
η – перекал.: модел.	η – перекал.: стат./мет.	композиция аромата	отклик на аромат	“in-situ” NP 1
“in-situ” NP 2	“in-situ” NP 3	“in-situ” NP 4	“in-situ” NP 5	“in-situ” NP 6
загрузка: μ	загрузка: ρ	загрузка: NPV	загрузка: p_T	рассогласование с полной симуляцией

- энергетическое разрешение;
- Матричный метод (фон ложных лептонов);
- Статистическая ограниченность MC образцов в CR и SR;
- Нормировка Z/γ^* и $t\bar{t}$, измеряется в CR.

- Влияние выбора функция плотности распределения партонов на акцептанс. 3 разных PDF (PDF4LHC) - CT10, MSTW2008, NNPDF2.3 (нейронные сети); учтено:
 - собственная неопределённости PDF (68% CL);
 - вариация оценок от разных PDF;
 - неопределённость α_s (68% CL);
- Сечение второстепенных фоновых процессов ($VV, Wt, Z \rightarrow \tau\tau$);
- Моделирование Z/γ^* и $t\bar{t}$ (связь CR и SR);

Z/γ^* CR

$t\bar{t}$ CR

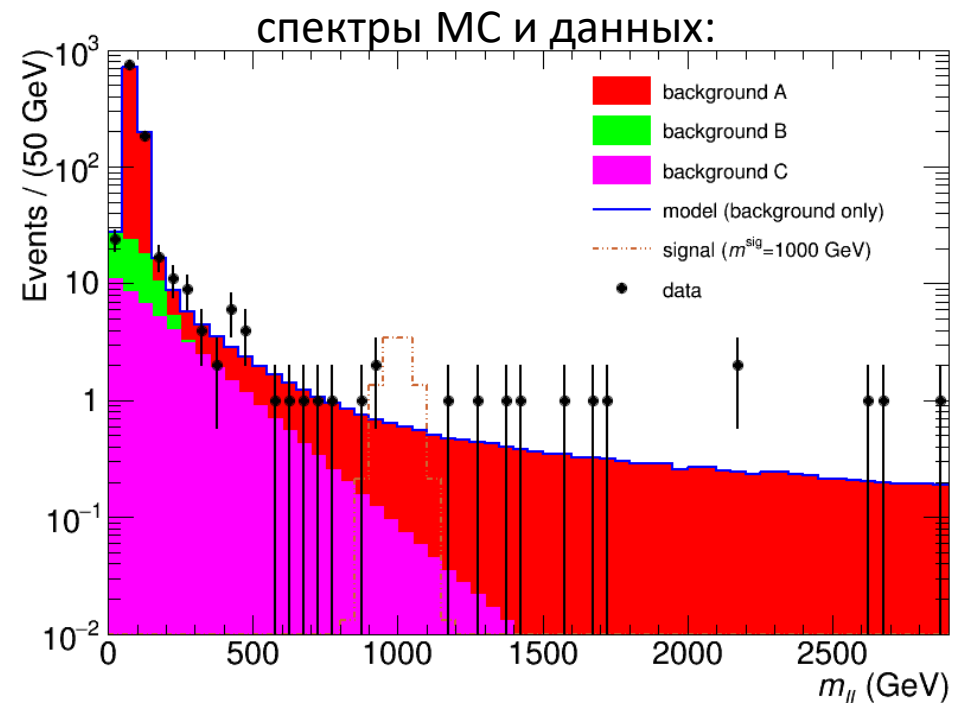
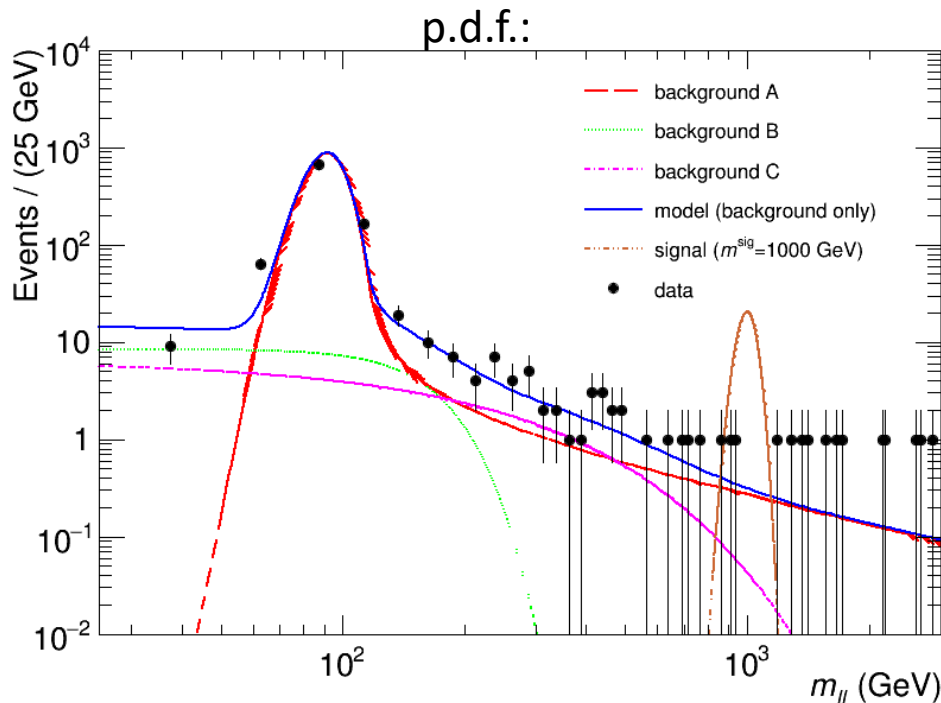


Итого: **30**
мешающих
параметров
(NP) в
статистической
модели.

Независимо от коллаборации ATLAS!

Смоделирована характерная экспериментальная конфигурация:

- 1 наблюдаемая величина;
- 1 CR;
- образцы фоновых и сигнальных процессов;
- комплект (псевдо-)данных, без сигнала;
- источники систематических неопределённостей с описанием вспомогательных измерений



Частотный формализм.

Функция правдоподобия (LF):

$$L(N, \theta^0, m | \mu, \beta, \theta, \gamma) =$$

$$P \left(N_{SR} \mid \underbrace{\left[\mu \times S_{SR} \times \prod_i^{Sys} \nu_{SR, sig}^i(\theta_i) + \sum_l^{Bkg} \beta_l \times B_{SR, l} \times \prod_i^{Sys} \nu_{SR, l}^i(\theta_i) \right]}_{\xi_{SR}} \times \gamma_{SR} \right)$$

Пуассоновский член для SR

полиномиальная интерполяция, показательная экстраполяция:

$$\nu(\theta | I^0, I^+, I^-) = \begin{cases} (I^+ / I^0)^\theta & \theta \geq 1, \\ 1 + \sum_{i=1}^6 a_i \times \theta^i & |\theta| < 1, \\ (I^- / I^0)^{-\theta} & \theta \leq -1. \end{cases}$$

$$\times P \left(N_{CR} \mid \underbrace{\left[\sum_l^{Bkg} \beta_l \times B_{CR, l} \times \prod_i^{Sys} \nu_{CR, l}^i(\theta_i) \right]}_{\xi_{CR}} \times \gamma_{CR} \right)$$

Пуассоновский член для CR

μ – интересующий параметр (POI); $\sigma = \mu \times \sigma^{theor}$.

$$\times \underbrace{\prod_n^{Sys} G(\theta_n^0 | \theta_n, 1)}_{\text{Гауссовский ограничивающий член}} \times \underbrace{\prod_p^{Reg} P(m_p | \gamma_p \times \tau_p)}_{\text{Пуассоновский ограничивающий член}}$$

Описывает данные, фоновые и сигнальные образцы, CR и SR, систематические неопределённости.

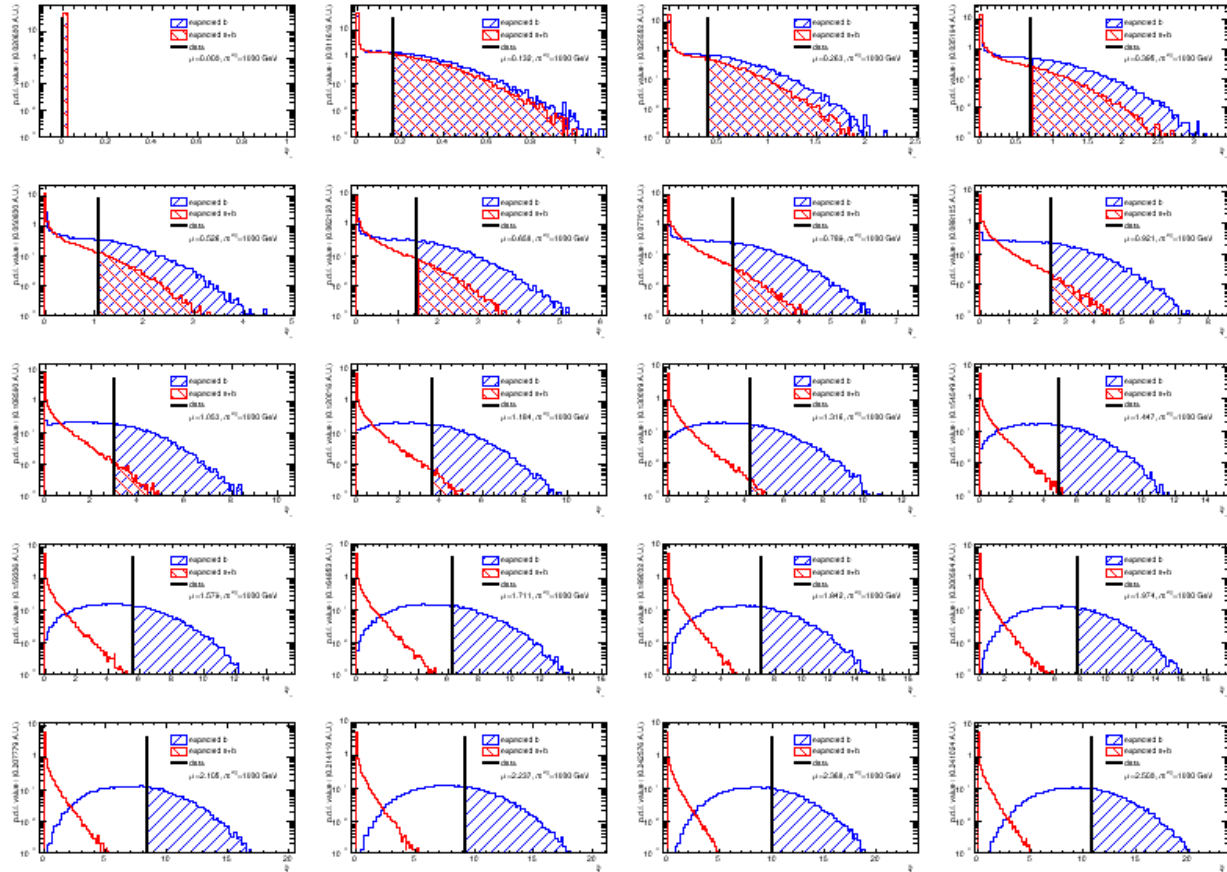
- Односторонний критерий, основанный на LR:
 - обладает рядом свойств оптимальности (UMPU);
 - ориентирован на поиск превышений над ожиданием;

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\beta}(\mu), \hat{\theta}(\mu), \hat{\gamma}(\mu))}{L(0, \hat{\beta}(0), \hat{\theta}(0), \hat{\gamma}(0))} & \hat{\mu} < 0, \\ -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\beta}(\mu), \hat{\theta}(\mu), \hat{\gamma}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\beta}, \hat{\theta}, \hat{\gamma})} & 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu, \\ 0 & \hat{\mu} > \mu. \end{cases}$$

- Ансамбли псевдоэкспериментов (PE):

- численно моделируют $f(\tilde{q}_\mu)$;
- генерируются для каждого тестируемого значения μ

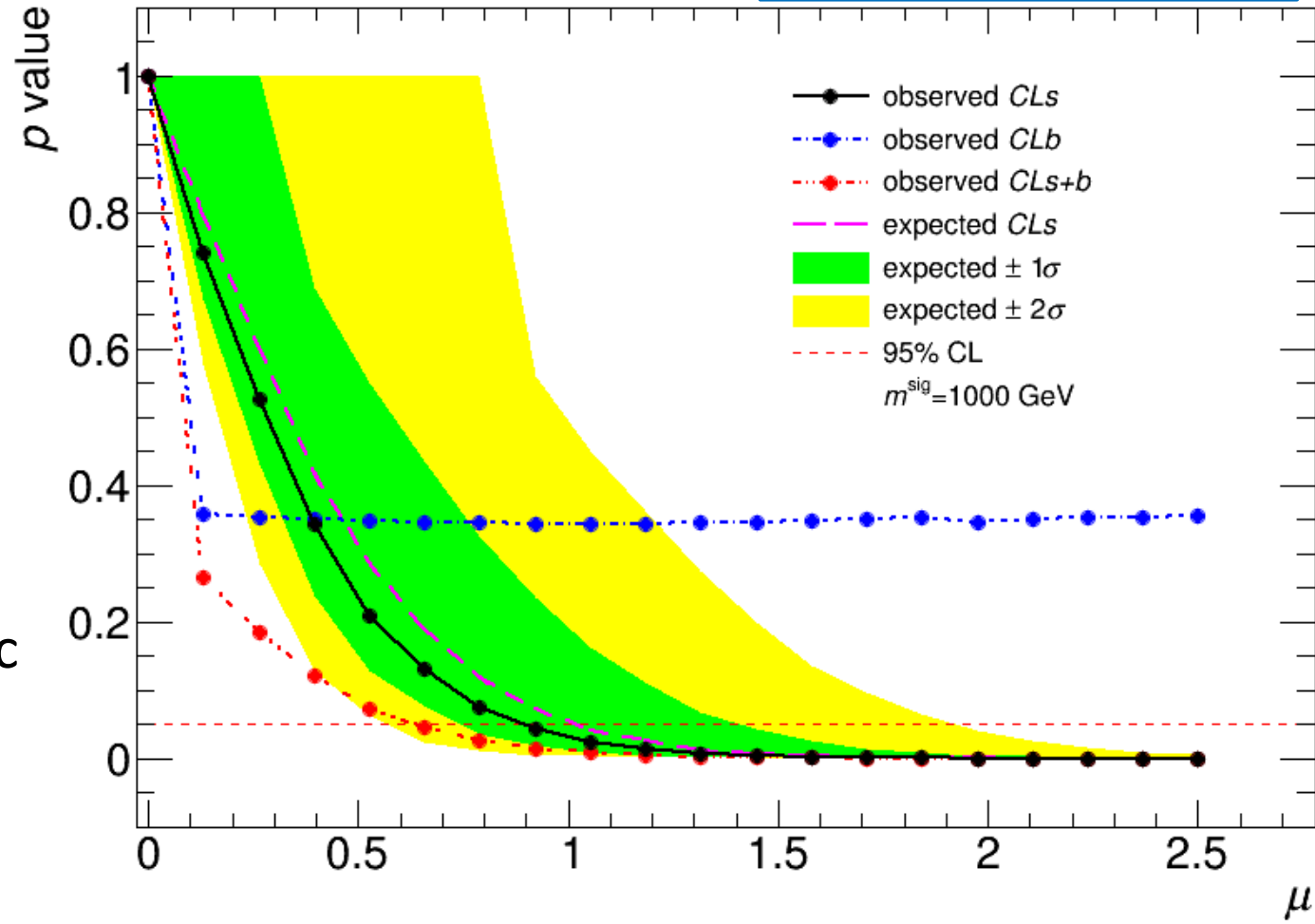
$$p_\mu = \int_{q_{\mu, obs}}^{\infty} f(\tilde{q}_\mu | \mu) dq_\mu.$$



Метод CL_s :

- Основан на p -значениях;
- Использует инверсию результатов сканирования значений μ
- Обладает свойством консервативности;

$$CL_s = \frac{CL_{s+b}}{1 - CL_b}$$

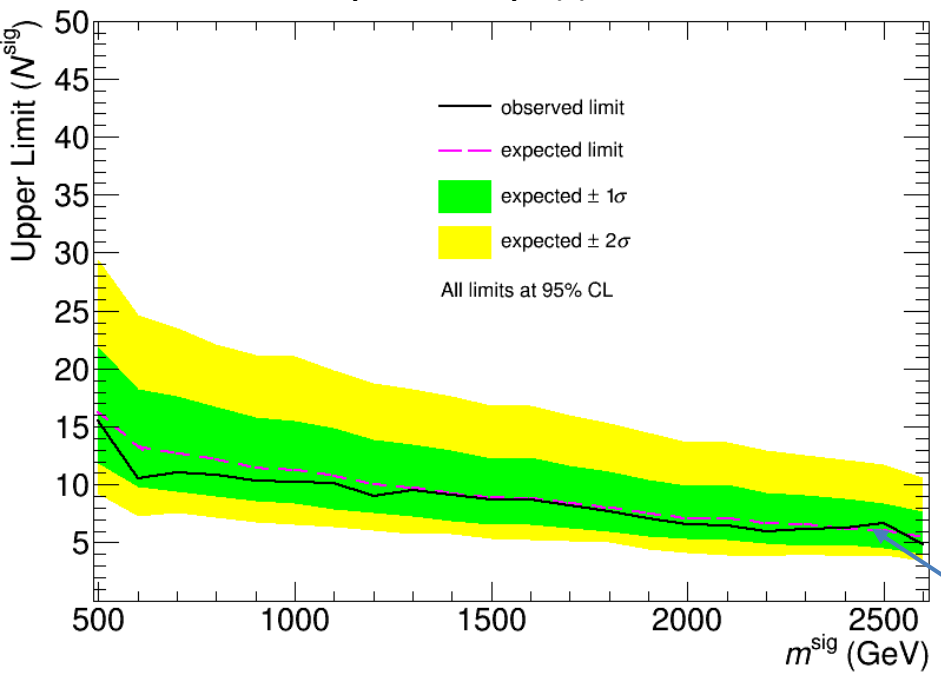


Специальный критерий:

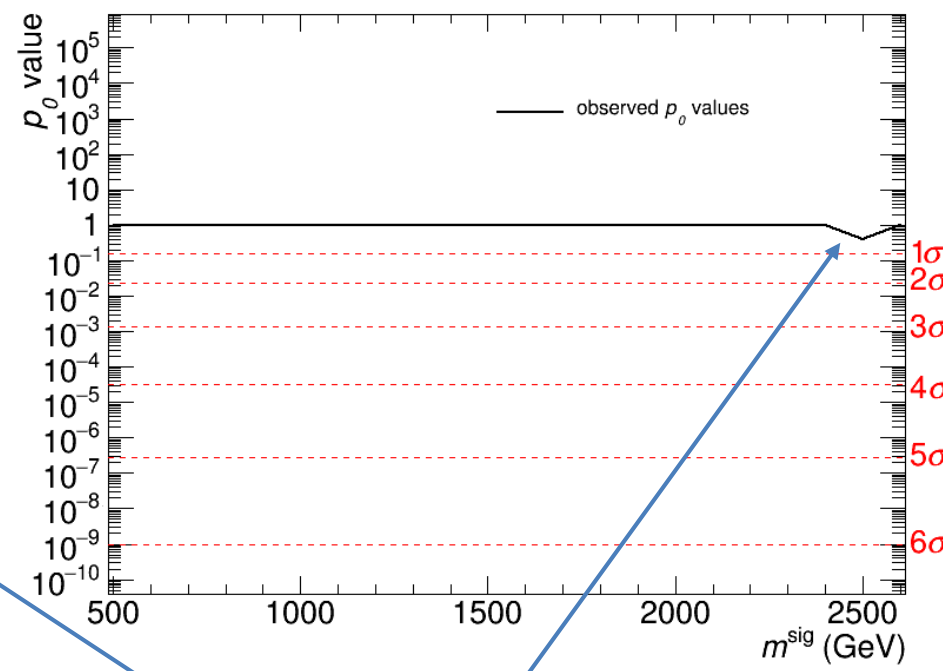
- не является частным случаем \tilde{q}_μ ;
- интерпретирует только флуктуации вверх.

$$q_0 = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(0, \hat{\beta}(0), \hat{\theta}(0), \hat{\gamma}(0))}{L(\hat{\mu}, \hat{\beta}, \hat{\theta}, \hat{\gamma})} & \hat{\mu} \geq 0, \\ 0 & \hat{\mu} < 0. \end{cases}$$

Верхний предел:



p_0 значения:

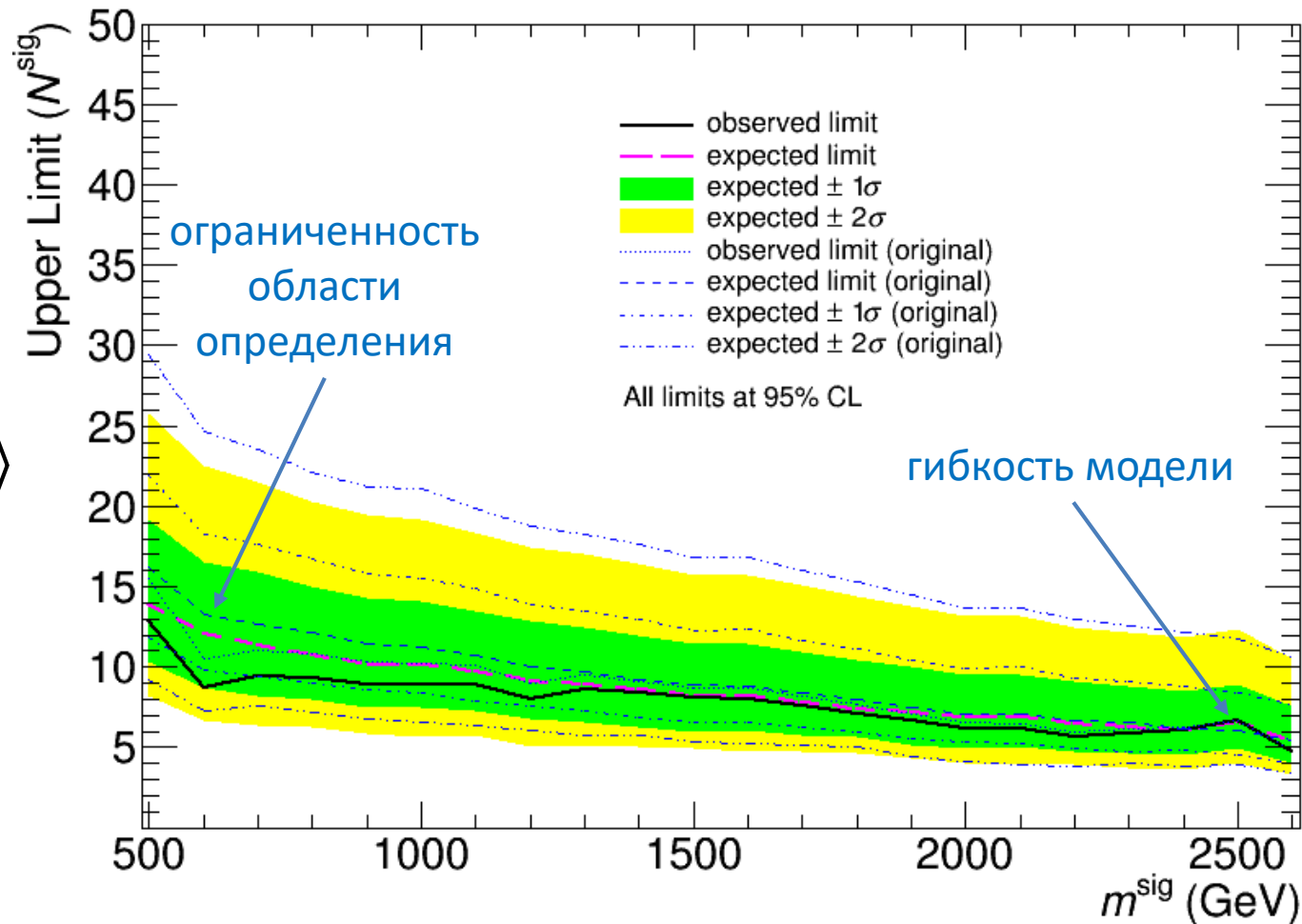


флуктуация вверх

Выбор статистической модели (p.d.f.) для источника систематической неопределённости:

- фактор субъективности;
- концептуальная проблема теоретических s.u. в частотном формализме;

Эффект от замены нормальной p.d.f. на равномерную для одного из значимых s.s.:

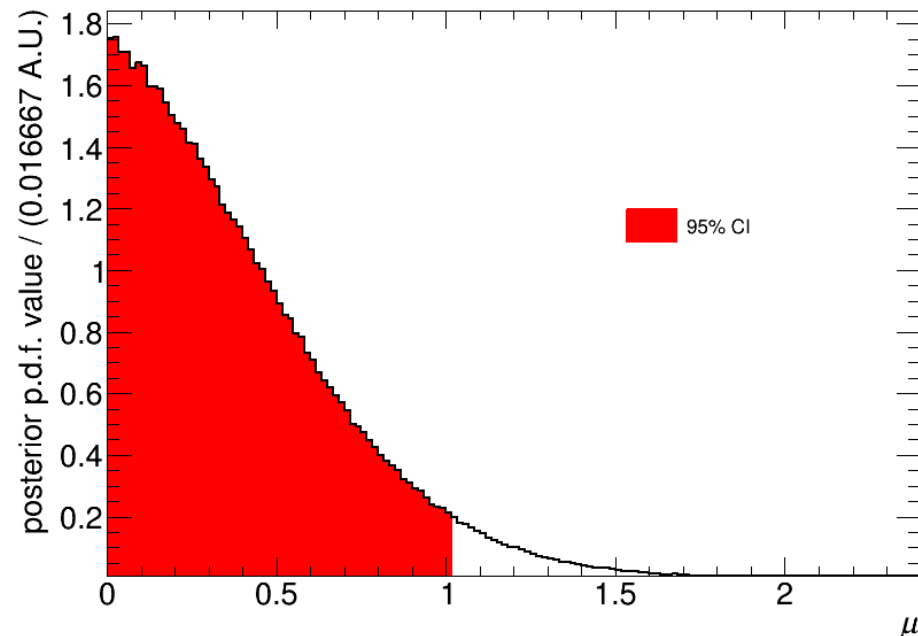


Постериорная вероятность, P :

- функция правдоподобия, L_B (Пуассоновские члены частотной LF);
- приоры параметров, P_0 (модели вспомогательных измерений для NP);

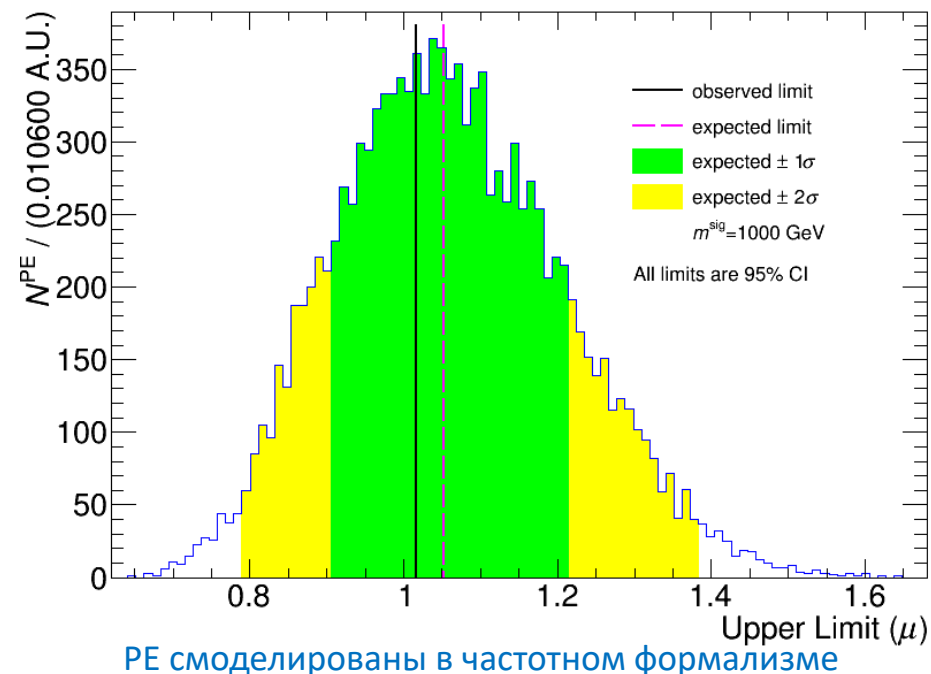
$$P(\mu, \beta, \theta, \gamma | N, \theta^0, m) = \frac{L_B(N, \theta^0, m | \mu, \beta, \theta, \gamma) \times P_0(\beta, \theta, \gamma | \theta^0, m)}{\int L_B(N, \theta^0, m | \mu, \beta, \theta, \gamma) \times P_0(\beta, \theta, \gamma | \theta^0, m) d\mu d\beta d\theta d\gamma}$$

Верхний предел для μ :



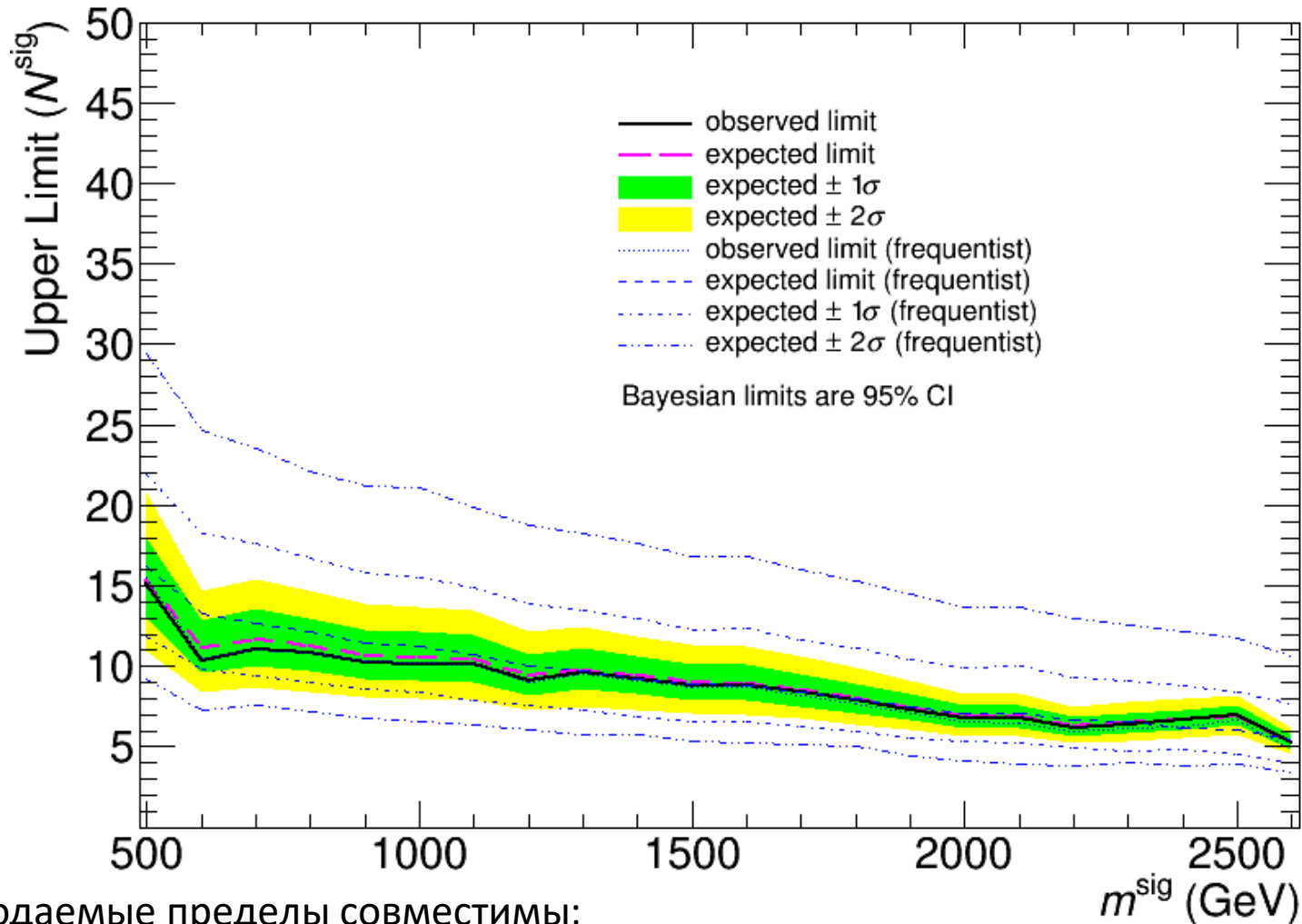
Следует напрямую из P

Ансамбль пределов для μ :



PE смоделированы в частотном формализме

Частотный и Байесовский верхние пределы:

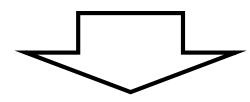


- Наблюдаемые пределы совместимы;
- Совпадают с ожидаемыми в сопоставимых границах (1σ);
- Обеспечивают одинаковую интерпретацию.

- 2 CR (Z/γ^* и $t\bar{t}$) + 1 SR;
- Простой счётный эксперимент;
- Частотный формализм;
- Нормальная p.d.f. для всех s.s.;
- Метод CL_S ;
- 95% CL;
- 10000 $s+b$ и 5000 b псевдоэкспериментов;

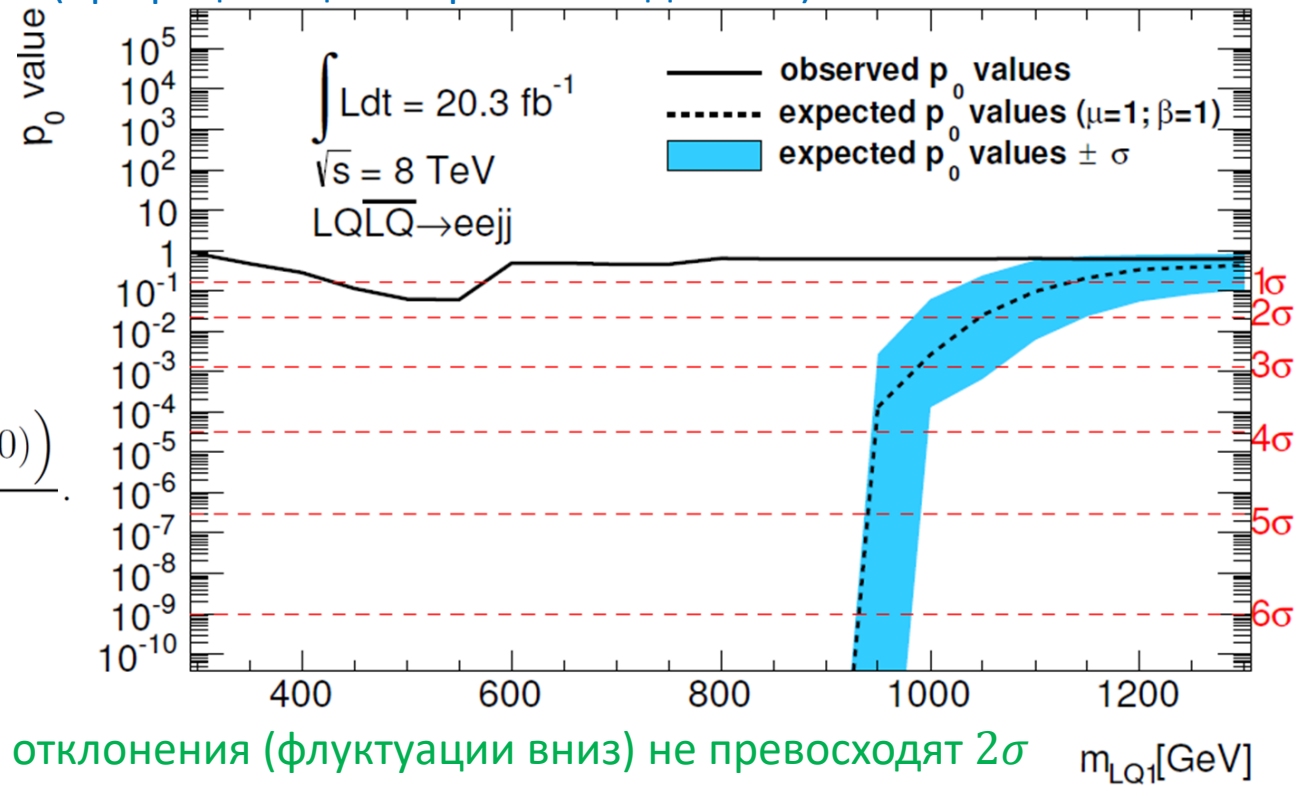
флуктуации вниз (профицит оценки фона отн. данных) во всех SR

Двусторонний критерий – интерпретирует флуктуации вверх и вниз:

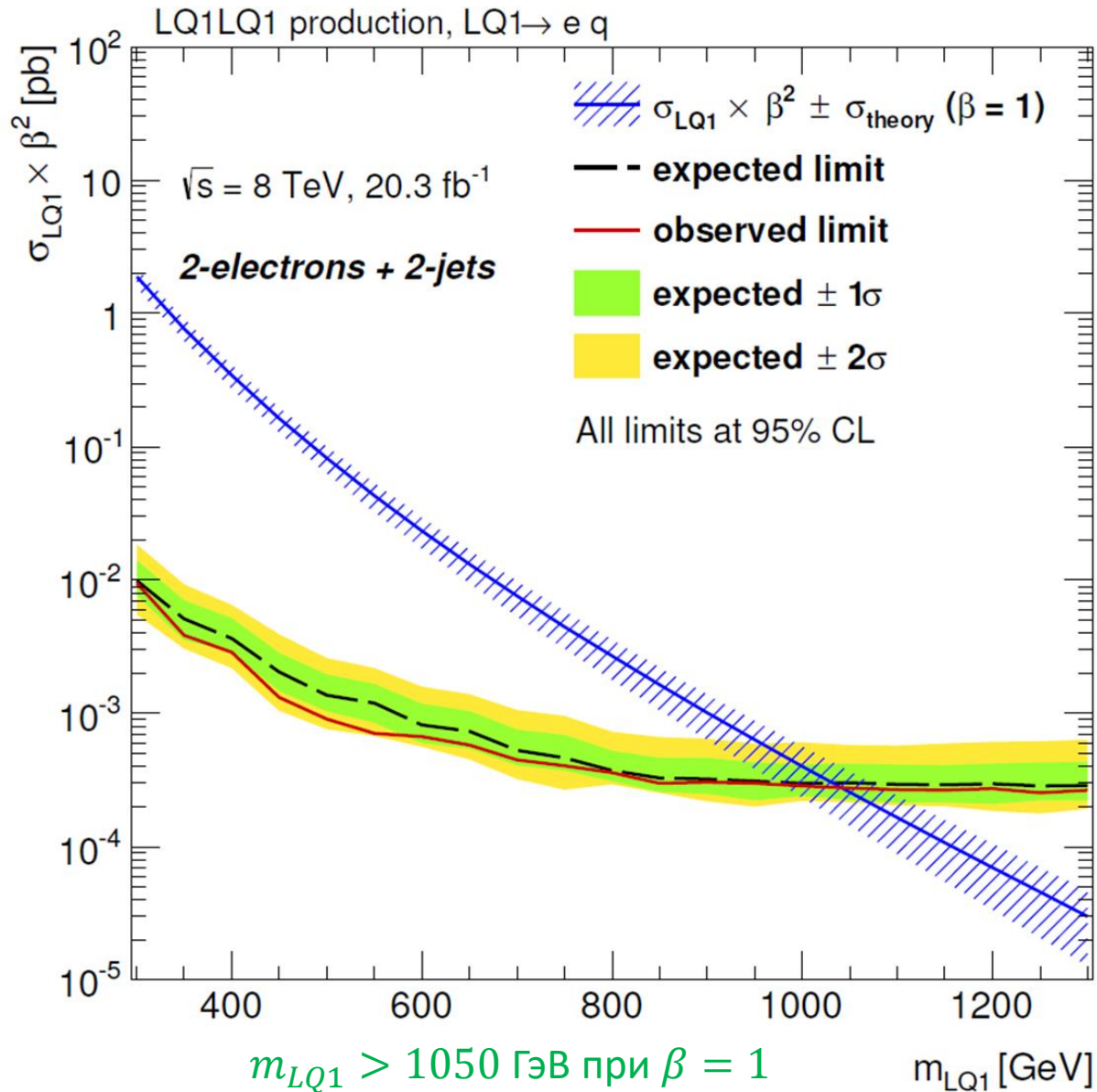


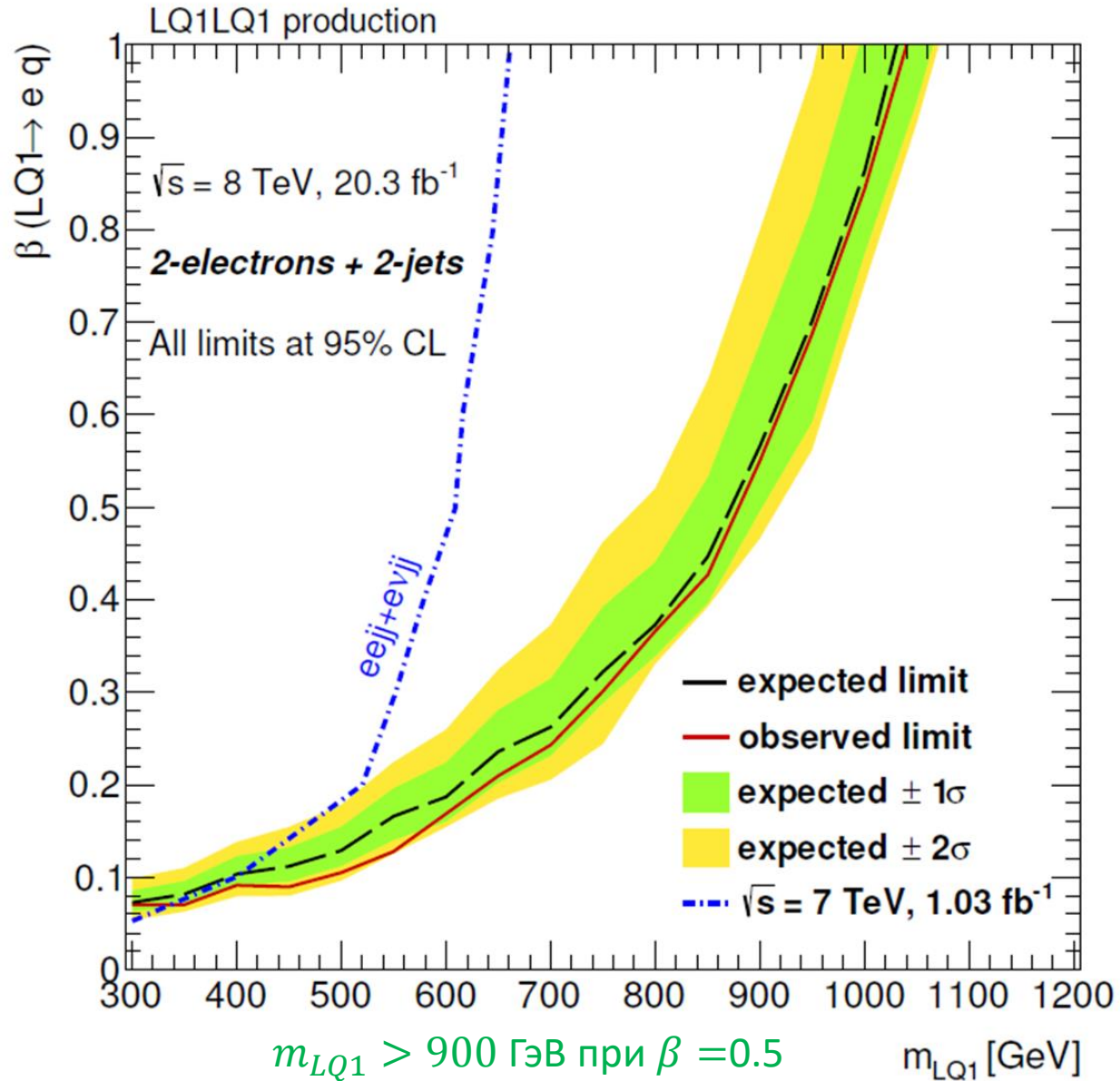
$$\tilde{q}_0 = -2 \ln \frac{L(0, \hat{\beta}(0), \hat{\theta}(0), \hat{\gamma}(0))}{L(\hat{\mu}, \hat{\beta}, \hat{\theta}, \hat{\gamma})}$$

Проявлений сигнальной модели не наблюдается



отклонения (флуктуации вниз) не превосходят 2σ





1. Оптимизированы условия первичного отбора объектов и событий;
2. Получены оценки вкладов фоновых и сигнальных процессов;
3. Разработана стратегия поиска лептокварков;
4. Получены оценки систематических неопределённостей;
5. Разработан метод статистической проверки модели лептокварков;
6. Произведено сопоставление результатов проверки новой физической модели в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, выявлены чувствительные аспекты построения статистической модели;
7. Произведена проверка модели лептокварков первого поколения при парном рождении с конечной топологией $eejj$ в протон-протонных взаимодействиях с $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в эксперименте ATLAS;

- «Диссертант обеспечил **определяющий вклад** в работу коллаборации ATLAS “Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ ТэВ with the ATLAS detector”, опубликованную в виде одноимённой научной статьи. Являясь **главным и единственным** специалистом по анализу в программе поиска скалярных лептокварков первого поколения, диссертант выполнял и функции **редактора** статьи для журнала и внутренней документации коллаборации ATLAS. Наконец, диссертантом произведена **разработка статистического метода** для получения конечных результатов поиска скалярных лептокварков первого поколения в протон-протонных взаимодействиях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в эксперименте ATLAS. Таким образом, личный вклад диссертанта является **критически важным** для всего направления поиска лептокварков в эксперименте ATLAS.» (с) *Dr. Klaus Mönig, Координатор Экзотики ATLAS, CERN.*
- В процессе работы над диссертацией **автором лично** проведено научное исследование статистического метода проверки новой модели физики высоких энергий. В результате данной работы диссертантом смоделирована характерная экспериментальная конфигурация, предложены решения задачи проверки новой модели в рамках частотного и Байесовского статистических формализмов, произведено сопоставление соответствующих результатов и рассмотрен эффект от выбора статистической модели для систематической неопределённости. Исследование опубликовано в виде научной статьи “A new model test in high energy physics in frequentist and Bayesian statistical formalisms” при **единоличном авторстве** диссертанта.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные

результаты диссертации доложены диссертантом лично на семинарах ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», на собраниях коллаборации ATLAS и на профильных международных научных конференциях по физике высоких энергий:

- 23rd International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, Tahoe, California, Ca, USA, 23 - 29 Aug 2015 (SUSY 2015) [1];
- 3rd Annual Large Hadron Collider Physics Conference, St. Petersburg, Russia, 31 Aug - 5 Sep 2015 (LHCP 2015) [2].

Кроме того, научные результаты, полученные диссертантом и включённые в диссертацию, в явном виде входят в доклады, представленные от имени коллаборации ATLAS её членами на конференциях “European Physical Society Conference on High Energy Physics 2015, Vienna, Austria, 22 - 29 Jul 2015 (EPS-HEP 2015) [8; 9]” и “4th International Conference on New Frontiers in Physics, Kolymbari, Crete, Greece, 23 - 30 August 2015 (ICNFP 2015) [10]”.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Kamenshchikov A.* Searches for leptoquarks and similar signatures with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2048137>.
2. *Kamenshchikov A.* Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS detector. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2049844>.
3. *Aad G.* [et al.]. Searches for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector // Eur. Phys. J. — 2016. — Vol. C76, no. 1. — P. 5. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3823-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3823-9). — arXiv: [1508.04735](https://arxiv.org/abs/1508.04735) [hep-ex].
4. *Kamenshchikov A.* A new model test in high energy physics in frequentist and Bayesian statistical formalisms // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2017. — Vol. 14, no. 1. — Pp. 227-238. — DOI: [10.1134/S1547477117010137](https://doi.org/10.1134/S1547477117010137). — arXiv: [1607.04141](https://arxiv.org/abs/1607.04141) [physics.data-an].
5. *Kamenshchikov A.* A new model test in high energy physics in classical and Bayesian statistical formalisms: tech. rep. / IHEP. — Protvino, 05/2016. — URL: <http://web.ihep.su/library/pubs/2016/ps/2016-8.pdf>.
6. *Kamenshchikov A.* Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS detector: tech. rep. / CERN. — Geneva, 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2113437>.



Цитированная литература

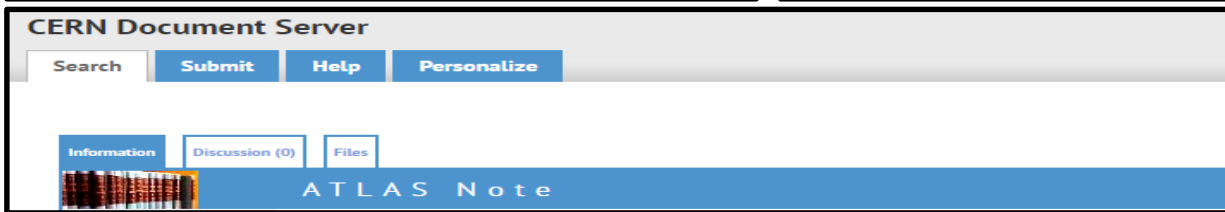
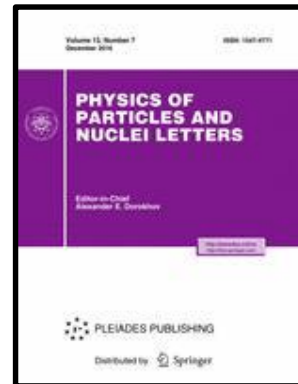
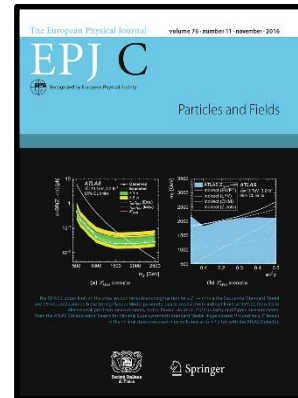
7. *Aaboud M.* [et al.]. Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment // *New J. Phys.* — 2016. — Vol. 18, no. 9. — P. 093016. — DOI: 10.1088/1367-2630/18/9/093016. — arXiv: 1605.06035 [hep-ex].
8. *Grancagnolo S.* Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2039905>.
9. *Fedorko W. T.* Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS. — 07/2015. — URL: <https://indico.cern.ch/event/356420/contributions/1764542>.
10. *Madar R.* Searches for new physics with lepton flavours and multi-lepton final states in ATLAS. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2047820>.
11. *Grancagnolo S.* Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC // Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015. EPS-HEP2015. — 2015. — P. 096. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2056805>.
12. *Fedorko W. T.* Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS // Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015. EPS-HEP2015. — 2015. — P. 147. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2065149>.
13. *Zhu J.* LHC exotics search results. — Geneva, 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2112047>.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 4 научных статьях, из которых 2 в рецензируемых научных журналах [3; 4], 1 в виде препринта ИФВЭ [5] и 1 по материалам доклада на конференции LHCP 2015 в виде препринта CERN [6].

Материалы докладов на профильных международных конференциях SUSY 2015 и LHCP 2015, содержащие основные результаты диссертации, опубликованы в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» [1; 2]. Данные материалы докладов и статья по материалам доклада на конференции LHCP 2015 подготовлены диссертантом лично.

Помимо этого, научные результаты, полученные диссертантом и включённые в диссертацию, в явном виде содержатся в материалах докладов (и соответствующих им статьях для сборников трудов конференций), представленных от имени коллаборации ATLAS её членами на конференциях EPS-HEP 2015 [8; 9] ([11; 12]), LHCP 2015 [13] и ICNFP 2015 [10] ([14]).

14. *Madar R.* Searches for New Physics with Lepton Flavours and Multi-lepton Final States in ATLAS // Proceedings, 4th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2015): Kolymbari, Greece, August 23-30, 2015. Vol. 126. — 2016. — P. 04028. — DOI: 10.1051/epjconf/201612604028. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 10/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2066742>.
15. *Aad G.* [et al.]. Search for first generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector // *Phys. Lett.* — 2012. — Vol. B709. — Pp. 158–176. — DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.023, 10.1016/j.physletb.2012.02.004. — arXiv: 1112.4828 [hep-ex].



РЕЗЕРВ

- Grancagnolo S. Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2039905>
- Fedorko W. T. Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS. — 07/2015. — URL: <https://indico.cern.ch/event/356420/contributions/1764542>
- Kamenshchikov A. Searches for leptoquarks and similar signatures with the ATLAS detector at the LHC. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2048137>
- Madar R. Searches for new physics with lepton flavours and multi-lepton final states in ATLAS. — Geneva, 08/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2047820>
- Kamenshchikov A. Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS detector. — Geneva, 09/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2049844>
- Zhu J. LHC exotics search results. — 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2112047>

- Searches for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // Eur. Phys. J. — 2016. — Vol. C76, no. 1. — P. 5. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3823-9. — arXiv: 1508.04735 [hep-ex].
- Kamenshchikov A. A new model test in high energy physics in frequentist and Bayesian statistical formalisms // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2017. — Vol. 14, no. 1. — Pp. 227–238. — DOI: 10.1134/S1547477117010137. — arXiv: 1607.04141 [physics.data-an].
- Kamenshchikov A. A new model test in high energy physics in classical and Bayesian statistical formalisms: tech. rep. / IHEP. — Protvino, 05/2016. — URL: <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2016/ps/2016-8.pdf>.
- Grancagnolo S. Searches for leptoquarks and heavy leptons with the ATLAS detector at the LHC // Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015. EPS-HEP2015. — 2015. — P. 096. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2056805>
- Fedorko W. T. Searches for resonant and non-resonant new phenomena in ATLAS // Proceedings, 2015 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015): Vienna, Austria, July 22-29, 2015. EPS-HEP2015. — 2015. — P. 147. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 11/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2065149>
- Kamenshchikov A. Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS detector: tech. rep. / CERN. — Geneva, 12/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2113437>
- Madar R. Searches for New Physics with Lepton Flavours and Multi-lepton Final States in ATLAS // Proceedings, 4th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2015): Kolymbari, Greece, August 23-30, 2015. Vol. 126. — 2016. — P. 04028. — DOI: 10.1051/epjconf/201612604028. — tech. rep. / CERN. — Geneva, 10/2015. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2066742>