



# **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРНОГО РОЖДЕНИЯ МЮОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS на LHC**

**(по материалам докторской диссертации,  
специальность 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц)**

**С. В. Шматов  
ЛФВЭ, ОИЯИ, Дубна**

**Семинар ОФВЭ ИЯИ РАН  
23 сентября 2019, Троицк**

---



Научный консультант:	<b>Голутвин Игорь Анатольевич,</b> доктор физико–математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований
Официальные оппоненты:	<b>Куденко Юрий Григорьевич,</b> доктор физико–математических наук, профессор, заведующий Отделом физики высоких энергий, ФГБУН Институт ядерных исследований РАН  <b>Мизюк Роман Владимирович,</b> член-корреспондент РАН, доктор физико–математических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН  <b>Образцов Владимир Федорович,</b> член-корреспондент РАН, доктор физико–математических наук, главный научный сотрудник с возложением обязанностей начальника Лаборатории электрослабых процессов, ФГБУ Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт»
Ведущая организация:	Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова



# Публикации



Основные результаты диссертации изложены в **53 научных работах** (из них **32 из списка ВАК и БД Скопус**), опубликованных в журналах

- ``Ядерная физика" (8 публикаций),
- ``Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ)" (4 публикаций),
- ``Письма в журнал ЭЧАЯ (2 публикации),
- ``Physical Review D" (1 публикация),
- ``Physics Letters B" (4 публикации),
- ``Journal of High Energy Physics" (5 публикаций),
- `` Nuclear Physics" (2 публикации),
- ``Journal of Physics G: Nucl. Part. Phys. " (1 публикация),
- ``International Journal of Modern Physics" (1 публикация),
- ``Czechoslovak Journal of Physics" (1 публикация),
- ``Journal of Instrumentation" (1 публикация),
- в главах монографий (3 публикации),

а также в виде электронных препринтов, материалов конференций и сотрудничества CMS (полный список приведен ниже).



# Содержание (I)



<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>5</b>
В.1 Мотивация и актуальность . . . . .	5
В.2 Основные цели, новизна и значимость работы . . . . .	16
В.3 Апробация и личный вклад . . . . .	17
В.4 Структура работы . . . . .	18

## Часть 1. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАНАЛЕ С ПАРОЙ МЮОНОВ ПРИ $\sqrt{s} = 14$ ТЭВ

**26**

<b>Глава 1. Эксперимент CMS</b>	<b>27</b>
1.1 Общие характеристики детекторных систем CMS . . . . .	30
1.2 Трекер . . . . .	33
1.3 Электромагнитный калориметр . . . . .	35
1.4 Адронный калориметр . . . . .	37
1.5 Мюонная система . . . . .	43
1.6 Триггерная система . . . . .	48
1.7 Заключение к Главе 1 . . . . .	50

<b>Глава 2. Моделирование, реконструкция и отбор событий</b>	<b>51</b>
2.1 Моделирование «отклика» установки . . . . .	51
2.2 Реконструкция мюонов . . . . .	55
2.3 Идентификация мюонов . . . . .	67
2.4 Пространственная изолированность мюонов . . . . .	68
2.5 Отбор событий в условиях реального времени . . . . .	71
2.6 Исследование невыравненности детекторных систем . . . . .	74
2.7 Реконструкция и отбор космических мюонов . . . . .	79
2.8 Заключение к Главе 2 . . . . .	85

<b>Глава 3. Проверка предсказаний стандартной модели в процессе Дрелла–Яна</b>	<b>87</b>
3.1 Моделирование и реконструкция . . . . .	90
3.2 Фоновые процессы . . . . .	94
3.3 Погрешности измерения сечений . . . . .	100
3.4 Более подробно о неопределенностях вычислений сечений .	104
3.5 Изучение асимметрии вперед назад . . . . .	114

3.6 Заключение к Главе 3 . . . . .	125
------------------------------------	-----

<b>Глава 4. Новая физика</b>	<b>127</b>
4.1 Нерезонансные сигналы в сценарии ADD . . . . .	129
4.2 Резонансы со спином 2 . . . . .	145
4.3 Резонансы со спином 1 . . . . .	166
4.4 Определение спиновой структуры резонансов . . . . .	172
4.5 Заключение к Главе 4 . . . . .	177

## Часть 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРНОГО РОЖДЕНИЯ ЛЕПТОНОВ И МНОГОЧАСТИЧНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТЭВ

**179**

<b>Глава 5. Измерение характеристик рождения пар лептонов в процессе Дрелла–Яна</b>	<b>183</b>
5.1 Оценка числа сигнальных и фоновых событий . . . . .	184
5.2 Реконструкция и отбор событий . . . . .	190
5.3 Коррекции событий . . . . .	196
5.4 Систематические погрешности . . . . .	201
5.5 Результаты измерения сечений . . . . .	204
5.6 Результаты измерений асимметрии . . . . .	214
5.7 Заключение к Главе 5 . . . . .	219

<b>Глава 6. Поиск физики за рамками стандартной модели в канале с парой лептонов в конечном состоянии</b>	<b>220</b>
6.1 Сравнение данных и Монте-Карло . . . . .	221
6.2 Процедура поиска сигнала и статистическая интерпретация	228
6.3 Систематические погрешности . . . . .	233
6.4 Массовые пределы на резонансные состояния . . . . .	236
6.5 Массовые пределы на нерезонансные состояния . . . . .	242
6.6 Заключение к Главе 6 . . . . .	248

<b>Глава 7. Процессы множественного рождения частиц</b>	<b>250</b>
7.1 Моделирование, реконструкция и отбор событий МРЧ . . .	257
7.2 Метод оценки фона . . . . .	262
7.3 Систематические погрешности . . . . .	268
7.4 Модельно зависимые пределы . . . . .	269
7.5 Модельно независимые пределы . . . . .	274
7.6 Заключение к Главе 7 . . . . .	277



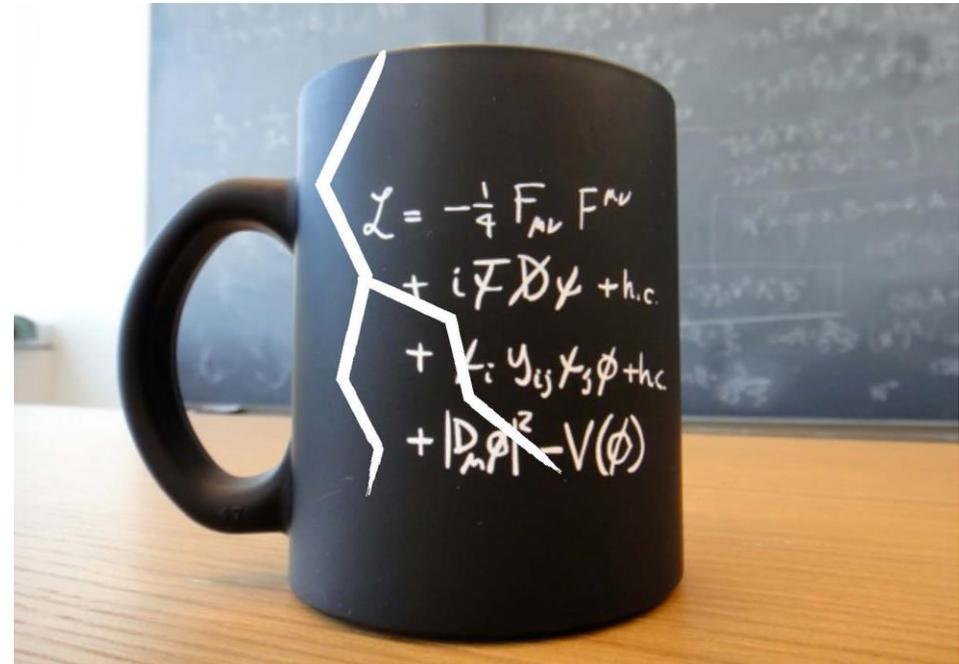
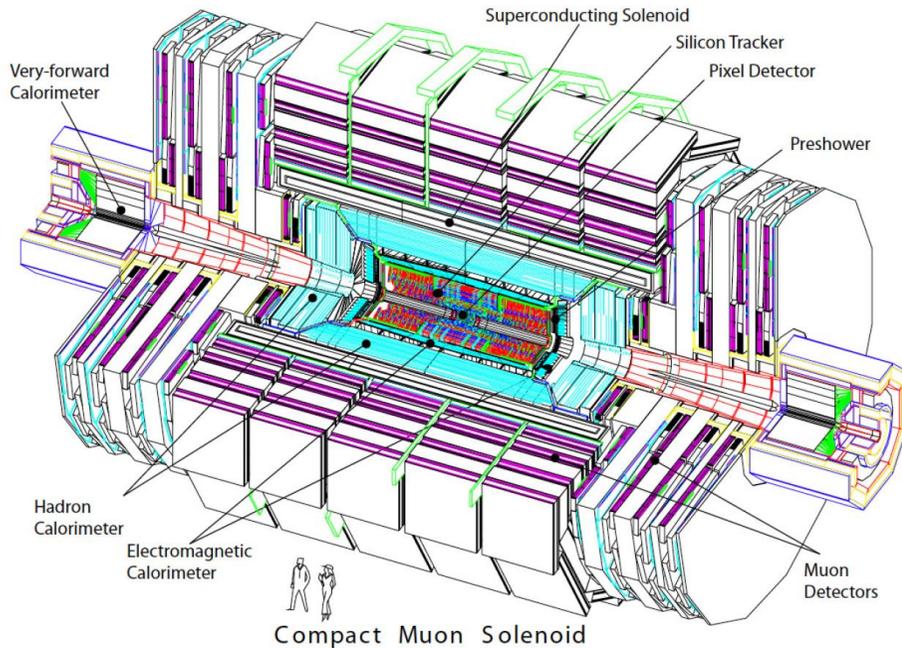
# Содержание (II)



- ❑ Мотивация исследований
- ❑ Разработка программы исследований парного рождения мюонов в эксперименте CMS (2002-2008 гг.)
  - Моделирование, реконструкция и отбор пар мюонов высоких энергий
- ❑ Результаты первого цикла работы эксперимента CMS при энергии пучков LHC 7-8 ТэВ с.ц.м.(2010-2018 гг.)
  - Проверка SM (исследование характеристик процесса Дрелла-Яна)
  - Поиск новой физики в канале с парой мюонов (состояния со спином 1 и 2)
  - Процессы множественного рождения струй
- ❑ Перспективы исследований при 13-14 ТэВ (2002-2018 гг.)
- ❑ Положения, выносимые на защиту

Исследования выполнены в 2002-2018 гг. в ЛФВЭ ОИЯИ и ЦЕРН

# Мотивации, проблемы, задачи....



Why dimuons? Because it is Compact **MUON** solenoid where Dubna group plays important role since conceptual design through PhTDR up to physics analysis!

- strong B-field and long lever arm (from IP and tracker to Muon system) for precise momentum estimation
- high precision muon detectors with redundant muon trigger

# Что нас не устраивает в СМ?

## Standard model weak points (except for Higgs found recently):

### □ Hierarchy Problem

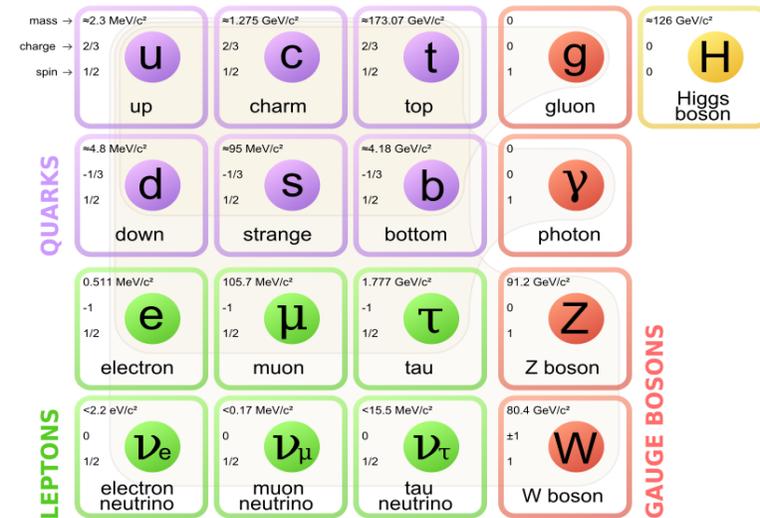
- ✓ fine tuning of higgs masses is needed to “neutralize” contribution from high order corrections
- ✓ huge gap between Electroweak ( $10^2$  GeV) and Planck scale ( $10^{19}$  GeV) scales), Gravity/EW  $\sim 10^{19}/10^2$  GeV?

### □ Yukawa hierachy (explanation of mass patterns for quarks and leptons)

### □ Unification of interactions, number of generations (why 3?) they can not be fixed in the framework of SM

### □ Gravity is not described by SM

### □ Set of cosmological and astrophysical problems (inflation, dark matter, CP-violation in the early Universe etc)



- ❑ Расширения хиггсовского сектора
  - дублетные модели Хиггса (HDM)
  - Хиггс в ED, смешивание Хиггса и радиона, модели композитного Хиггса (RS тип)
- ❑ Решение проблемы иерархии
  - SUSY (с-частицы, LSP из RPV/split/GM SUSY...)
  - дополнительные измерения (ED)
    - ✓ КК-возбуждения частиц СМ, ККPV, FCNC...
    - ✓ микроскопические черные дыры (квазиклассические, струнные шары, квантовые черные дыры)
  - техницвет (технибозоны и технифермионы, Хиггс как изосинглет, лептокварки ...)
  - композитные модели
- ❑ Простые расширения СМ (без расширения КС)
  - 4 поколение фермионов,  $q^*$ ,  $l^*$ ...
- ❑ Расширенный калибровочный сектор
  - ExQCD калибровочная группа (колороны, аксиглюоны, дикварки и пр.)
  - ExEW ( $W'$ ,  $Z'$ , вектороподобные фермионы, ...)
  - группы TBO (лептокварки)
- ❑ Темная материя (EFT)



SM is reproduced, hierarchy, includes Gravity, harmonious cosmological picture...

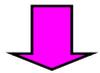


unification, tuning, CP-violation...

# Расширенные калибровочные модели

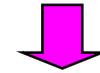
## Extended Gauge Model (EGM)

from a GUT theory  $E_6$  or  $SO(10)$



- ❑  $E_6$  effective rank-5 model
- ❑ Alternative LRM (ALRM)  
 $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$  but  
from  $E_6$

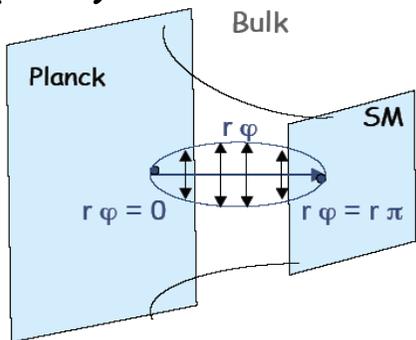
from other extended models



- ❑ Sequential Standard Model (SSM)  
new gauge bosons are just heavy  
version of SM  $Z^0$  and  $W$
- ❑ Un-Unified Model (UUM)  
 $SU(2)_l \times SU(2)_q \times U(1)_Y$
- ❑ Left-Right Symmetric Model (LRM)  
 $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$

Все модели с расширенной калибровочной группой предсказывают существование новых калибровочных бозонов  $W'$  и  $Z'$  (от  $W^\pm$  и  $Z^0$  они отличаются массой и константами связи)

L. Randall and R. Sundrum (RS1 scenario), PRL83 3370 (1999)



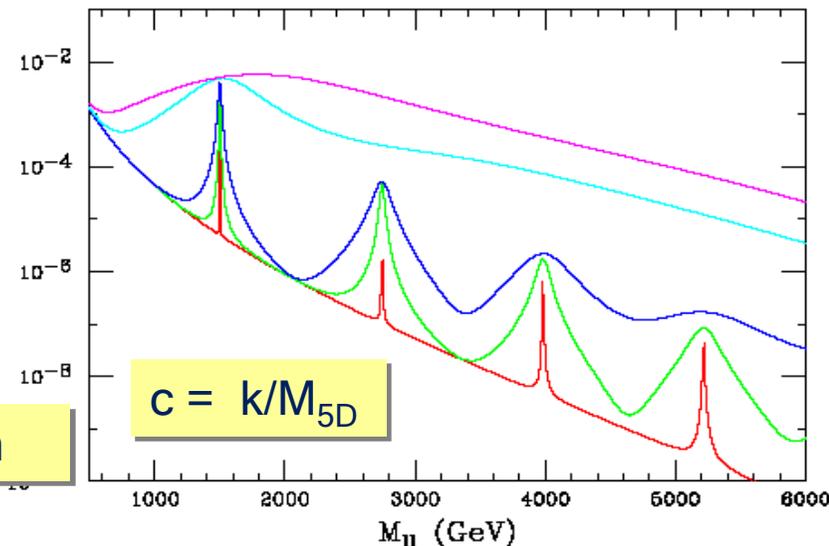
5D curve space with AdS<sub>5</sub> slice:

two 3(brane)+1(extra)+time!

Heavy KK-excitations of gravitons (spin-2 state)

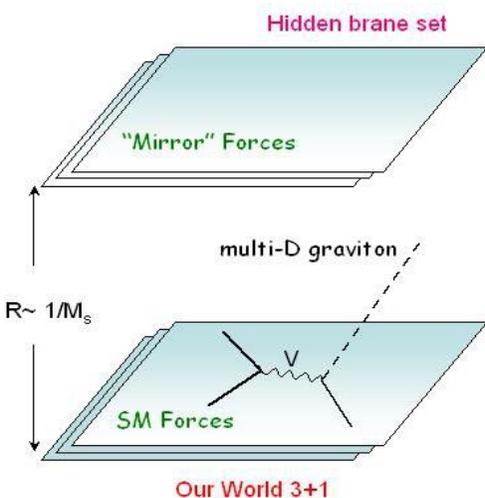
$$q\bar{q}, gg \rightarrow G_{KK} \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \gamma\gamma, jet + jet$$

$d\sigma/dM$  (pb/GeV)



$M_{5D}$  - фундаментальный масштаб,  $k$  - кривизна пр-ва

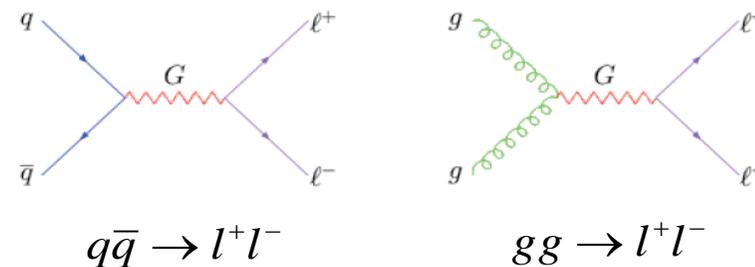
N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali (ADD scenario), Phys.Lett. B429(1998), Nuc.Phys.B544(1999)



- $n$  (up to 6) flat –Euclidian extra spatial dimensions
- fundamental scale is not planckian:  $M_D \sim \text{TeV}$
- SM forces live on 3D brane
- Only gravitons are multi-dimensional

$$M_{Pl}^2 = V_n M_D^{n+2} = (2\pi R)^n M_D^{n+2}$$

Graviton contributions to SM (Drell-Yan) Processes (non-resonant):



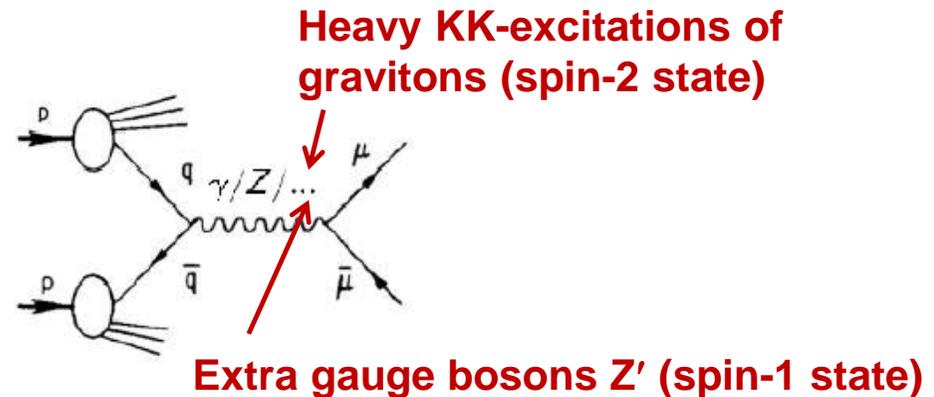
$$q\bar{q} \rightarrow l^+l^-$$

$$gg \rightarrow l^+l^-$$

# Как наблюдать на эксперименте?

- ❑ Heavy Resonances and Non-Resonant Signals (extended gauge models, extra dimensions, technicolor)
  - ⇒ dileptons, dijets, diphotons,  $t\bar{t}$ , WZ
- ❑ Non-Resonant Signals (extra dimensions, compositeness)
  - ⇒ dileptons, dijets, diphotons
- ❑ Mono-particle + Missing ET (extended gauge models, extra dimensions, technicolor)
  - ⇒ mono-jet + MET, mono-photon + MET, mono-lepton + MET
- ❑ High-multiplicity events (microscopic black holes, leptoquarks, 4<sup>th</sup> Generation )
  - ⇒ all particles, leptons + jet(s)

$$pp \rightarrow G_{KK}, Z_{KK}, Z' \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$$





# Цели исследований



Проверка предсказаний стандартной модели фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и поиск сигналов за рамками СМ в процессах рождения пары мюонов.

Исследование множественного образования жестких частиц в эксперименте CMS при энергиях LHC.

# Рассмотренные типы сигналов

- Адронные моды распада характеризуются большими сечения (на порядок превышающие лептонные), но существенно худшими фоновыми условиями.
- Ряд сигналов не может быть наблюдаем без использования струйных сигналов.

## Two types of signals

### KK-modes of graviton

Heavy graviton resonances (**RS1 model**), one warped extra dimension  $n_{ED}=1$

curvature  $k$  ( $\sim M$ ), compactification radius  $r$ , coupling constant:  $c = k/M_1$ , gravity scale:  $\Lambda_{II} = M_1 e^{-k\pi r}$

Non-resonant models like **ADD** and contact interactions, number of ED  $n_{ED} = 2 \div 7$ , scale  $M_{S(D)}$

$$M_D^{n-2} = \frac{M_{Pl}^2}{8\pi L^n}$$

$$(M_s(M_D), n) \leftrightarrow \Lambda_T(LO)$$

$$M_s \approx M_D \approx \sqrt{\hat{s}_{max}} \approx M_{max}(\text{dilepton})$$

$$M_s^4 = F \times \Lambda_T^4$$

**Experimental observables:**  
Dilepton (dijet, diphoton) spectra, Jet + missing  $E_T$ , effective description like CI (non-resonant signs).

### Microscopic black holes

Very specific signature:  
Production without suppression from small coupling constant, Hawking evaporation, corrected black body decay spectrum, large multiplicity in FS, ellipsoid shape.  
Huge number of variables in analyses.

Number of ED  $n_{ED} = 2 \div 7$   
Entangled  $M_D, M_{BH}^{min}$

Observation of BH-type signals **doesn't allow** to get a fundamental multidimensional scale directly from an experiment!

**Experimental observables:**  
Scalar sum of the transverse energies of jets ( $S_T$ ), an asymmetry in dijet production (like CI)

2



# Программа исследований с димюонами



Программа исследований с парой мюонов в конечном состоянии в эксперименте CMS была предложена в 2002 г. физиками ОИЯИ



## Looking for New Gauge Bosons in CMS

V. Palichik and S. Shmatov  
*Joint Institute for Nuclear Research*  
*Dubna*

CMS Physics Meeting April 30<sup>th</sup> 2002

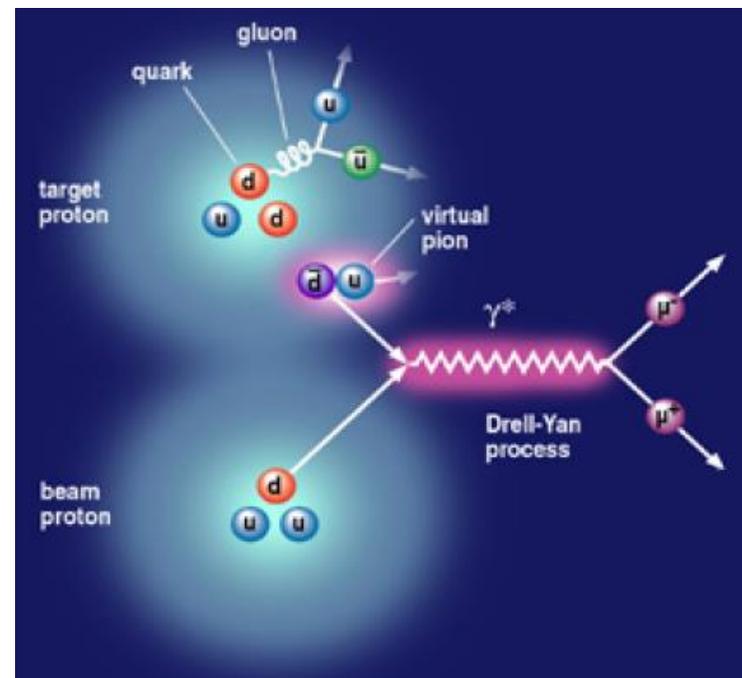
- ✓ Многие физические процессы, в том числе еще не до сих пор не наблюдаемые, могут быть исследованы в канале с мюонами в конечном состоянии
- ✓ Лептонные сигналы характеризуются лучшими фоновыми условиями по сравнению с адронными (оптимальное S/B)
- ✓ CMS (Compact Muon Solenoid) оптимизирован для точных измерений мюонов

⇒ приоритетное направление для ОИЯИ - поиск новых физических явлений в канале с парой мюонов (димюоны) в области инвариантных масс, недоступных на других ускорителях (физика димюонов)

Стратегия исследований: прецизионные измерения характеристик образования пар мюонов в процессе Дрелла-Яна и поиск возможных отклонений от предсказаний СМ в области больших переданных 4-х импульсов (инв. масс)

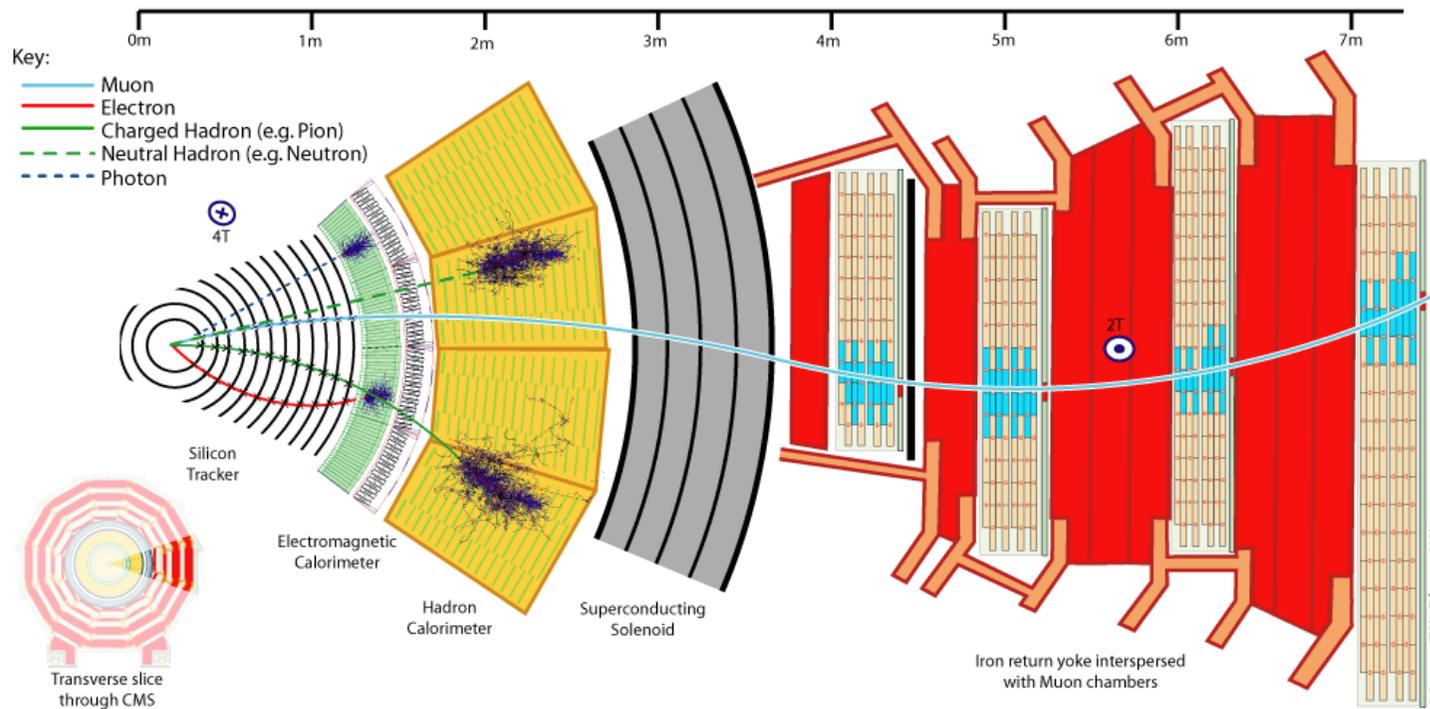
Направления исследований:

- ✓ Теоретические мотивации и развитие методов моделирования физических процессов (теоретические неопределенности предсказаний СМ и ожидаемые сигналы за рамками СМ)
- ✓ Развитие методов реконструкции и отбора мюонов и пар мюонов
- ✓ Изучение возможностей CMS по наблюдению сигналов СМ и за рамками СМ (достижимые пределы и пространство параметров моделей, систематика)
- ✓ Проведение экспериментальных измерений и финального анализа
- ✓ Развитие методов обработки данных с использованием распределенных вычислительных систем на основе ГРИД-технологий



- ❑ 2002 г.: предложение программы исследований при 14 ТэВ в с.ц.м. (проектная энергия)
- ❑ 2005-2006 гг.: предложенная программа исследований легла в основу соответствующих глав концептуальных документов коллаборации CMS ``CMS Physics Technical Design Report Vol.I: Detector performance and software'', ``CMS Physics Technical Design Report Vol. II: Physics Performance'', определяющих стратегию и методы научных исследований коллаборации.
- ❑ 2007-2008 гг.: разработка программы исследований при пониженной энергии
- ❑ 2009-2010 гг.: первые экспериментальные результаты при энергии 0.9-7 ТэВ
- ❑ 2011-2012 гг.: проведение первого цикла исследований при энергии 7-8 ТэВ
- ❑ 2015 г.: начало второго цикла исследований при энергии 13 ТэВ

# Подготовка программы исследований: реконструкция и отбор пар мюонов высоких энергий



## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
 Overall diameter : 15.0 m  
 Overall length : 28.7 m  
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
 12,500 tonnes

SILICON TRACKERS  
 Pixel (100x150 μm) ~16m<sup>2</sup> ~66M channels  
 Microstrips (80x180 μm) ~200m<sup>2</sup> ~9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID  
 Niobium titanium coil carrying ~18,000A

$$\frac{\delta p_T}{p_T} \sim 1.0 - 1.5\% @ 100 GeV$$

MUON CHAMBERS  
 Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
 Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER  
 Silicon strips ~16m<sup>2</sup> ~137,000 channels

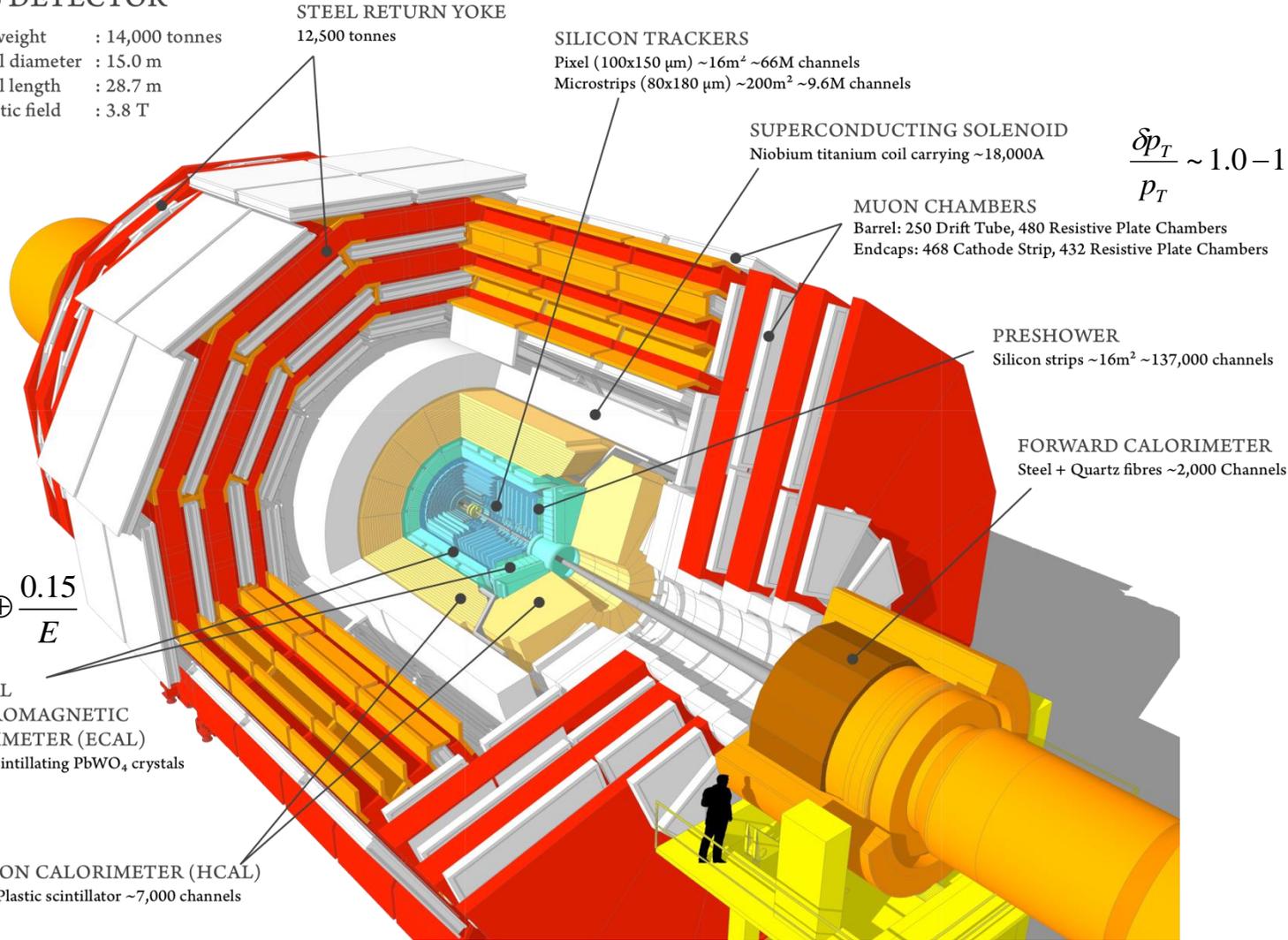
FORWARD CALORIMETER  
 Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.5\% \oplus \frac{0.15}{E}$$

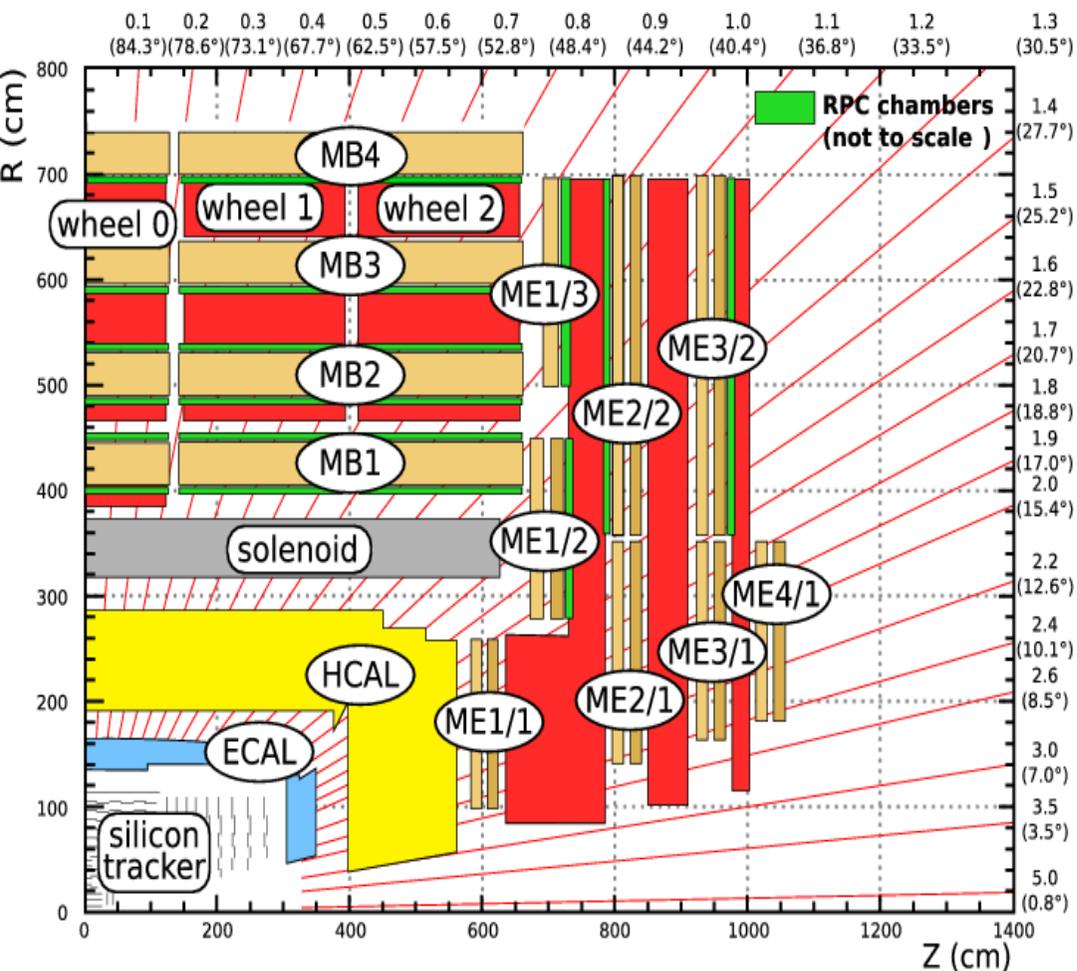
CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)  
 ~76,000 scintillating PbWO<sub>4</sub> crystals

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{120}{\sqrt{E}} \oplus 5\%$$

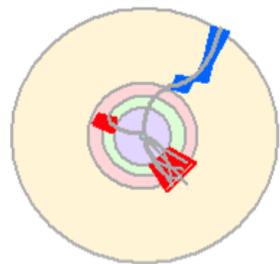
HADRON CALORIMETER (HCAL)  
 Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels



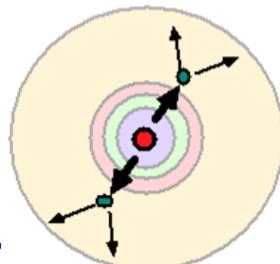
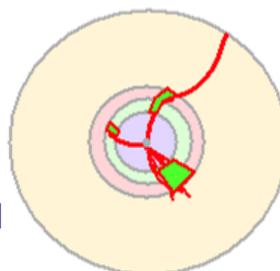
**Detector subsystems are designed to measure: the energy and momentum of photons, electrons, muons, jets, missing E<sub>T</sub> up to a few TeV**



□ Триггер уровня 1 (Level-1):  
уровень детекторов, отбор по одновременному наличию сигналов в тех или иных считывающих каналах, идентификация частиц и отбор по грубым оценкам координат и энергии

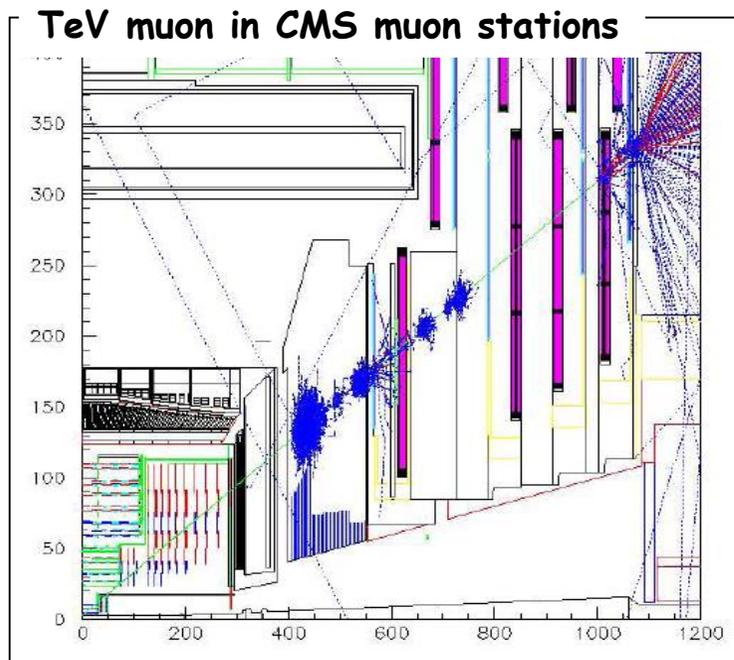


□ Триггер высокого уровня (High Level Trigger):  
вычислительные фермы для быстрой реконструкции анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий



Особенности регистрации мюонов больших энергий (сотни ГэВ - ТэВ)

- ❑ малая кривизна трека  $\Rightarrow$  ограничения на точность оценки  $p_T$
- ❑ интенсивное тормозное излучение и ЭМ ливни
  - $\Rightarrow$  “грязные” события с большим кол-вом вторичных частиц
  - $\Rightarrow$  недооценка  $p_T$
  - $\Rightarrow$  трудность применения критериев изолированности при онлайн отборе событий
- ❑ сильная зависимость точности восстановления трека от пространственной разбалансировки детекторных систем (misalignment)

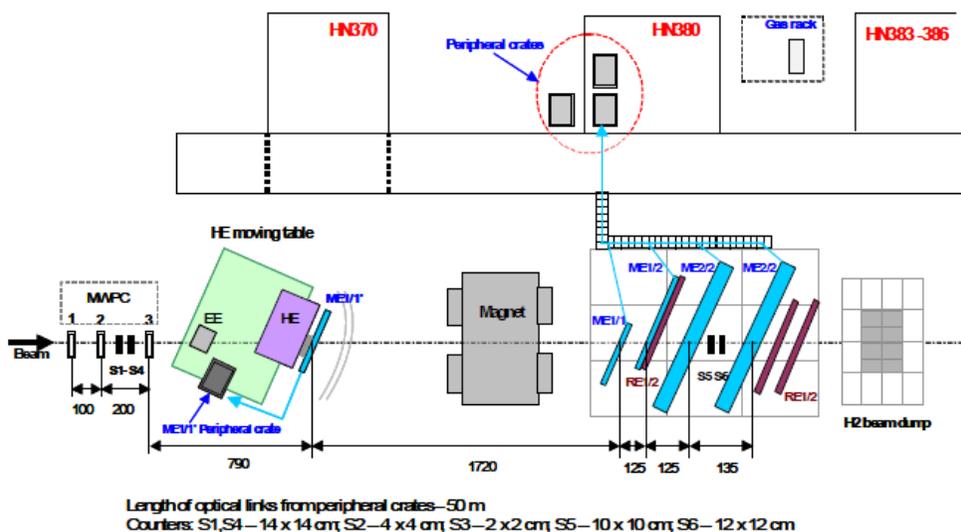


- новые (оптимизированные) алгоритмы
- новые триггерные пути для мюонов высоких энергий (пар мюонов)
- изучение систематических эффектов
- оптимизация (подбор параметров) Монте-Карло (Geant4) для моделирования “отклика” детекторных систем
- тесты на Монте-Карло и с данными (космика, пучки SPS)

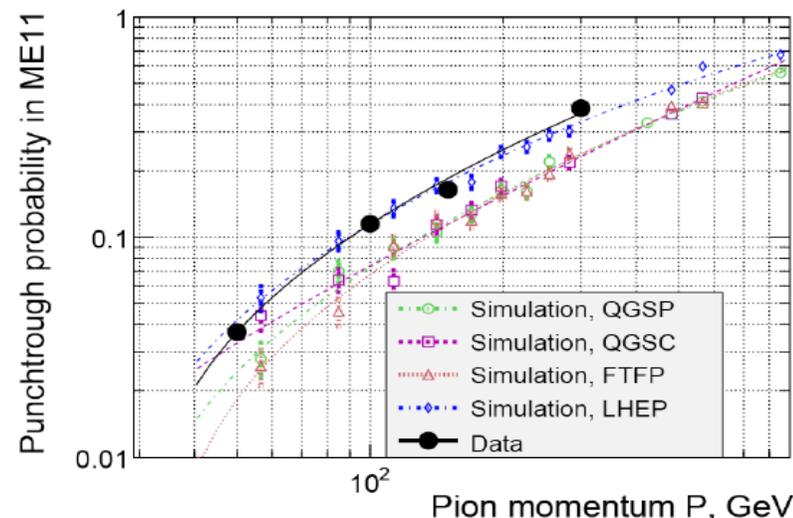
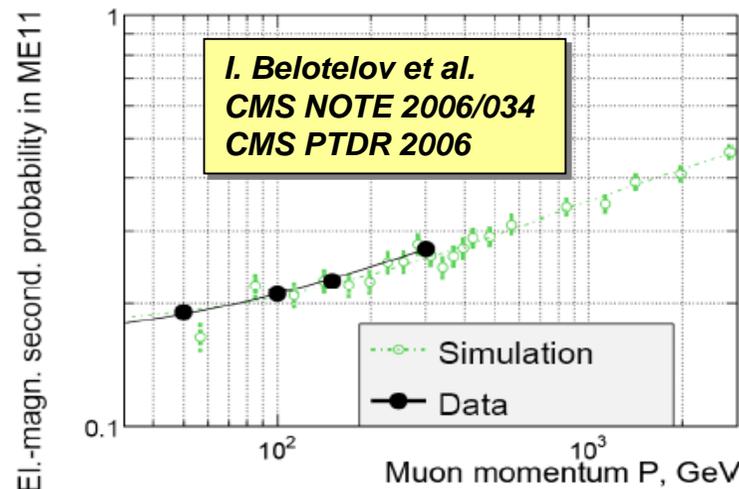
Phys. Part. Nucl. Lett. 4, 343 (2007)

Проверка ПО для моделирования “отклика” детекторов (GEANT-4) с помощью экспериментальных данных тестов на пучках SPS (мюонные и пионные пучки): HE/EMU Test Beam 2004

2004 Beam test on hadron and  $\mu$ -beams (10-400 GeV)



ПО CMS, основанное на GEANT4, удовлетворительно воспроизводит экспериментальные данные



*I. Belotelov et al.*  
*CMS PTDR, Vol.1 (2006)*

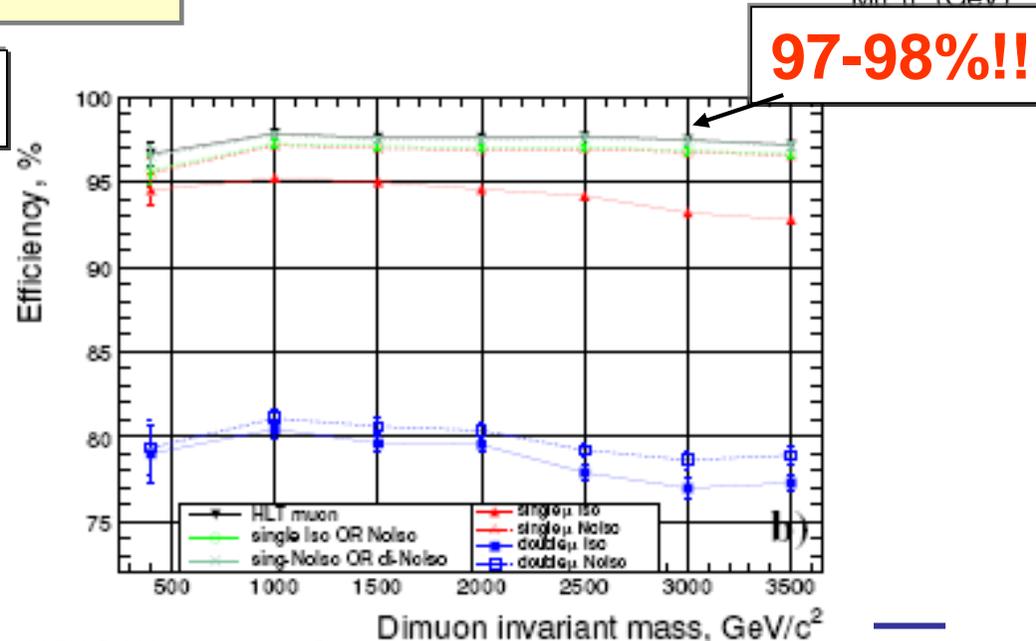
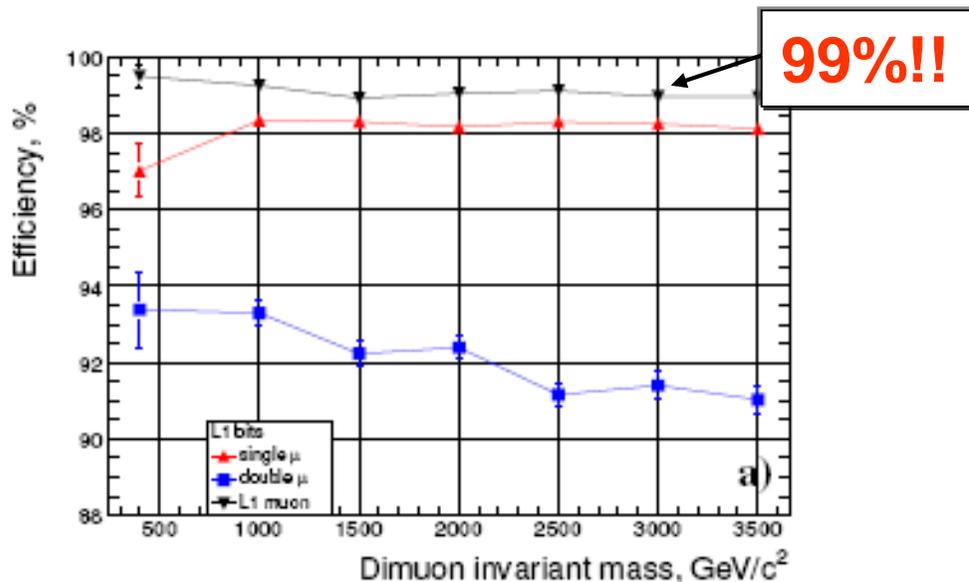
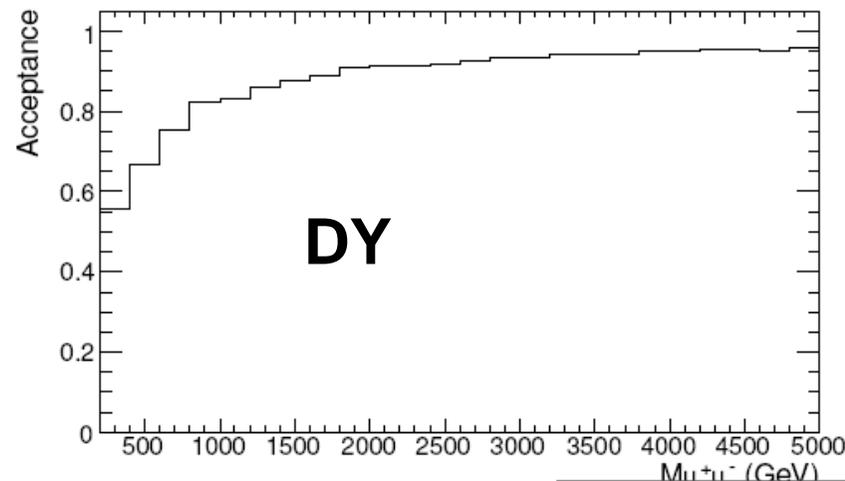
Критерии отбора для интенсивности  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ :

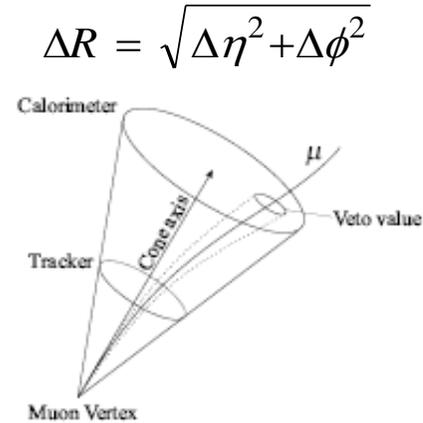
Триггер первого уровня L1:

- ✓ одиночный мюон:  $p_T > 7 \text{ GeV}/c$ ,  $|\eta| \leq 2.1$
- ✓ пара мюонов:  $p_T > (3 \text{ GeV}/c, 3 \text{ GeV}/c)$ ,  $|\eta| \leq 2.4$

Триггер высокого уровня HTL (L2muon $\otimes$ L3tracker):

- ✓ одиночный мюон:  $p_T > 16 \text{ GeV}/c$ ,  $|\eta| \leq 2.4$
- ✓ пара мюонов:  $p_T > (3 \text{ GeV}/c, 3 \text{ GeV}/c)$ ,  $|\eta| \leq 2.4$
- ✓ критерий изолированности в трекаре ( $\Delta R \leq 0.3$ ), нет калориметрической изоляции в EC





Изолированность в калориметре (L2):

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

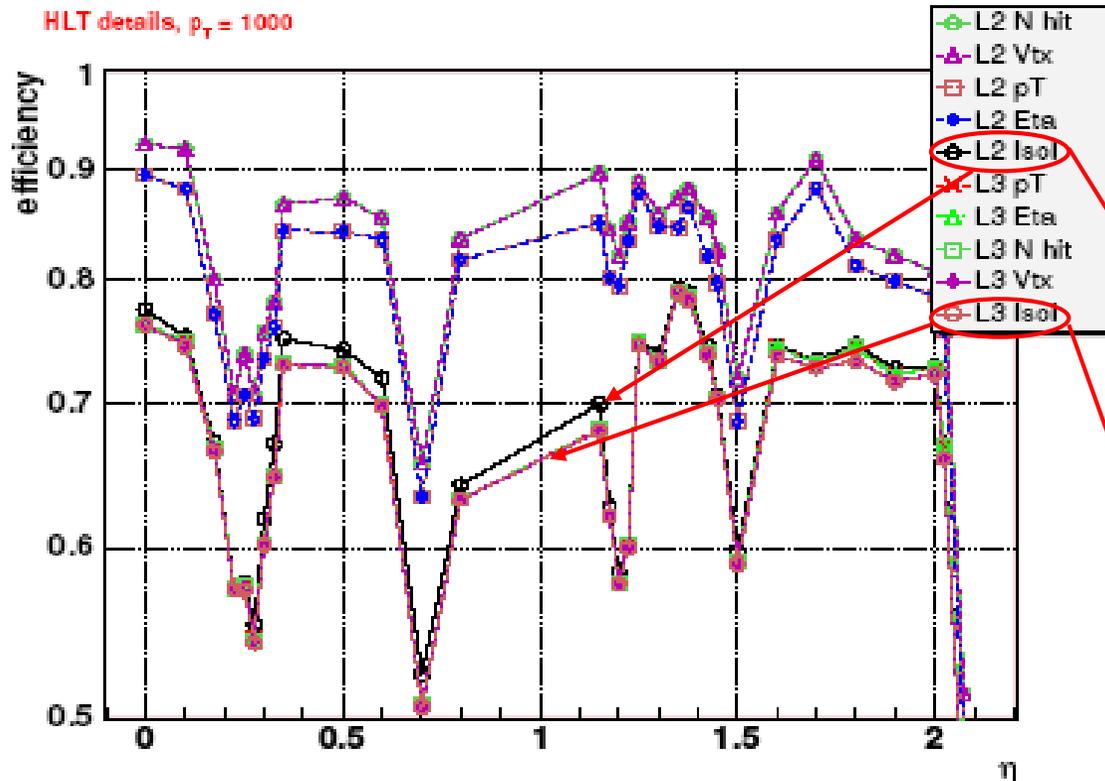
$$\sum E_T^{ECAL}(\Delta R \leq 0.07) \leq 0.12 - 0.45 \text{ GeV}$$

$$\sum E_T^{HCAL}(\Delta R \leq 0.1) \leq 0.6 \text{ GeV}$$

Изолированность в трекаре (L3):

$$\sum p_T^{tracker}(\Delta R \leq 0.015) \leq 0.8 \text{ GeV}/c$$

HLT details,  $p_T = 1000$



критерий изолированности мюонного трека в ЭМ калориметре **не должен** применяться для отбора мюонов высоких энергий

критерий изолированности мюонного трека в трекаре не приводит к существенному падению эффективности триггера и может быть использован для подавления фоновых событий



# L1 Trigger Rates

I. Belotelov et al.  
CMS PTDR, Vol.I (2006)

L1 Trigger	Threshold (GeV)	Prescale	Rate (kHz)
A_SingleMu3	3	1000	0.01 ± 0.00
A_SingleMu5	5	1000	0.00 ± 0.00
A_SingleMu7	7	1	1.11 ± 0.04
A_SingleMu10	10	1	0.47 ± 0.03
A_SingleMu14	14	1	0.18 ± 0.02
A_SingleMu20	20	1	0.09 ± 0.01
A_SingleMu25	25	1	0.06 ± 0.01
A_SingleIsoEG5	5	10000	0.00 ± 0.00
A_SingleIsoEG8	8	1000	0.01 ± 0.00
A_SingleIsoEG10	10	100	0.04 ± 0.01
A_SingleIsoEG12	12	1	2.47 ± 0.06
A_SingleIsoEG15	15	1	1.10 ± 0.04
A_SingleIsoEG20	20	1	0.32 ± 0.02
A_SingleIsoEG25	25	1	0.14 ± 0.01
A_SingleEG5	5	10000	0.00 ± 0.00

Continued on next page ...

L1 Trigger	Threshold (GeV)	Prescale	Rate (kHz)
A_SingleEG8	8	1000	0.01 ± 0.00
A_SingleEG10	10	100	0.04 ± 0.01
A_SingleEG12	12	100	0.03 ± 0.01
A_SingleEG15	15	1	1.51 ± 0.05
A_SingleEG20	20	1	0.52 ± 0.03
A_SingleEG25	25	1	0.25 ± 0.02
A_SingleJet70	70	100	0.02 ± 0.01
A_SingleJet100	100	1	0.43 ± 0.02
A_SingleJet150	150	1	0.07 ± 0.01
A_SingleJet200	200	1	0.02 ± 0.01
A_SingleTauJet40	40	1000	0.02 ± 0.01
A_SingleTauJet80	80	1	0.68 ± 0.03
A_SingleTauJet100	100	1	0.20 ± 0.02
A_HTT250	250	1	2.56 ± 0.06
A_HTT300	300	1	0.65 ± 0.03
A_HTT400	400	1	0.08 ± 0.01
A_HTT500	500	1	0.02 ± 0.00
A_ETM20	20	10000	0.00 ± 0.00
A_ETM30	30	1	5.69 ± 0.09
A_ETM40	40	1	0.40 ± 0.02
A_ETM50	50	1	0.05 ± 0.01
A_ETM60	60	1	0.01 ± 0.00
A_DoubleMu3	3	1	0.28 ± 0.02
A_DoubleIsoEG8	8	1	0.28 ± 0.02
A_DoubleIsoEG10	10	1	0.08 ± 0.01
A_DoubleEG5	5	10000	0.00 ± 0.00
A_DoubleEG10	10	1	0.19 ± 0.02
A_DoubleEG15	15	1	0.05 ± 0.01
A_DoubleJet70	70	1	0.58 ± 0.03
A_DoubleJet100	100	1	0.11 ± 0.01
A_DoubleTauJet20	20	1000	0.02 ± 0.01
A_DoubleTauJet30	30	100	0.08 ± 0.01
A_DoubleTauJet40	40	1	2.36 ± 0.06
A_Mu3_IsoEG5	3,5	1	0.95 ± 0.04
A_Mu5_IsoEG10	5,10	1	0.04 ± 0.01
A_Mu3_EG12	3,12	1	0.09 ± 0.01
A_Mu3_Jet15	3,15	20	0.30 ± 0.02
A_Mu5_Jet15	5,15	1	1.62 ± 0.05
A_Mu3_Jet70	3,70	1	0.10 ± 0.01
A_Mu5_Jet20	5,20	1	1.18 ± 0.04
A_Mu5_TauJet20	5,20	1	0.66 ± 0.03
A_Mu5_TauJet30	5,30	1	0.38 ± 0.02
A_IsoEG10_Jet15	10,15	20	0.15 ± 0.01

Continued on next page ...

L1 Trigger	Threshold (GeV)	Prescale	Rate (kHz)
A_IsoEG10_Jet30	10,30	1	1.95 ± 0.05
A_IsoEG10_Jet20	10,20	1	3.04 ± 0.06
A_IsoEG10_Jet70	10,70	1	0.26 ± 0.02
A_IsoEG10_TauJet20	10,20	1	1.95 ± 0.05
A_IsoEG10_TauJet30	10,30	1	1.33 ± 0.04
A_TauJet30_ETM30	30,30	1	1.96 ± 0.05
A_TauJet30_ETM40	30,40	1	0.26 ± 0.02
A_TripleMu3	3	1	0.01 ± 0.00
A_TripleJet50	50	1	0.22 ± 0.02
A_QuadJet30	30	1	0.58 ± 0.03
A_MinBias_HTT10	10	large	0.40
A_ZeroBias	0	large	0.40
Total L1 Trigger Rate (kHz)			16.67 ± 0.15

Table 8.1: Trigger table showing L1 rates at chosen thresholds for  $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .



# HLT Trigger Rates

I. Belotelov et al.  
CMS PTDR, Vol.1 (2006)



HLT path	L1 condition	Thresholds (GeV)	HLT Rate (Hz)	Total Rate (Hz)
Single Isolated $\mu$	A_SingleMu7	11	$18.3 \pm 2.2$	18.3
Single Relaxed $\mu$	A_SingleMu7	16	$22.7 \pm 1.5$	37.7
Double Relaxed $\mu$	A_DoubleMu3	(3, 3)	$12.3 \pm 1.6$	48.5
$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	A_DoubleMu3	(3, 3) $M_{\mu\mu} \in [2.9, 3.3]$	$2.0 \pm 0.8$	49.4
$\Upsilon \rightarrow \mu\mu$	A_DoubleMu3	(3, 3) $M_{\mu\mu} \in [8, 12]$	$1.8 \pm 0.5$	50.5
$Z \rightarrow \mu\mu$	A_DoubleMu3	(7, 7) $M_{\mu\mu} \in [80, 100]$	$0.1 \pm 0.0$	50.5
Triple Relaxed $\mu$	A_TripleMu3	(3, 3, 3)	$0.1 \pm 0.0$	50.5
Same-sign double $\mu$	A_DoubleMu3	(3, 3)	$5.7 \pm 1.2$	52.5
$b \rightarrow \mu$ tag 1-jet Prescale 20	A_Mu5_Jet15	20 $\Delta R(\mu, j) < 0.4$	$4.0 \pm 0.1$	56.1
$b \rightarrow \mu$ tag 2-jets	A_Mu5_Jet15	$120, p_T^{\text{rel}}(\mu) > 0.7$ $\Delta R(\mu, j) < 0.4$	$0.5 \pm 0.0$	56.1
$b \rightarrow \mu$ tag 3-jets	A_Mu5_Jet15	$70, p_T^{\text{rel}}(\mu) > 0.7$ $\Delta R(\mu, j) < 0.4$	$0.3 \pm 0.0$	56.1
$b \rightarrow \mu$ tag 4-jets	A_Mu5_Jet15	$40, p_T^{\text{rel}}(\mu) > 0.7$ $\Delta R(\mu, j) < 0.4$	$0.4 \pm 0.0$	56.1
$b \rightarrow \mu$ tag $H_T$	A_HTT250	$370, p_T^{\text{rel}}(\mu) > 0.7$ $\Delta R(\mu, j) < 0.4$	$2.6 \pm 0.2$	56.6
$b \rightarrow J/\psi(\mu\mu)$	A_DoubleMu3	(4, 4) $M_{\mu\mu} \in [2.95, 3.25]$	$0.7 \pm 0.1$	56.8
$\mu + b$ -jet	A_Mu5_Jet15	(7, 35)	$0.1 \pm 0.0$	56.8
$\mu + b \rightarrow \mu$ -jet	A_Mu5_Jet15	(7, 20)	$0.1 \pm 0.1$	56.8
$\mu + \text{jet}$	A_Mu5_Jet15	(7, 40)	$6.3 \pm 0.7$	60.8
$e + \mu$	*	(8, 7)	$0.5 \pm 0.4$	61.2
$e + \mu$ relaxed	*	(10, 10)	$0.1 \pm 0.0$	61.3
$\mu + \tau$	A_Mu5_TauJet20	(15, 20)	$0.0 \pm 0.0$	61.3
Single-Jet	A_SingleJet150	200	$9.3 \pm 0.1$	70.1
Double-Jet	A_SingleJet150 A_DoubleJet70	150	$10.6 \pm 0.0$	74.4
Triple-Jet	†	85	$7.5 \pm 0.1$	78.8
Quad-Jet	‡	60	$3.9 \pm 0.1$	80.5
$\cancel{E}_T$	A_ETM40	65	$4.9 \pm 0.7$	84.0
Acopl. Double-Jet	A_SingleJet150 A_DoubleJet70	125	$1.4 \pm 0.0$	84.0
Acopl. Single-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(100, 60)	$1.6 \pm 0.0$	84.2
Single-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(180, 60)	$2.2 \pm 0.1$	84.4
Double-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(125, 60)	$1.0 \pm 0.0$	84.4

Continued on next page ...

HLT path	L1 condition	Thresholds (GeV)	HLT Rate (Hz)	Total Rate (Hz)
Triple-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(60, 60)	$0.6 \pm 0.0$	84.4
Quad-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(35, 60)	$1.2 \pm 0.1$	84.6
$H_T + \cancel{E}_T$	A_HTT300	(350, 65)	$4.4 \pm 0.1$	86.2
Single Jet Prescale 10	A_SingleJet100	150	$3.5 \pm 0.0$	87.9
Single Jet Prescale 100	A_SingleJet70	110	$1.5 \pm 0.0$	89.1
Single Jet Prescale $10^4$	A_SingleJet30	60	$0.8 \pm 0.4$	89.9
VBF Double-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(40, 60)	$0.2 \pm 0.0$	89.0
SUSY 2-jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(80, 20, 60)	$2.0 \pm 0.1$	90.4
Acopl. Double-Jet + $\cancel{E}_T$	A_ETM30	(60, 60)	$1.0 \pm 0.0$	90.4
Single Isolated $e$	A_SingleIsoEG12	15	$17.1 \pm 2.3$	107.5
Single Relaxed $e$	A_SingleEG15	17	$9.6 \pm 1.3$	109.3
Double Isolated $e$	A_DoubleIsoEG8	10	$0.2 \pm 0.1$	109.4
Double Relaxed $e$	A_DoubleEG10	12	$0.8 \pm 0.1$	109.9
Single Isolated $\gamma$	A_SingleIsoEG12	30	$8.4 \pm 0.7$	118.1
Single Relaxed $\gamma$	A_SingleEG15	40	$2.8 \pm 0.2$	118.5
Double Isolated $\gamma$	A_DoubleIsoEG8	(20, 20)	$0.6 \pm 0.4$	119.0
Double Relaxed $\gamma$	A_DoubleEG10	(20, 20)	$1.8 \pm 0.5$	120.1
High $E_T e$	A_SingleEG15	80	$0.5 \pm 0.0$	120.4
High $E_T e$	A_SingleEG15	200	$0.1 \pm 0.0$	120.4
Lifetime $b$ -tag 1-jet	◊	180	$1.3 \pm 0.0$	120.5
Lifetime $b$ -tag 2-jets	◊	120	$2.1 \pm 0.0$	121.2
Lifetime $b$ -tag 3-jets	◊	70	$1.7 \pm 0.0$	121.8
Lifetime $b$ -tag 4-jets	◊	40	$1.8 \pm 0.0$	122.6
Lifetime $b$ -tag $H_T$	◊	470	$2.5 \pm 0.1$	123.1
Single $\tau$	A_SingleTauJet80	(15, 65)	$0.2 \pm 0.0$	123.2
$\tau + \cancel{E}_T$	A_TauJet30_ETM30	(15, 35)	$1.8 \pm 0.2$	124.7
Double $\tau$ (Calo+Pixel)	A_DoubleTauJet40	15	$4.9 \pm 0.6$	129.4
$e + b$ -jet	A_IsoEG10_Jet20	(10, 35)	$0.1 \pm 0.0$	129.4
$e + \text{jet}$	A_IsoEG10_Jet30	(12, 40)	$11.6 \pm 1.2$	135.8
$e + \tau$	A_IsoEG10_TauJet20	(12, 20)	$0.2 \pm 0.0$	135.8
Prescaled $e/\gamma$	See Table 3.9		$5.0 \pm 0.0$	140.8
Prescaled $\mu$	See Table 2.3		$3.0 \pm 0.0$	143.8
Min.Bias	A_MinBias_HTT10	—	$1.5 \pm 0.0$	145.3
Pixel Min.Bias	A_ZeroBias	—	$1.5 \pm 0.0$	146.8
Zero Bias	A_ZeroBias	—	$1.0 \pm 0.0$	147.8
<b>Total HLT rate (Hz)</b>				<b>148 ± 4.9</b>
(*) A_Mu3_IsoEG5, A_Mu5_IsoEG10, A_Mu3_EG12				
(†) A_SingleJet150, A_DoubleJet70, A_TripleJet50				
(‡) A_SingleJet150, A_DoubleJet70, A_TripleJet50, A_QuadJet30				
(◊) A_SingleJet150, A_DoubleJet100, A_TripleJet50, A_QuadJet30, A_HTT300				

Table 8.3: The High-Level Trigger table at  $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , for an output of approximately 150 Hz

- ❑ Разработка, развитие алгоритмов реконструкции мюонов и мюонных пар с учетом особенностей мюонов высоких энергий (особенно в области Endcap)
- ❑ Тесты новых версий ПО (CMSSW) для реконструкции мюонов на MC и экспериментальных данных (космические мюоны, пучки SPS)

В CMSSW реализованы различные алгоритмы:

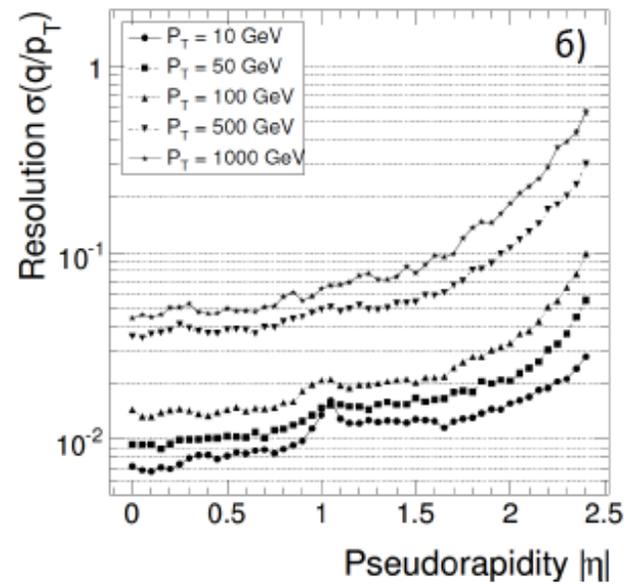
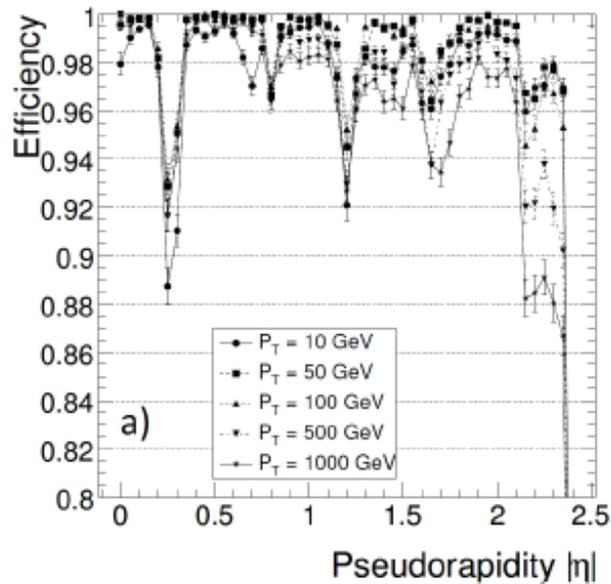
Option 0:  
Tracker only

Option 1:  
Global Muon Reconstructor  
(Tracker + Muon)

Option 2:  
Truncated Muon Reconstructor  
(Tracker + 1ая мюонная станция)

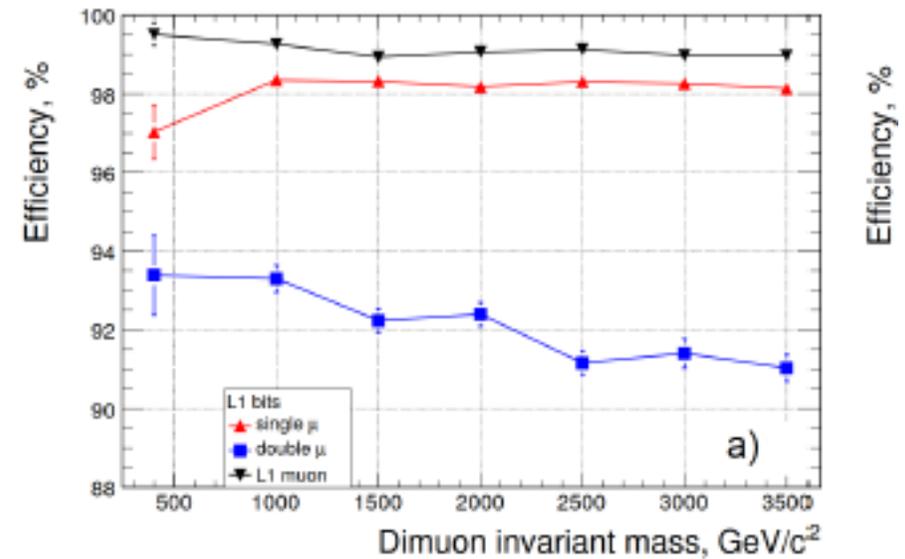
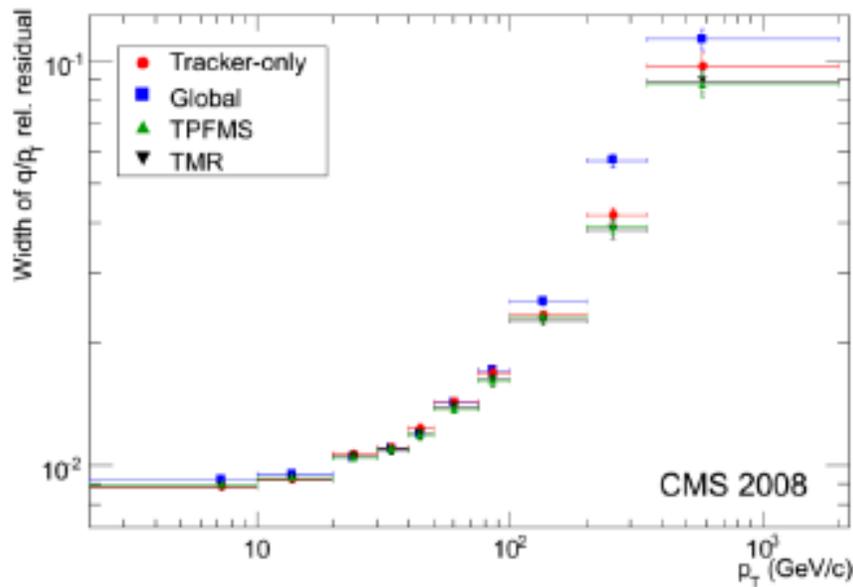
Option 3:  
Picky Muon Reconstructor  
(Tracker + “чистая” мюонная станция)

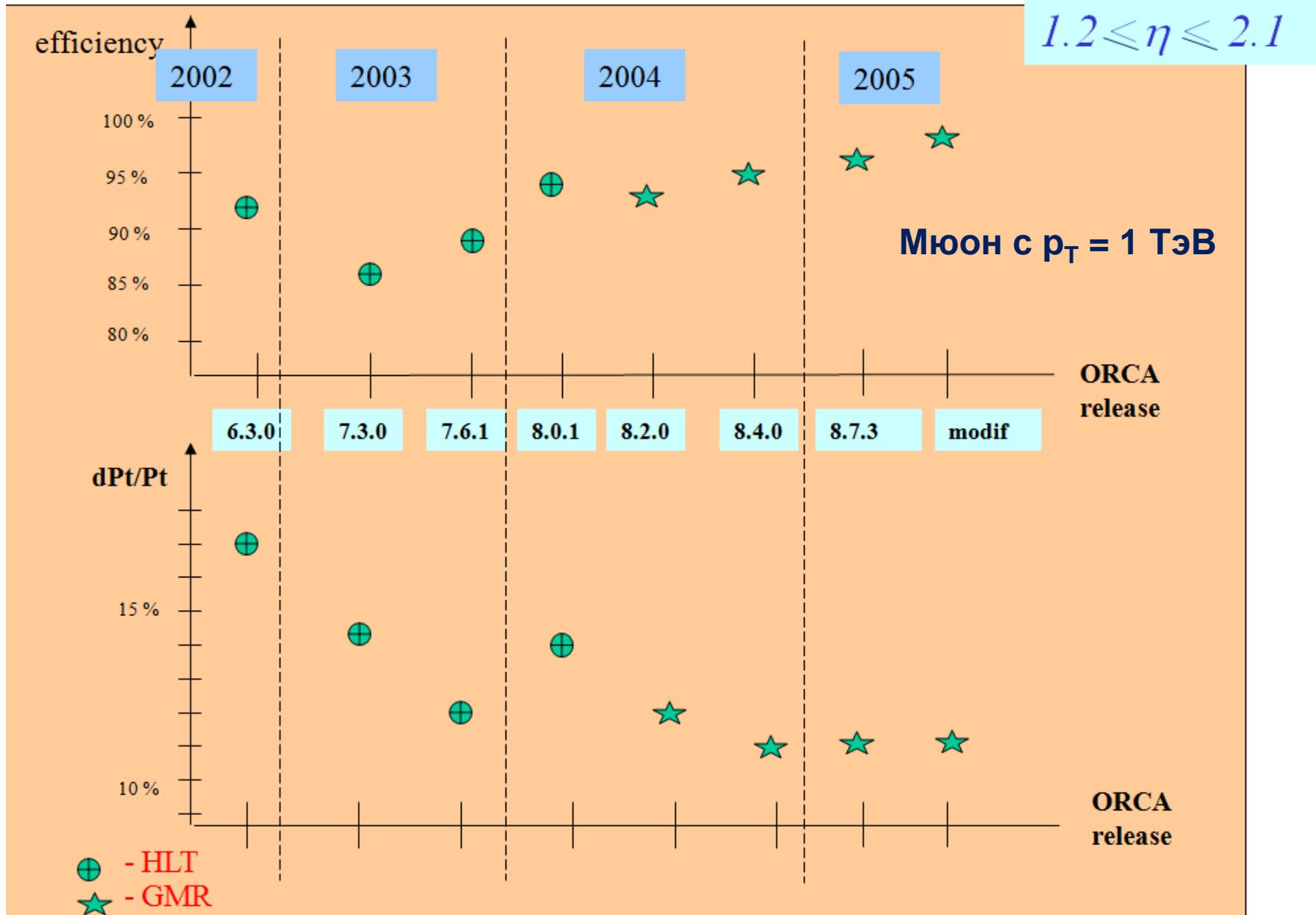
*I. Belotelov et al.  
CMS PTDR, Vol.I (2006)*



- эффективность:  $94 \div 92$  %
- массовое разрешение:  $3.8 \div 7.2$  %
- угловое разрешение: лучше 0.5 %

для диапазона инвариантных масс  $1 \div 5$  ТэВ/ $c^2$

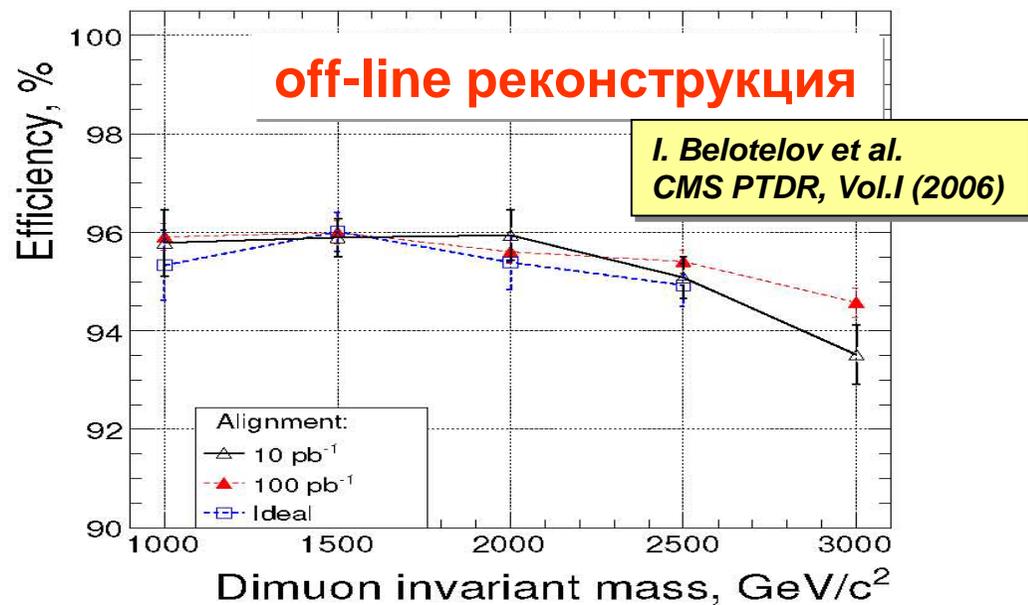
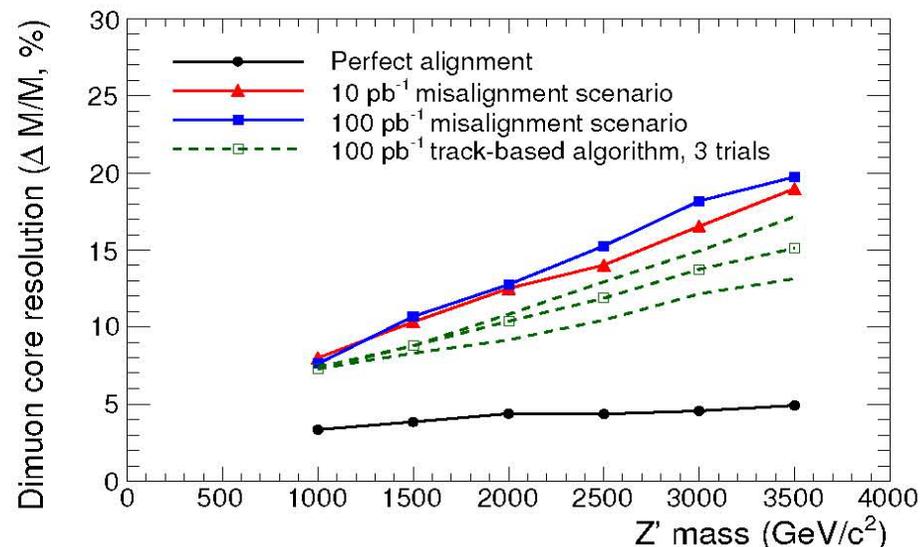


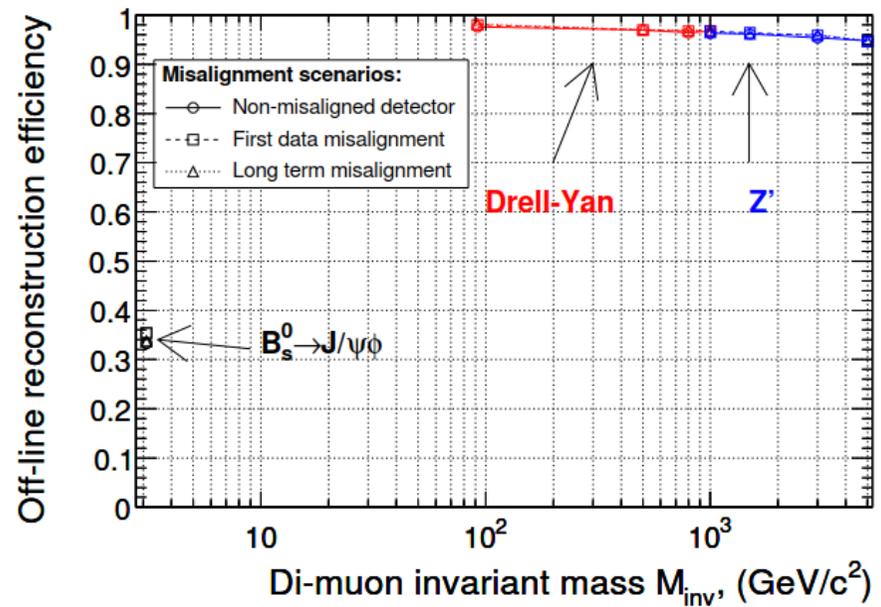
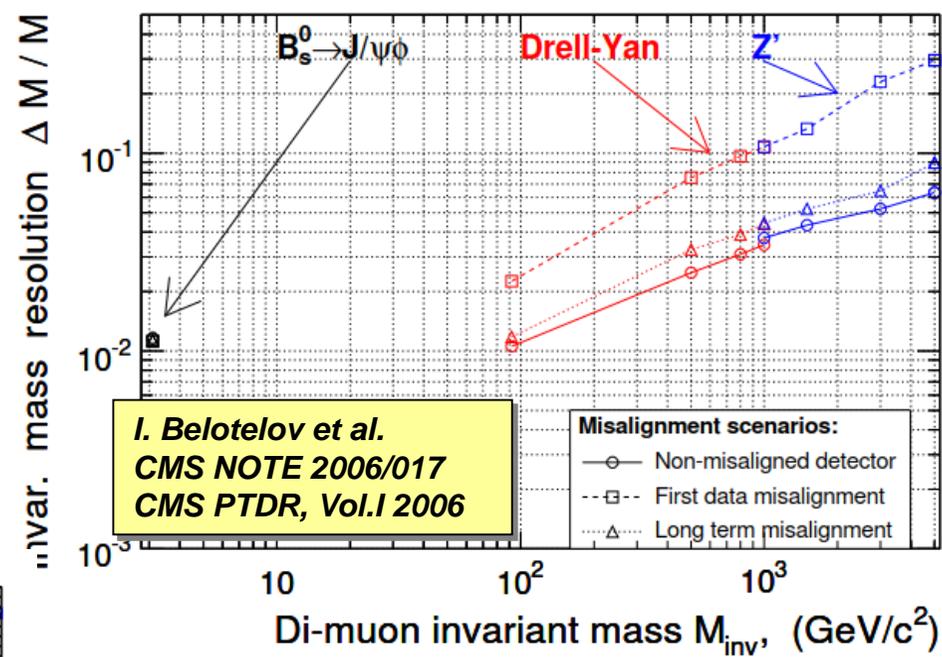


# Пространственная невыравненность (misalignment)

Остаточная невыравненность (после геодезического выравнивания):  
400 мк по радиусу и ~1 мм по оси Z

- ❑ Сценарии невыравненности детекторных систем для  $10 \text{ pb}^{-1}$  и  $100 \text{ pb}^{-1}$
- ❑ Сценарий остаточной невыравненности после процедуры выравнивания с помощью трекера (распады W) для  $100 \text{ pb}^{-1}$ 
  - Влияние невыравненности на эффективность триггера пренебрежимо мала
  - Влияние на вероятность ошибки в определении заряда также мало (значение вероятности:  $0.005 \div 0.047$  для GMR и  $0.122 \div 0.323$  для StandAlone)



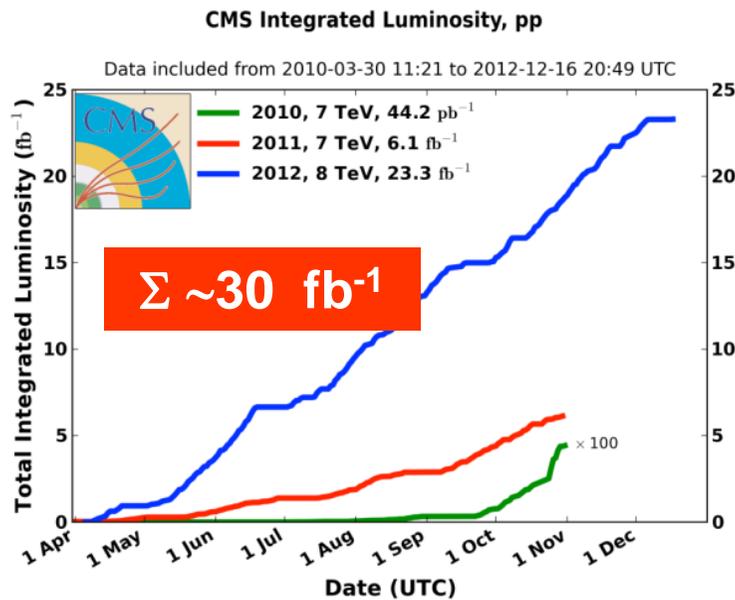


Сильное влияние на разрешение и незначительное на оффлайн эффективность

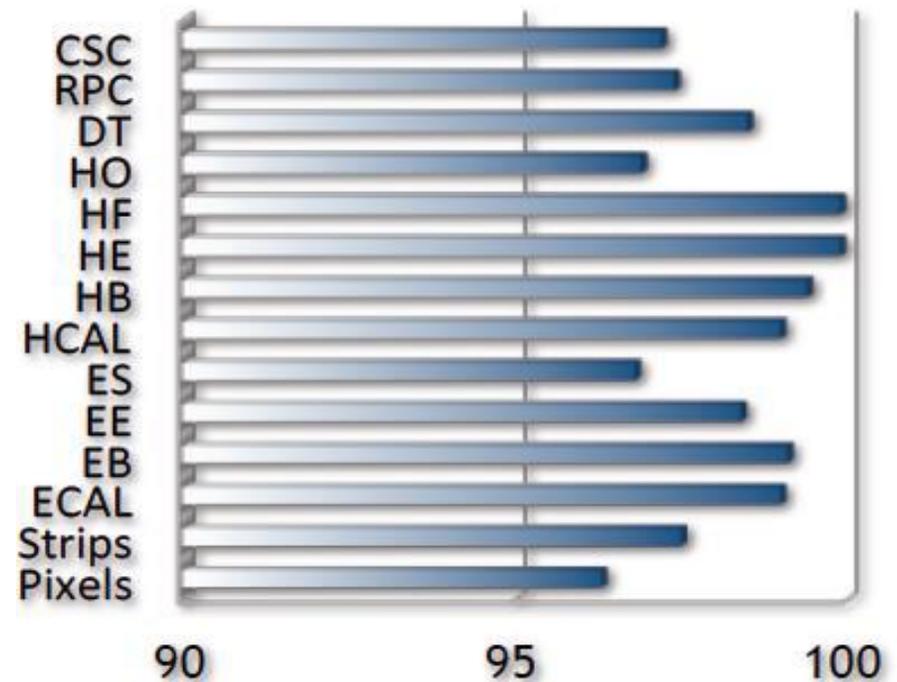
# Результаты первого цикла работы ЛНС (2010-2012)

Total certified good data set

- 5.32 fb<sup>-1</sup> @ 7 TeV
  - 20.65 fb<sup>-1</sup> @ 8 TeV
- ~88% of delivered lumi



**CMS Status in Feb 2013 (%)**



<https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>

Parameter	Design	June 2012
Beam energy	7 TeV	4 TeV
Peak Luminosity	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$6.8 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Number of bunches	2808	1380
Number of particle per bunch	$1.15 \times 10^{11}$	$1.48 \times 10^{11}$
Bunch spacing (ns)	25	50
RMS bunch length	7.55 cm	$\geq 9$ cm
Beam current	0.582 A	0.369 A
Luminosity/bunch	$3.6 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$1.1 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
IP beam size	$16.7 \mu\text{m}$	$19 \mu\text{m}$
$\beta^*$ at IP	0.55 mm	0.6 mm
Transverse Norm. Emmitance	$3.75 \mu\text{m}$	$2.6 \mu\text{m}$
Crossing angle at IP	$285 \mu\text{rad}$	$290 \mu\text{rad}$

Table 3.1: Actual parameters of the LHC in 2012 vs. design values.

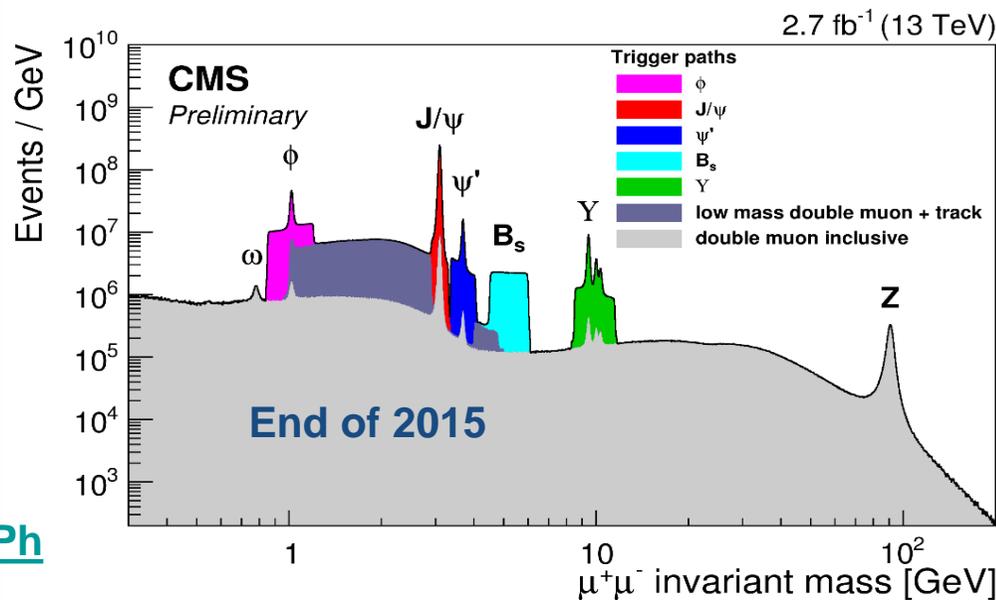
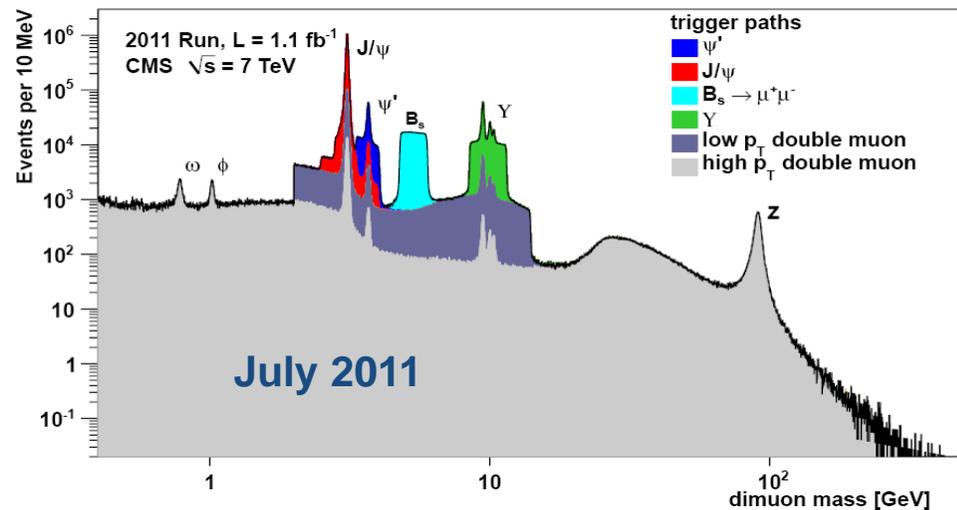
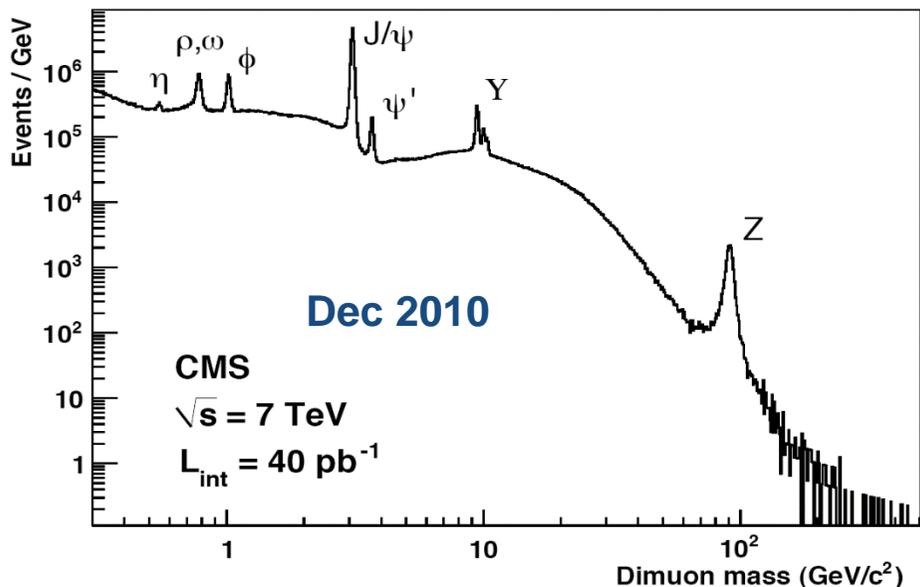
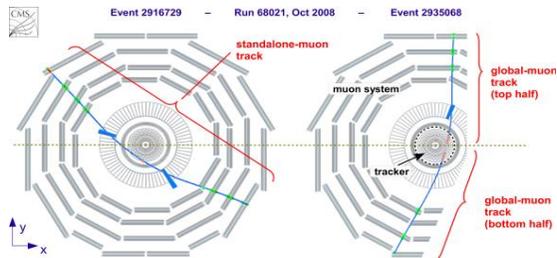
$$L = \frac{f N_1 N_2 n_b \gamma F(\theta)}{4\pi \epsilon_n \beta^*}$$

**$k$  = number of bunches = 2808**

**$N$  = no. protons per bunch =  $1.15 \times 10^{11}$**

**$f$  = revolution frequency = 11.25 kHz**

**$\sigma_x^*, \sigma_y^*$  = beam sizes at collision point (hor./vert.) =  $16 \mu\text{m}$**



CMS shows an excellent performance to detect different signals

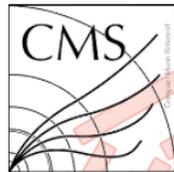
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsMUO>

# Пример события с парой мюонов

Run / Event: 205694 / 416479300

$M(\mu^+\mu^-) = 1871 \text{ GeV}$

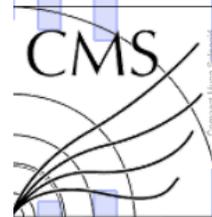
Track  $p_T > 3 \text{ GeV}$



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sun Oct 21 17:29:50 2012 GMT-3  
Run/Event: 205694 / 416479300  
Lumi section: 398

tevMuon 0,  
pt = 456.29  
eta = -1.033  
phi = 2.861

tevMuon 1,  
pt = 502.25  
eta = 1.542  
phi = -0.280

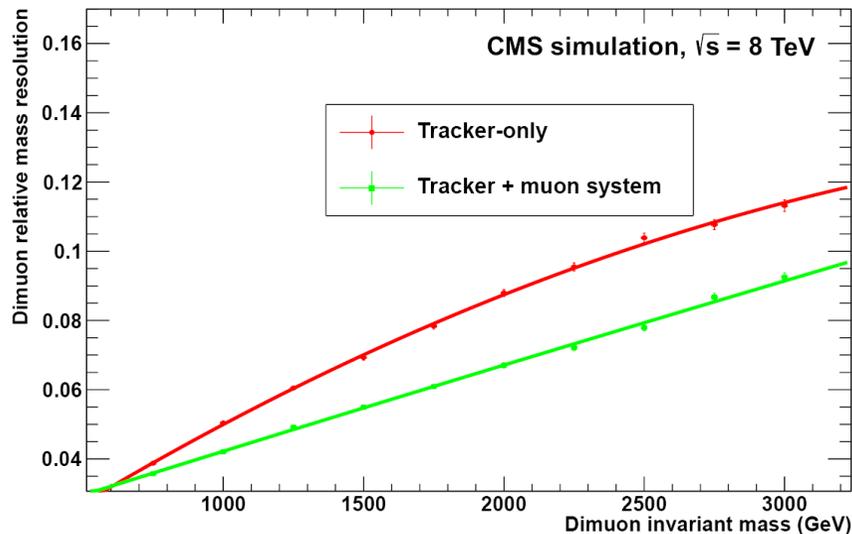
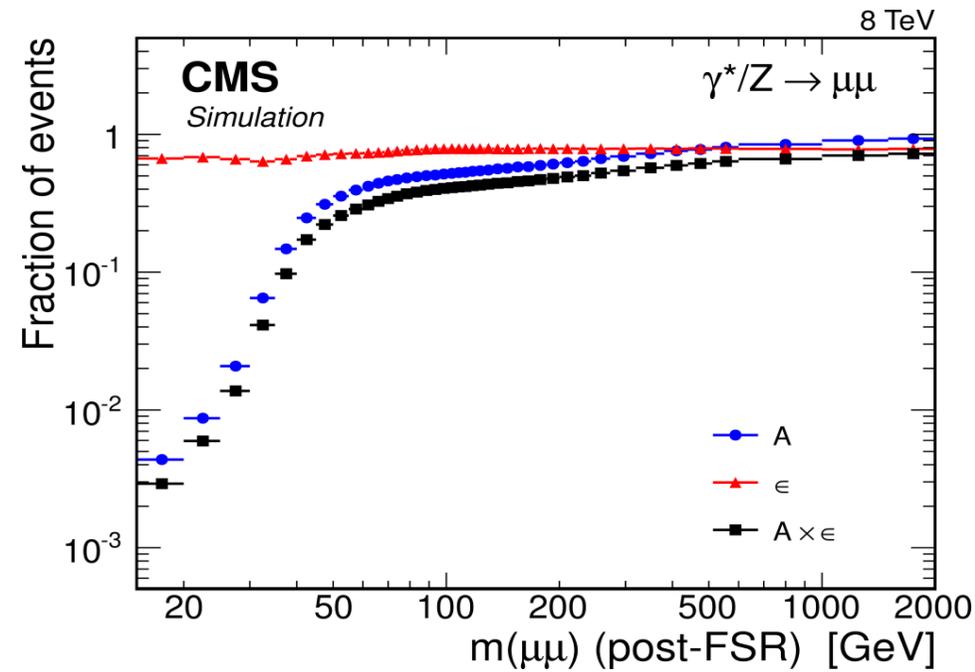


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sun Oct 21 17:29:50 2012 GMT-3  
Run/Event: 205694 / 416479300  
Lumi section: 398

tevMuon 0,  
pt = 456.29  
eta = -1.033  
phi = 2.861

tevMuon 1,  
pt = 502.25  
eta = 1.542  
phi = -0.280

# ДЯ: реконструкция и отбор событий



## Kinematics:

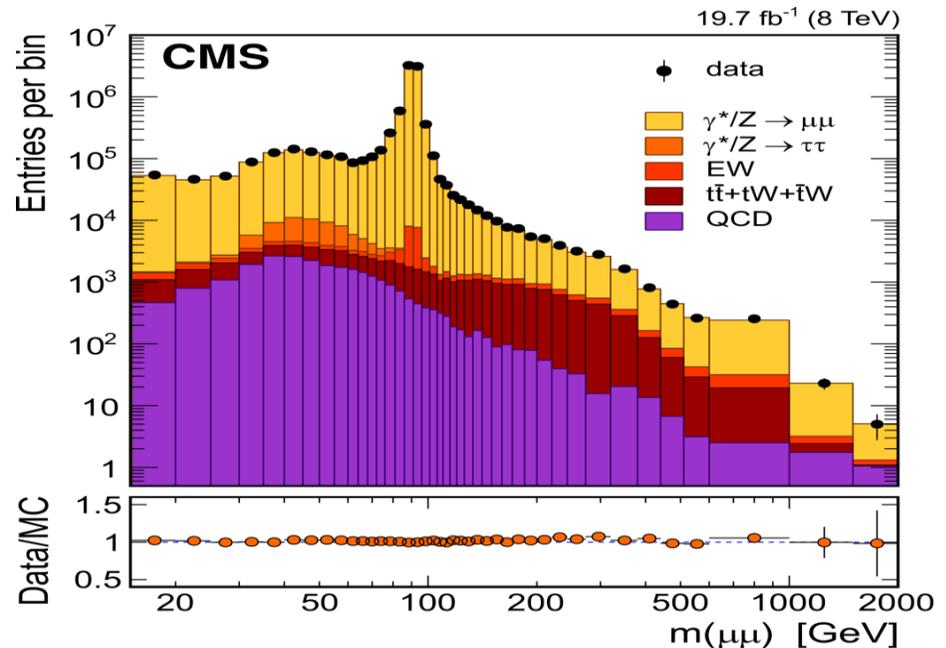
- Oppositely charged global and tracker muons
- $|\eta| < 2.4$  and  $p_T > 20$  GeV

## Quality requirements:

- $> 10$  tracker hits,  $> 1$  pixel hits,  $> 1$  muon hits
- $> 2$  muon stations
- $\chi^2 < 10$  for the global fit
- Small impact parameter  $d_0 < 0.2$
- Remove back-to-back dimuons  $\alpha > 2.5$  mrad

## Isolation:

- Tracker+HCAL isolation  
( $\sum p_T(\text{tracks}) + \sum E_T(\text{had})$ )/ $p_T(\mu) < 0.15$



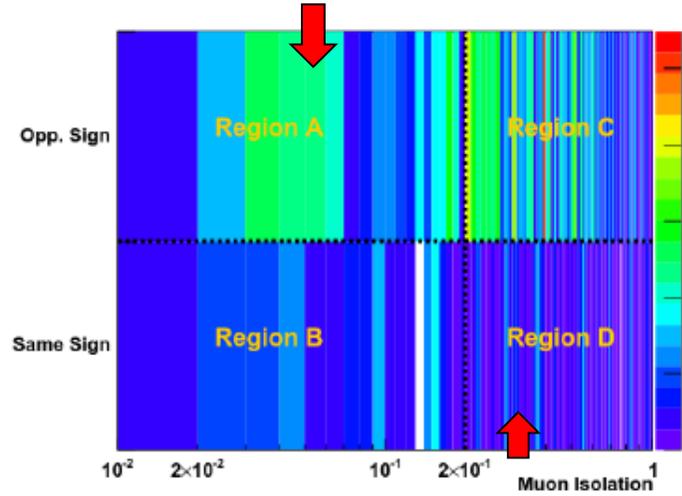
Метод контрольного набора данных (data-driven) **сигнальная область**

✓ метод ABCD (jet + V, QCD jets)

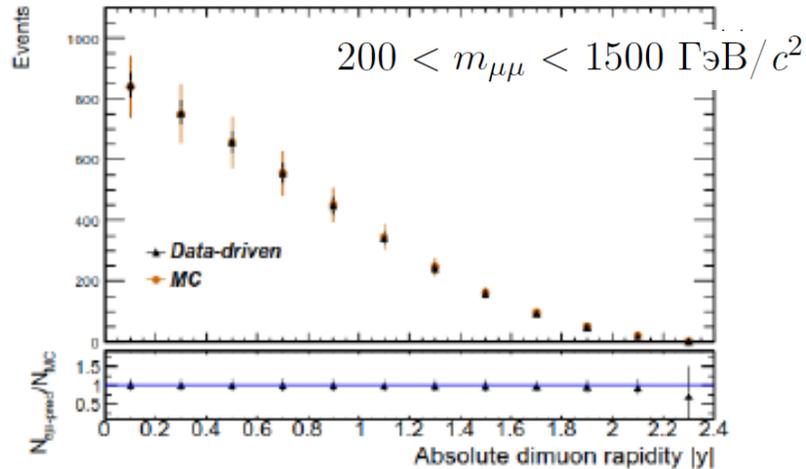
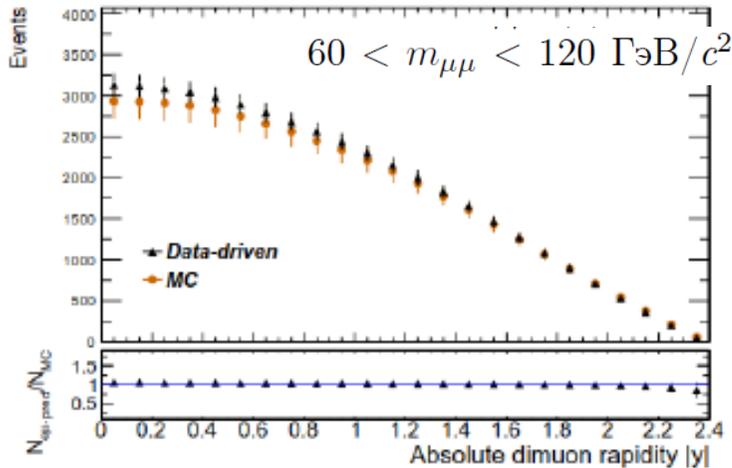
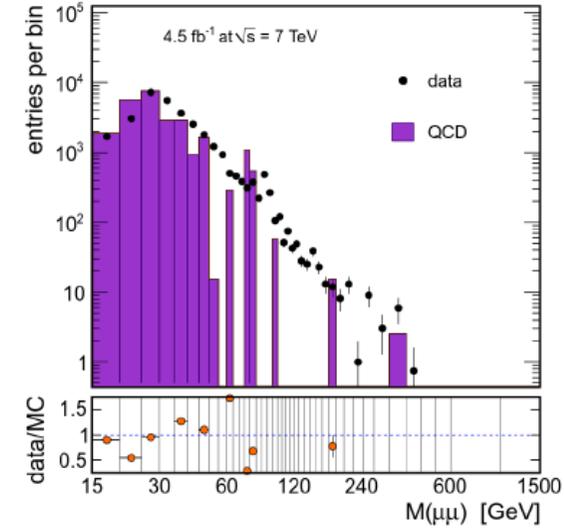
$$N_A^{QCD} = \frac{N_C^{QCD}}{N_D^{QCD}} \cdot N_B^{QCD}$$

✓ метод eμ (ЭС процессы)

$$N_{est}^{\mu^+\mu^-} = \frac{N_{MC}^{\mu^+\mu^-}}{N_{MC}^{e\mu}} \cdot N_{obs}^{e\mu}$$



**преимущественно фон**

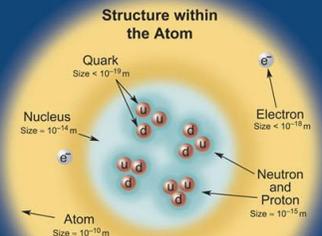


# Результаты первого цикла работы ЛHC (2010-2012): проверка СМ в канале с парой мюонов

## FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

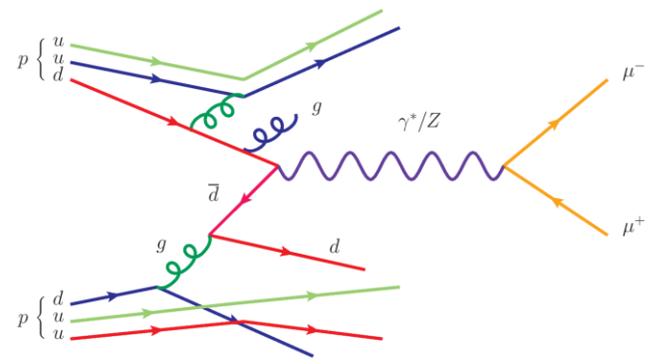
**FERMIONS** matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ (lightest)	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0	<b>u</b> up	0.002	2/3
$e^-$ electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.005	-1/3
$\nu_\mu$ (middle)	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu^-$ muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ (heaviest)	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0	<b>t</b> top	173	2/3
$\tau$ tau	1.777	-1	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3



**BOSONS** force carriers spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
$W^\pm$ W bosons	80.39	-1 / +1			
$Z^0$ Z boson	91.188	0			



**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-35}$  GeV s  $\approx 1.05 \times 10^{-34}$  J s.

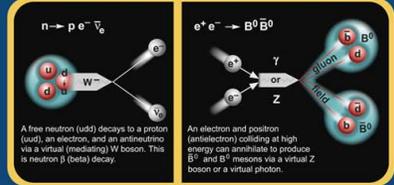
**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$  where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$  kg).

**Neutrinos** are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , or  $\nu_\tau$ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , and  $\nu_3$  for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

**Matter and Antimatter** For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $1\tau_0 = 0^0$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Particle Processes



### Properties of the Interactions

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction	Electromagnetic Interaction (Electroweak)	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^\pm$ , $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-16} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	$10^{-41}$	0.8	1	25
	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60

### Unsolved Mysteries

#### Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

#### Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

#### Dark Matter?

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

#### Origin of Mass?

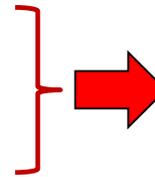
In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

## Процесс Дрелла-Яна

- ✓ сечение
- ✓ угловые распределения
- ✓ асимметрия AFB
- ✓ слабый угол смешивания

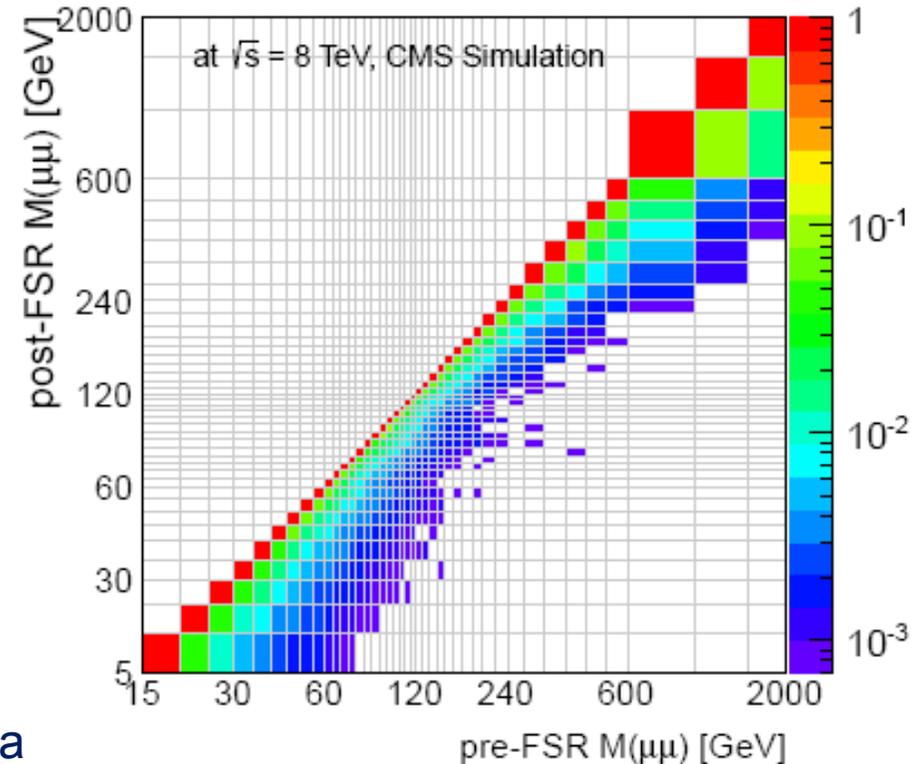
## Систематические эффекты

- ✓ Коррекция импульса мюонов
- ✓ Конечное разрешение детекторных систем
- ✓ Излучение в конечном состоянии (FSR)
- ✓ Аксептанс
- ✓ Невыравненность детекторных систем
- ✓ Наложение событий (pile-up)
- ✓ Эффективность
- ✓ Неопределенность фона



Процедура последовательной коррекции (unfolding) с помощью матриц отклика, полученных на МС

Sources	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$
Efficiency	2.9, 0.5, 0.7	1.0, 0.4, 1.8
Detector resolution	1.2, 5.4, 1.8	0.6, 1.8, 1.6
Background estimation	2.2, 0.1, 13.8	1.0, 0.1, 4.6
Electron energy scale	0.2, 2.4, 2.0	—
Muon momentum scale	—	0.2, 1.7, 1.6
FSR simulation	0.4, 0.3, 0.3	0.4, 0.2, 0.5
Total experimental	3.7, 2.5, 14.0	1.6, 2.5, 5.4
Theoretical uncertainty	4.2, 1.6, 5.3	4.1, 1.6, 5.3
Luminosity	2.6, 2.6, 2.6	2.6, 2.6, 2.6
Total	6.3, 6.7, 15.3	5.1, 3.9, 8.0



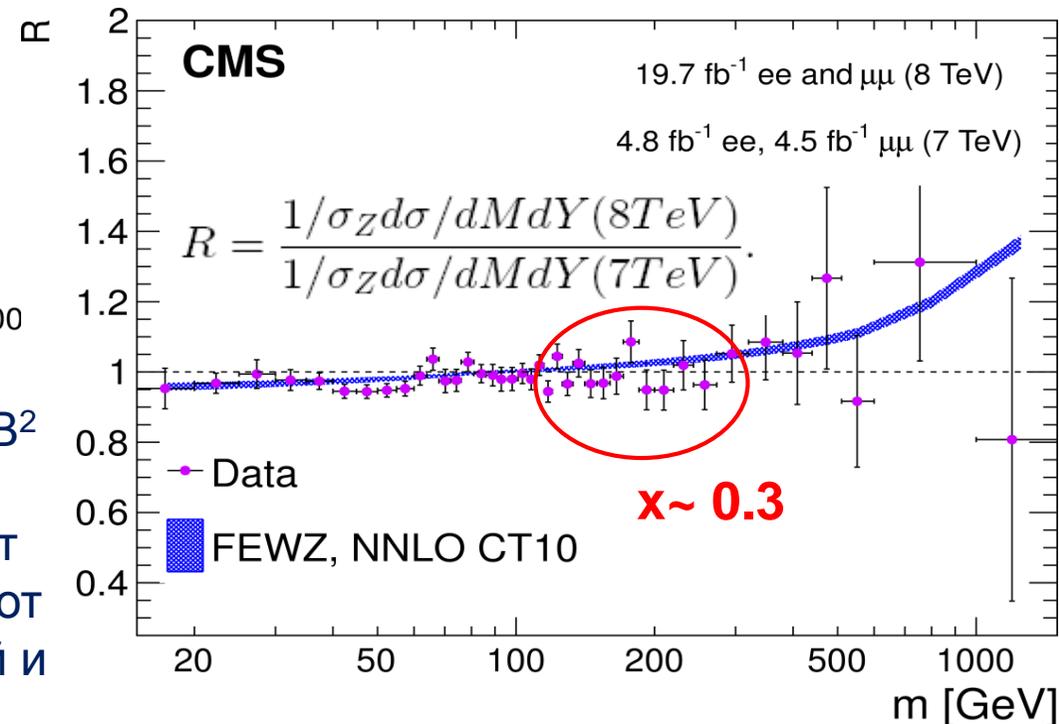
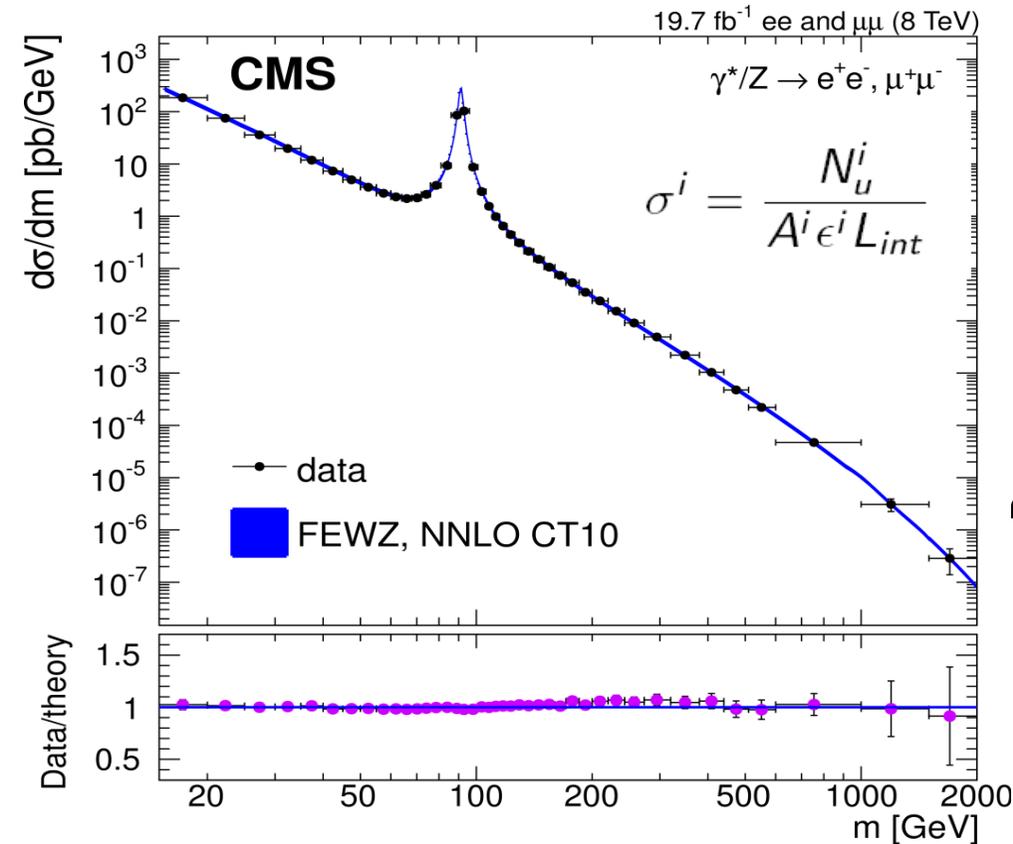
## Теоретические неопределенности

- ✓ PDF, величина констант связи, выбор масштаба взаимодействия ( $Q$ ), порядок ТВ

# Дифференциальное сечение ДЯ

EPJ C 75 (2015) 147, arXiv:1412.1115

- ✓ Сечения ДЯ измерены в области инв. масс до 2 ТэВ
- ✓ Наблюдается согласие данных и предсказаний СМ в NNLO FEWZ3.1 с CT10 NNLO PDF

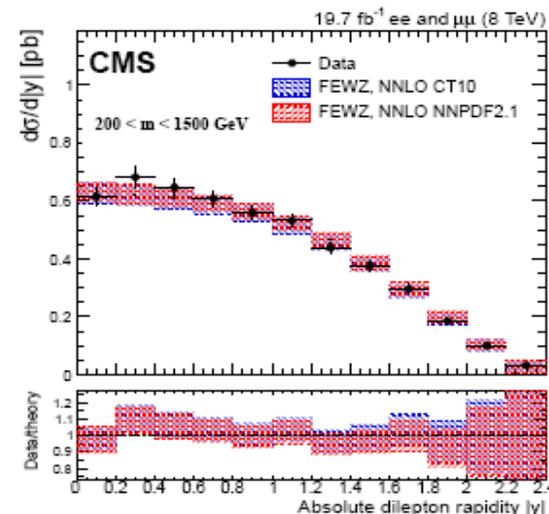
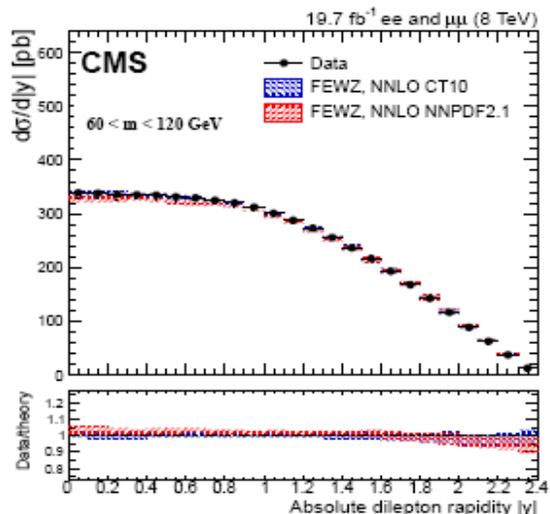
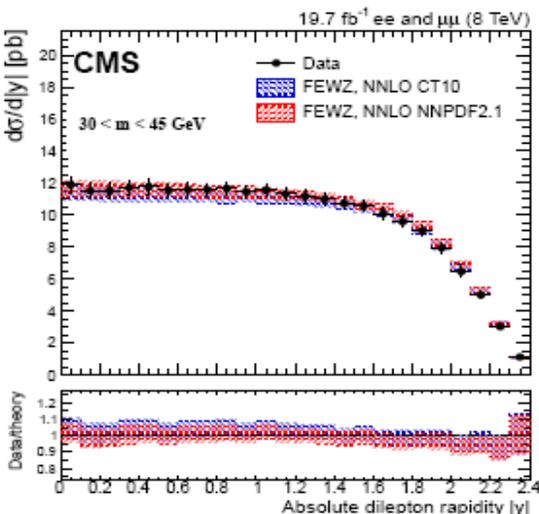
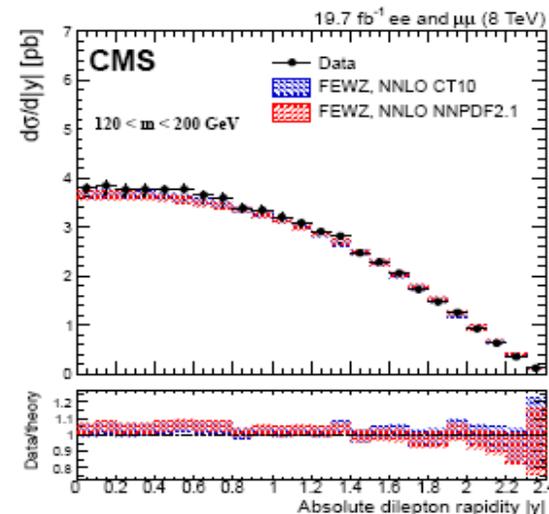
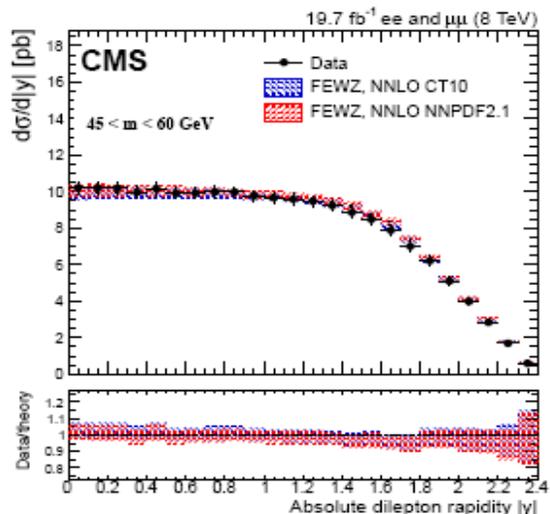
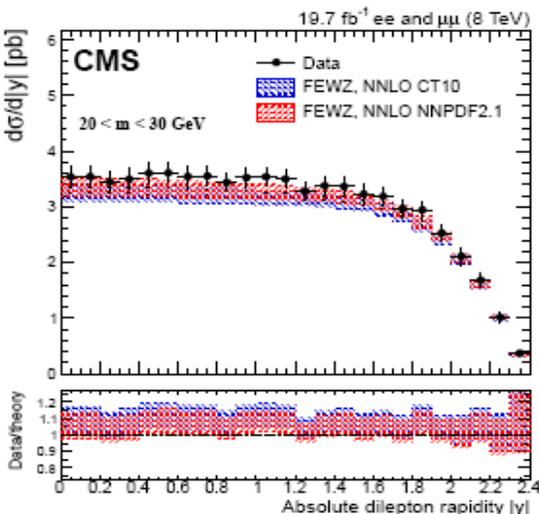


$3 \times 10^{-4} < x < 1.0$  и  $6 \times 10^2 < Q^2 < 3 \times 10^6 \text{ ГэВ}^2$

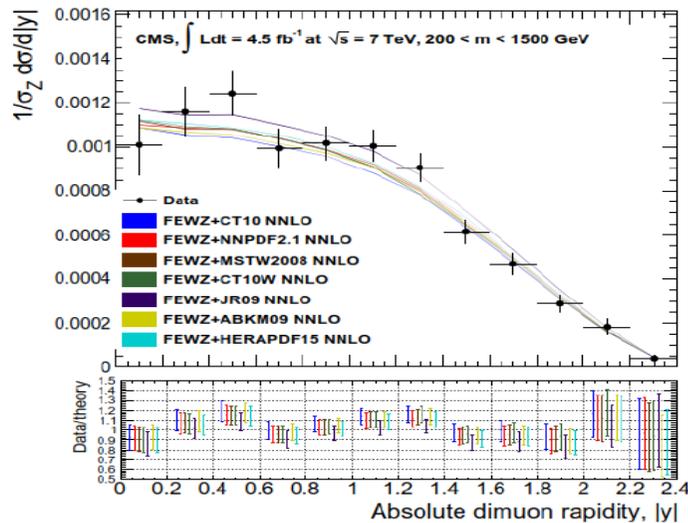
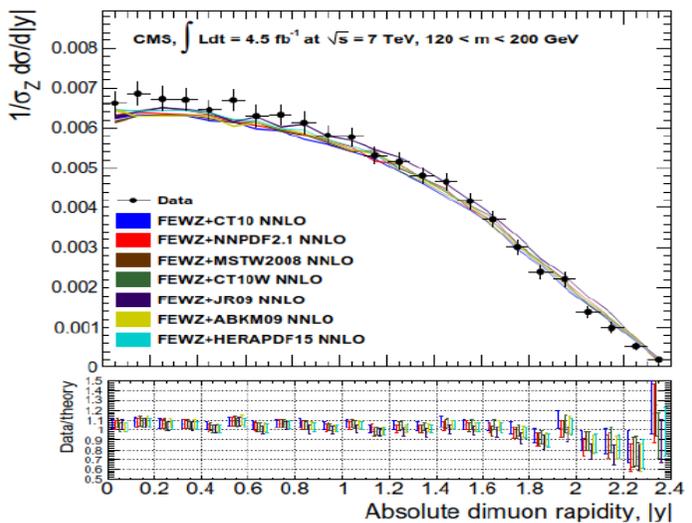
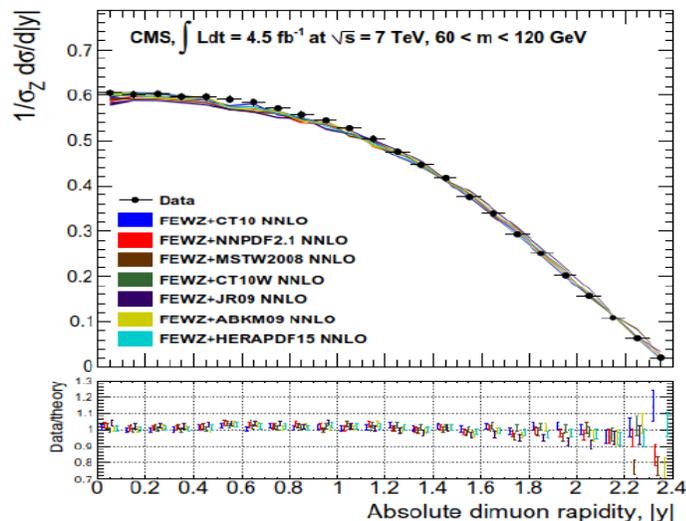
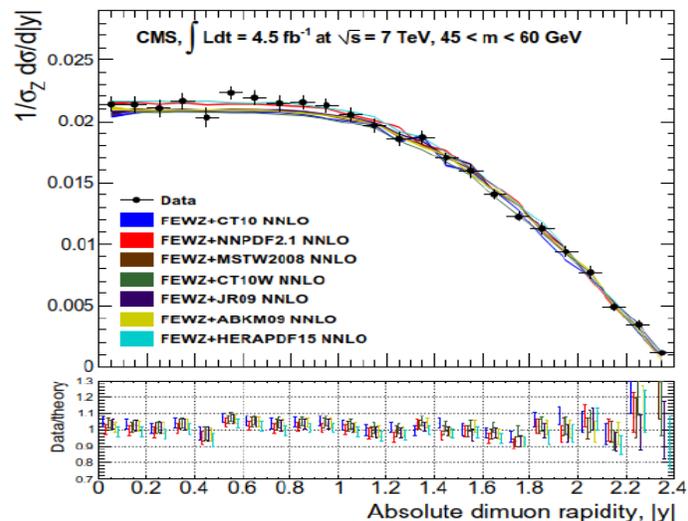
- ✓ Форма распределения R не противоречит ожиданиям СМ с учетом зависимости PDF от энергетического масштаба взаимодействий и переменной Бьёркена x

$\mu^+\mu^-$	Сечение в области $Z^0$ -пика
pre-FSR, с учетом $\epsilon_{acc}$	$1135 \pm 11$ (эксп.) $\pm 25$ (теор.) $\pm 30$ (свет.)
post-FSR, с учетом $\epsilon_{acc}$	$1115 \pm 11$ (эксп.) $\pm 25$ (теор.) $\pm 29$ (свет.)
pre-FSR, без учета $\epsilon_{acc}$	$571 \pm 6$ (эксп.) $\pm 1$ (теор.) $\pm 15$ (свет.)
post-FSR, без учета $\epsilon_{acc}$	$558 \pm 6$ (эксп.) $\pm 1$ (теор.) $\pm 15$ (свет.)
$e^+e^-$	Сечение в области $Z^0$ -пика
pre-FSR, с учетом $\epsilon_{acc}$	$1141 \pm 11$ (эксп.) $\pm 25$ (теор.) $\pm 30$ (свет.)
post-FSR, с учетом $\epsilon_{acc}$	$1101 \pm 11$ (эксп.) $\pm 26$ (теор.) $\pm 29$ (свет.)
pre-FSR, без учета $\epsilon_{acc}$	$572 \pm 6$ (эксп.) $\pm 1$ (теор.) $\pm 15$ (свет.)
post-FSR, без учета $\epsilon_{acc}$	$551 \pm 6$ (эксп.) $\pm 1$ (теор.) $\pm 14$ (свет.)
$\mu^+\mu^- + e^+e^-$	Сечение в области $Z^0$ -пика
pre-FSR, с учетом $\epsilon_{acc}$	$1138 \pm 8$ (эксп.) $\pm 25$ (теор.) $\pm 30$ (свет.)

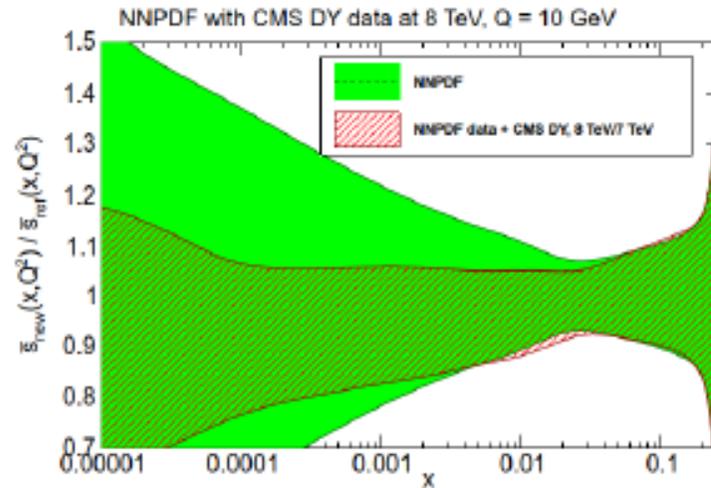
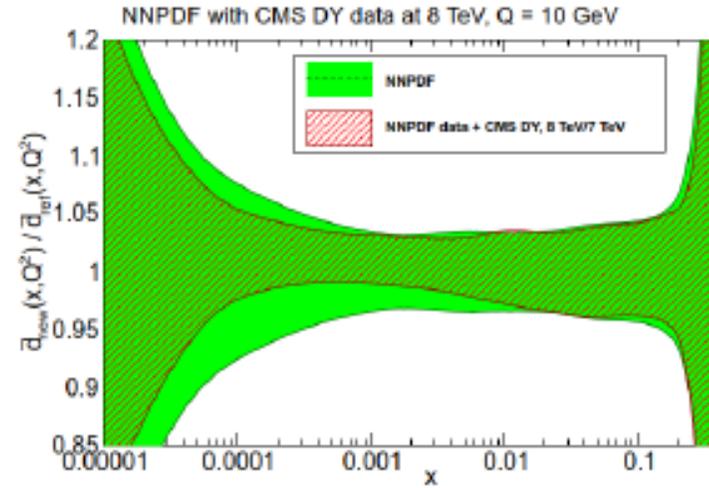
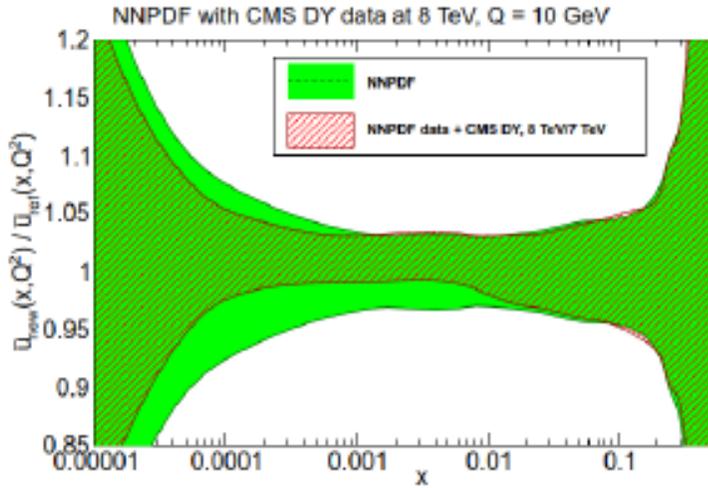
EPJ C 75 (2015) 147, arXiv:1412.1115



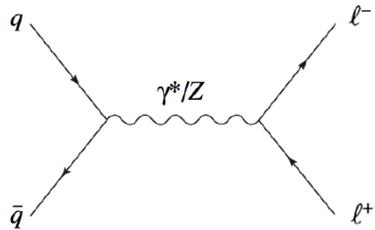
✓ Согласие данных и предсказаний CM в NNLO FEWZ3.1 с CT10 NNLO PDF



# Уточнение PDF (пример NNPDF)



Eur. Phys. J. C 76 (2016) 325



$$\frac{g}{2\cos\theta_W} \sum \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu$$

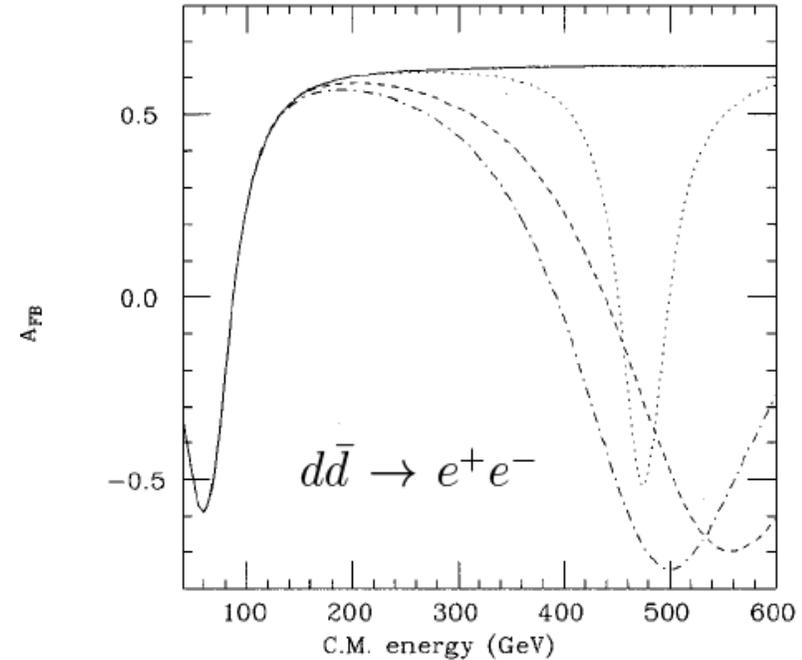
$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \left[ \frac{3}{8} A(1 + \cos^2\theta) + B \cos\theta \right]$$

V-A структура слабых токов, обусловленная нарушением P-четности, дает асимметрию по углу вылета лептона относительно фиксированного направления (кварка)

$$A_{FB} = \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B} = \frac{\int_0^1 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta - \int_{-1}^0 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta}{\int_0^1 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta + \int_{-1}^0 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta} = \frac{3B}{8A},$$

$$\sigma_F = \int_0^1 \frac{d\sigma}{d(\cos\theta)} d(\cos\theta) \quad \frac{g_V^f}{g_A^f} = 1 - \frac{2Q_f}{I_f^3} \sin^2\theta_W^{eff}$$

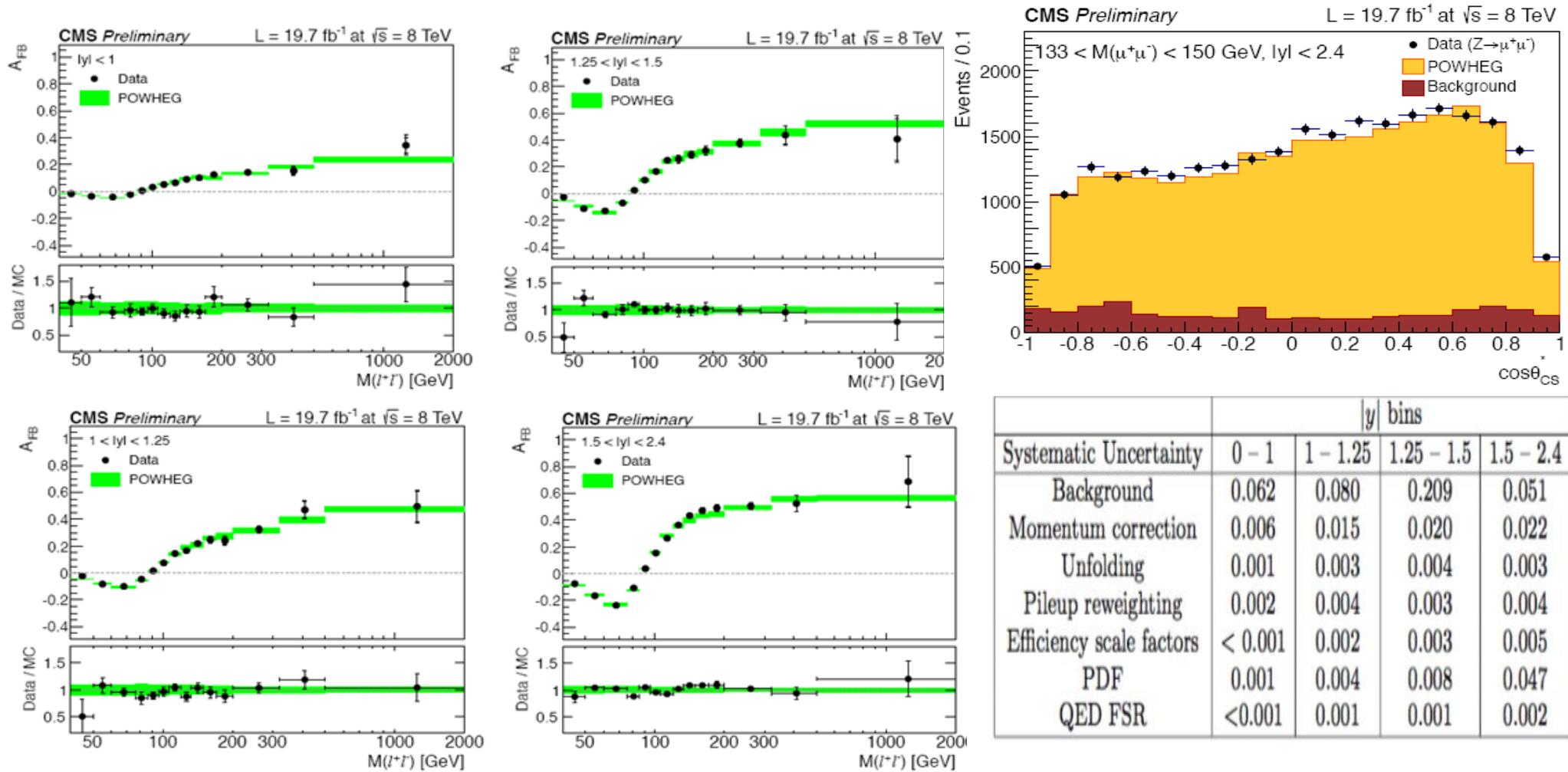
$$\sigma_B = \int_{-1}^0 \frac{d\sigma}{d(\cos\theta)} d(\cos\theta)$$



за направление движения кварка принимается направление движение димюона (DY/Z'/G\*/...), что приводит к появлению неопределенности выбора направления, которая максимальна при  $\eta = 0$

При больших массах  $A_{FB}^{\text{theor}} = 0.61$

Eur. Phys. J. C 76 (2016) 325



	y  bins			
	0 - 1	1 - 1.25	1.25 - 1.5	1.5 - 2.4
Systematic Uncertainty				
Background	0.062	0.080	0.209	0.051
Momentum correction	0.006	0.015	0.020	0.022
Unfolding	0.001	0.003	0.004	0.003
Pileup reweighting	0.002	0.004	0.003	0.004
Efficiency scale factors	< 0.001	0.002	0.003	0.005
PDF	0.001	0.004	0.008	0.047
QED FSR	< 0.001	0.001	0.001	0.002

✓ Согласие данных и предсказаний СМ в NLO POWHEG

**Drell-Yan yield = F [lepton angular ( $\cos\theta_{CS}$ ), dilepton rapidity (Y), dilepton mass (s)]**

$$\frac{d\sigma_{pp \rightarrow l+l-\chi}(Y, s, \cos\theta_{CS}^*)}{dY ds d\cos\theta_{CS}^*} \propto \sum_{q=u,d,s,c,b} [\hat{\sigma}_{q\bar{q}}^{even}(s, \cos^2\theta_{CS}^*, \sin^2\theta_{eff}) +$$

$$D_{q\bar{q}}(s, Y) \times \hat{\sigma}_{q\bar{q}}^{odd}(s, \cos\theta_{CS}^*, \sin^2\theta_{eff})] \times F_{q\bar{q}}(s, Y)$$

**dilution factor**

(reflects the fact that the quark direction is generally unknown and is taken as the boost direction of the dilepton system)

$$\sin^2\theta_{eff} = 0.2287 \pm 0.0020 \text{ (stat.)} \pm 0.0025 \text{ (syst.)}$$

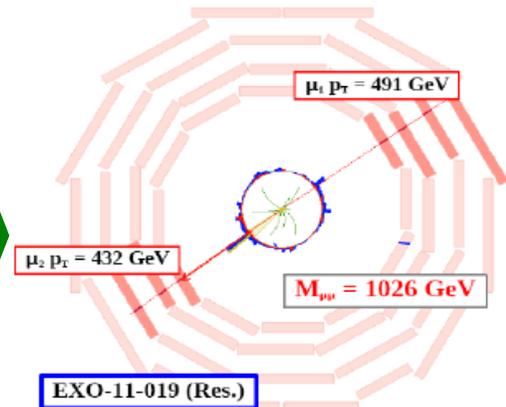
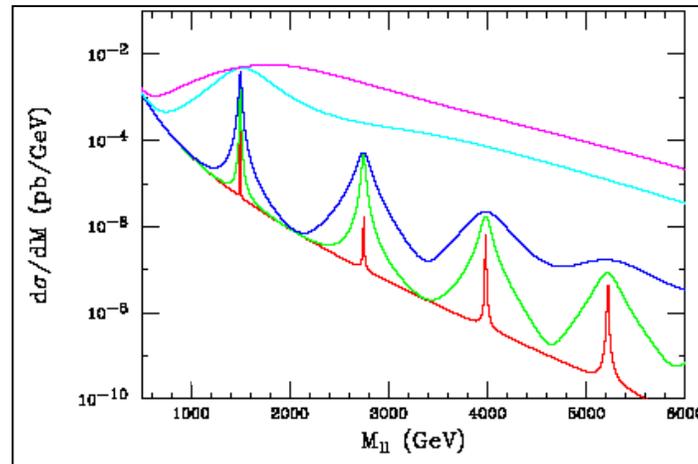
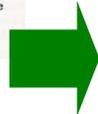
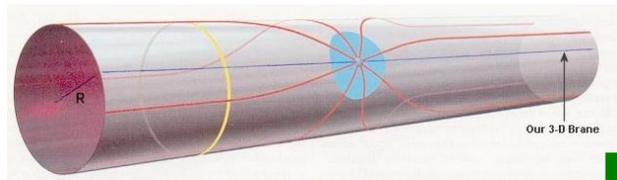
**parton factor**  
(takes into account flavour-dependence)

Systematic uncertainties in the measurement of  $\sin^2\theta_W$ :

Source	Correction	Uncertainty
PDF	-	$\pm 0.0013$
FSR	-	$\pm 0.0011$
LO model (EWK)	-	$\pm 0.0002$
LO model (QCD)	+0.0012	$\pm 0.0012$
Resolution/alignment	+0.0007	$\pm 0.0013$
Acceptance and Efficiency	-	$\pm 0.0003$
Background	-	$\pm 0.0001$
Total	+0.0019	$\pm 0.0025$

**PRD 84, 112002 (2011)**

# Результаты первого цикла работы ЛНС (2010-2012): поиск физики за рамками СМ в канале парой мюонов



# Тяжелые резонансы (1)

JHEP 04 (2015) 025, arXiv:1412.6302

$$\mathcal{L}(m|R_\sigma, M, \Gamma, w, \alpha, \beta, \kappa, \mu_B) = \frac{\mu^N e^{-\mu}}{N!} \prod_{i=1}^N \left( \frac{\mu_S(R_\sigma)}{\mu} f_S(m_i|M, \Gamma, w) + \frac{\mu_B}{\mu} f_B(m_i|\alpha, \beta, \kappa) \right)$$

Фон:  $m^\kappa e^{\alpha m + \beta m^2}$

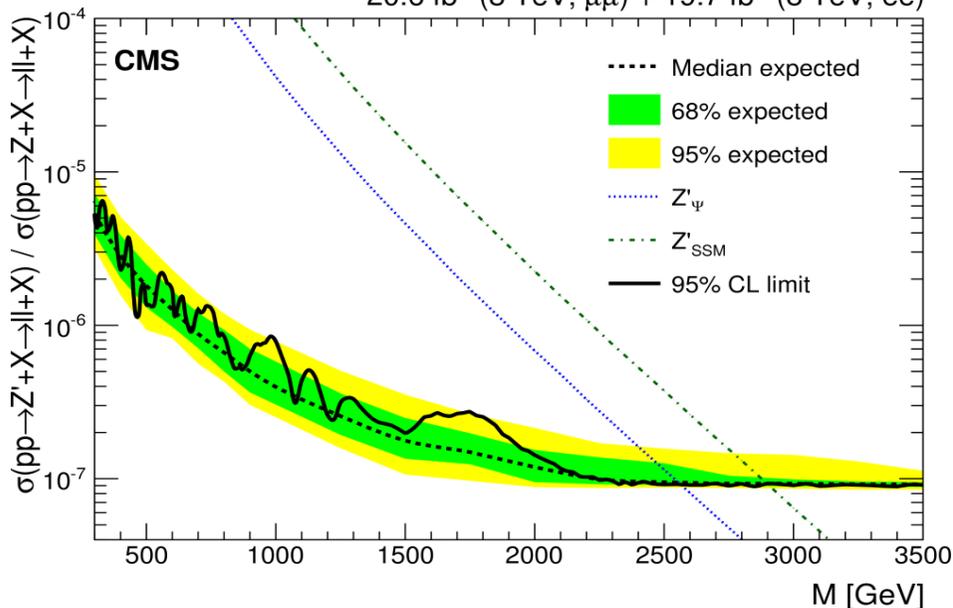
$$R_\sigma = \frac{\sigma(pp \rightarrow Z' + X \rightarrow ll + X)}{\sigma(pp \rightarrow Z + X \rightarrow ll + X)}$$

✓ С 95% CL исключены

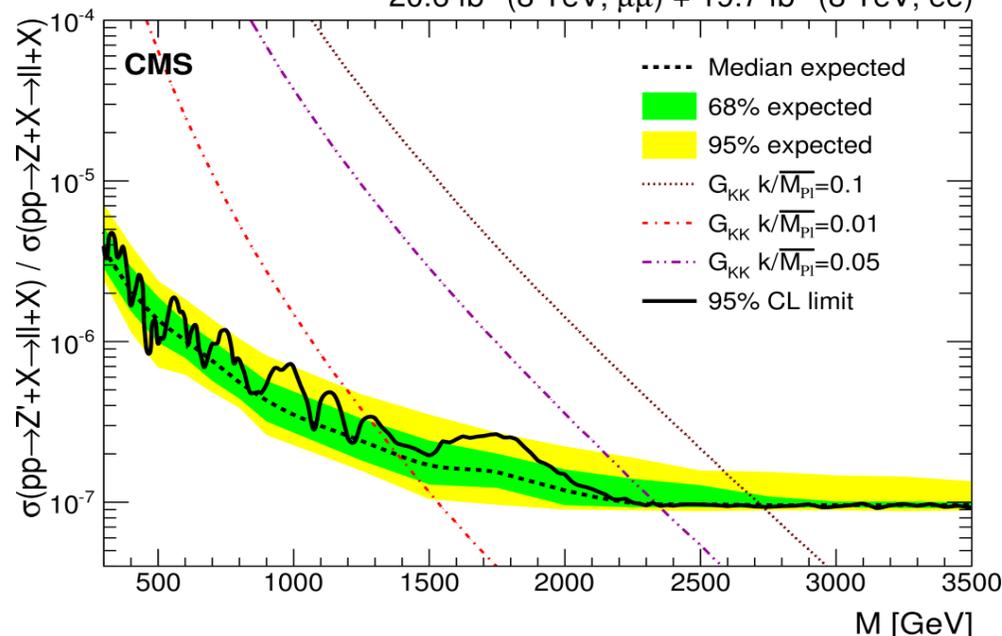
- $Z_{SSM}$  с массой менее 2.90 ТэВ
- $Z_\psi$  с массой менее 2.57 ТэВ

- $G_{KK}$  с массой менее 1.27 ТэВ ( $c=0.01$ )
- $G_{KK}$  с массой менее 2.73 ТэВ ( $c=0.1$ )

20.6 fb<sup>-1</sup> (8 TeV,  $\mu\mu$ ) + 19.7 fb<sup>-1</sup> (8 TeV,  $ee$ )



20.6 fb<sup>-1</sup> (8 TeV,  $\mu\mu$ ) + 19.7 fb<sup>-1</sup> (8 TeV,  $ee$ )



✓ Хорошо согласуются с результатами в канале с 2 фотонами

Массовые ограничения могут быть расширены на произвольную теоретическую модель (в приближении узкого резонанса)

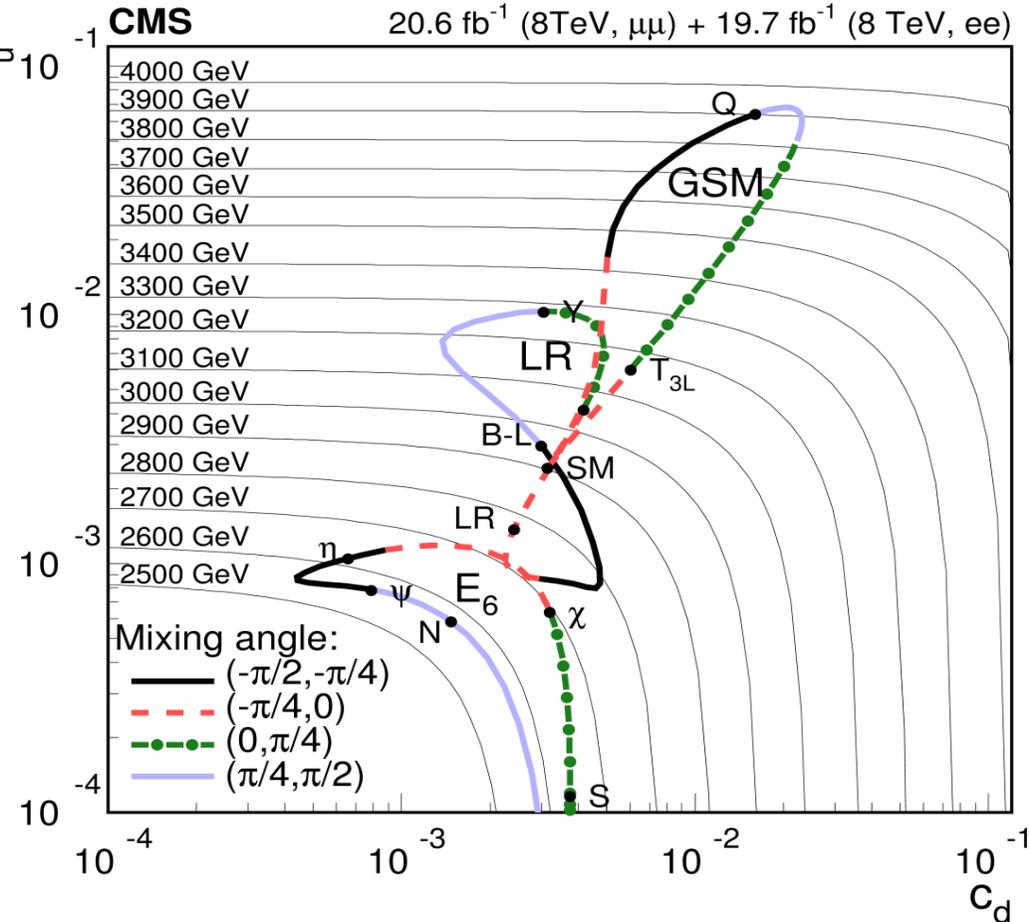
$$\sigma_{l+l^-} = \frac{\pi}{48s} [c_u w_u(s, M_V^2) + c_d w_d(s, M_V^2)], \quad \sigma \cdot 10^{-1}$$

$$c_u = \frac{g'^2}{2} (g_V^{u2} + g_A^{u2}) \mathcal{B}(l^+ l^-),$$

$$c_d = \frac{g'^2}{2} (g_V^{d2} + g_A^{d2}) \mathcal{B}(l^+ l^-).$$

Коэффициенты  $w_u$  и  $w_d$  содержат информацию о PDF и являются модельно-независимыми величинами

Представление в пространстве ( $w_u$  и  $w_d$ ) может также помочь в разделении моделей (в случае обнаружения сигнала)



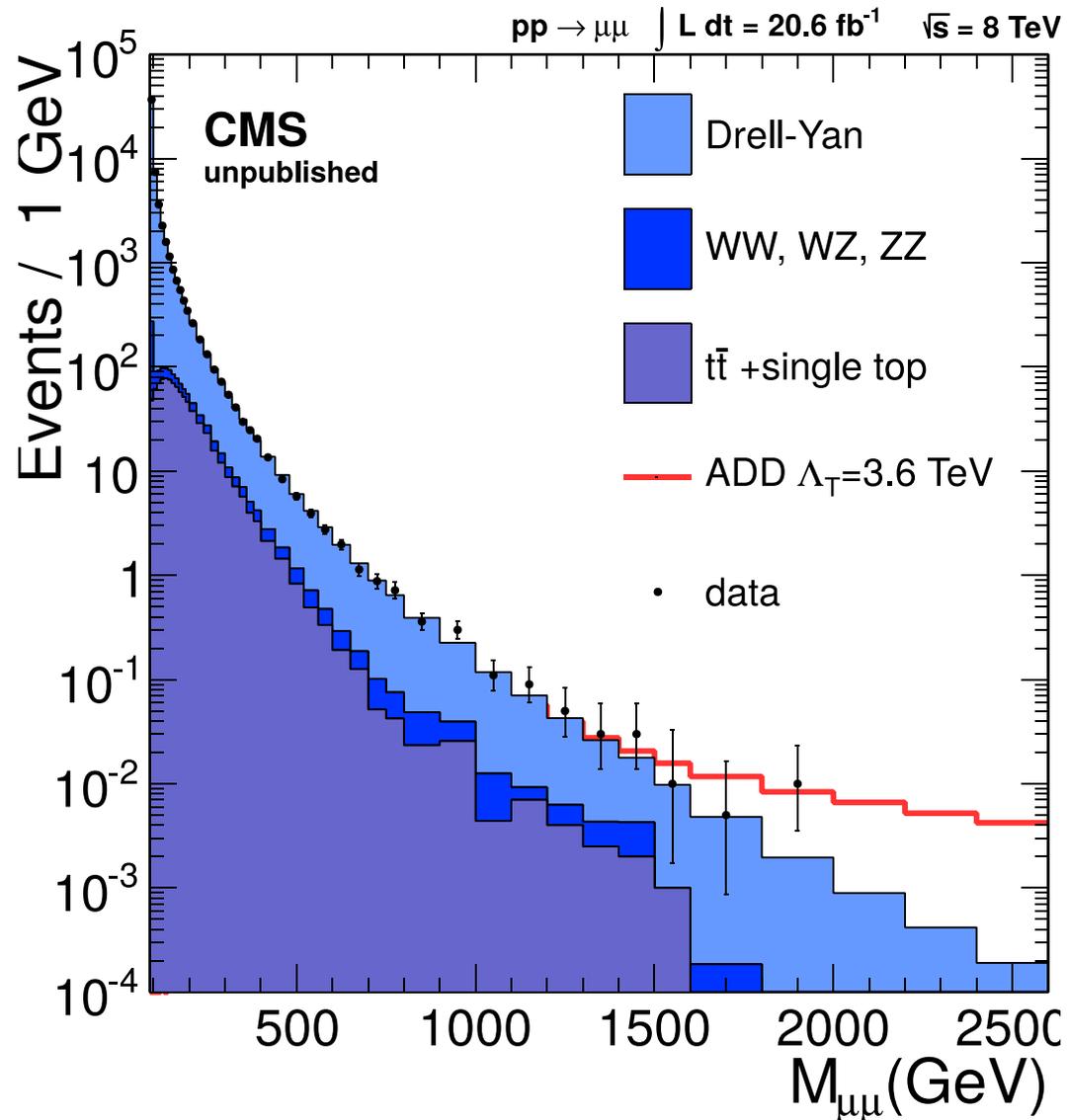
# Сравнение пределов

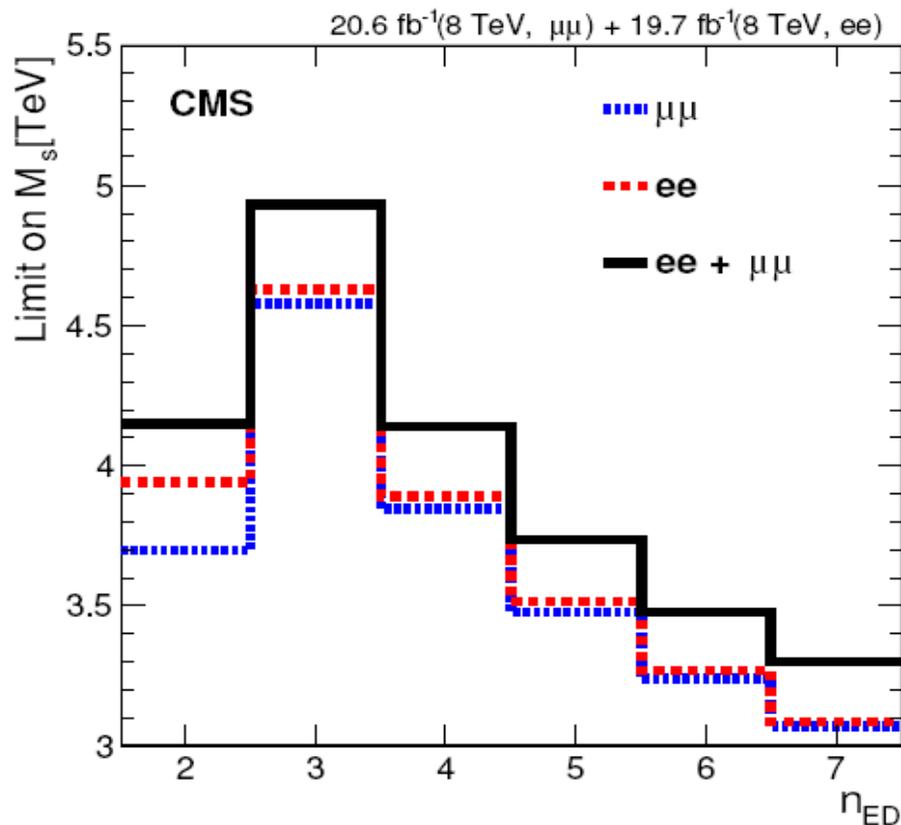
Таблица 6.36. Ограничения (95% C.L.) на массы резонансов (в ГэВ/ $c^2$ ).

Модель	Канал $\mu^+\mu^-$	Канал $e^+e^-$	Канал $\mu^+\mu^- \oplus e^+e^-$
$\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 20.6$ фбн $^{-1}$ [80, 48]			
$Z'_{SSM}$	2730	2670	2900
$Z'_{\psi}$	2390	2340	2570
RS1 гравитон ( $c = 0.10$ )	2560	2500	2730
RS1 гравитон ( $c = 0.05$ )	2120	2130	2350
RS1 гравитон ( $c = 0.01$ )	1130	1250	1270
$\sqrt{s} = 7$ и $8$ ТэВ, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5.3$ фбн $^{-1}$ (7 ТэВ) и $4.1$ фбн $^{-1}$ (8 ТэВ) [82]			
$Z'_{SSM}$	—	—	2590
$Z'_{\psi}$	—	—	2260
RS1 гравитон ( $c = 0.1$ )	—	—	2390
RS1 гравитон ( $c = 0.05$ )	—	—	2030
$\sqrt{s} = 7$ ТэВ, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5.3$ фбн $^{-1}$ [84]			
$Z'_{SSM}$	2150	2120	2330
$Z'_{\psi}$	1820	1810	2000
RS1 гравитон ( $c = 0.1$ )	1990	1960	2140
RS1 гравитон ( $c = 0.05$ )	1630	1640	1810

# Нерезонансные сигналы (ADD): спектр

JHEP 04 (2015) 025, arXiv:1412.6302





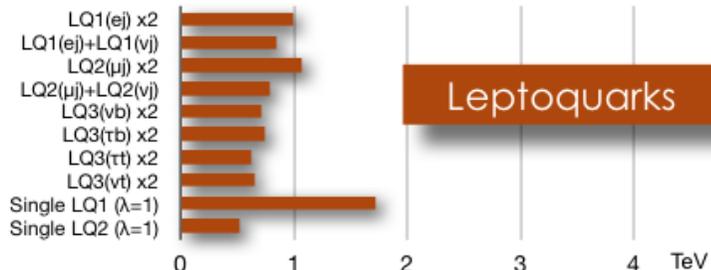
Множ. K	Предел	$\Lambda_T$ (GRV)	$M_S$ (HLZ)					
			$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
$\mu^+\mu^-, m_{\mu\mu} > 1.9$ ТэВ, $\sigma_s < 0.19$ фбн (0.19 фбн ожид.) при 95% CL								
1.0	Ожид.	3.71	3.46	4.42	3.71	3.36	3.12	2.95
1.3	Ожид.	3.84	3.69	4.57	3.84	3.47	3.23	3.06
1.0	Набл.	3.72	3.48	4.43	3.72	3.36	3.13	2.96
1.3	Набл.	3.85	3.70	4.58	3.85	3.48	3.24	3.07
$e^+e^-, m_{ee} > 1.8$ ТэВ, $\sigma_s < 0.18$ фбн (0.18 фбн ожид.) при 95% CL								
1.0	Ожид.	3.75	3.73	4.47	3.75	3.39	3.16	2.99
1.3	Ожид.	3.88	3.91	4.61	3.88	3.50	3.26	3.08
1.0	Набл.	3.77	3.75	4.48	3.77	3.40	3.17	3.00
1.3	Набл.	3.89	3.94	4.63	3.89	3.52	3.27	3.09
$\mu^+\mu^-$ и $e^+e^-, m_{ll} > 2.0$ ТэВ, $\sigma_s < 0.09$ фбн (0.10 фбн ожид.) при 95% CL								
1.0	Ожид.	3.99	3.88	4.74	3.99	3.60	3.35	2.17
1.3	Ожид.	4.13	3.13	4.91	4.13	3.73	3.47	3.28
1.0	Набл.	4.00	3.90	4.75	4.00	3.61	3.36	3.18
1.3	Набл.	4.14	4.15	4.93	4.14	3.74	3.48	3.30

95% CL пределы на фундаментальный масштаб гравитации в эффективной теории составляют (для различных схем перенормировки)

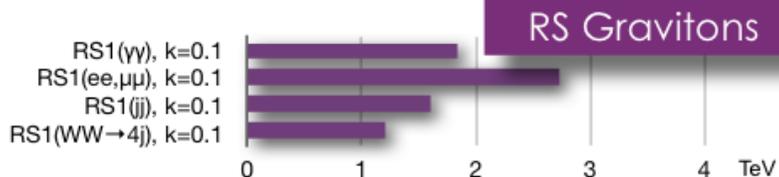
- ✓ для  $M_S$  от 4.9 до 3.3 ТэВ для  $n=3-7$
- ✓ для  $\Lambda_T - 4.1$  ТэВ

$$\Lambda_T^{-4} = \begin{cases} M_S^{-4} \log\left(\frac{M_S^2}{M_{\ell\ell}^2}\right), & n_{ED} = 2; \\ \frac{2}{n_{ED}-2} M_S^{-4}, & n_{ED} > 2, \end{cases}$$

# CMS Exotica Summary (95% C.L.)

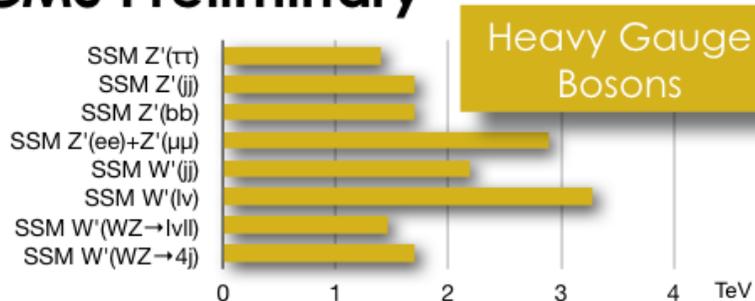


**Leptoquarks**

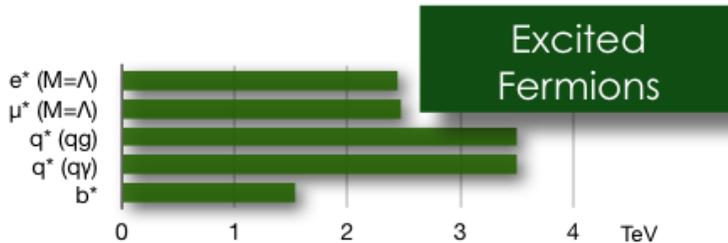


**RS Gravitons**

**CMS Preliminary**



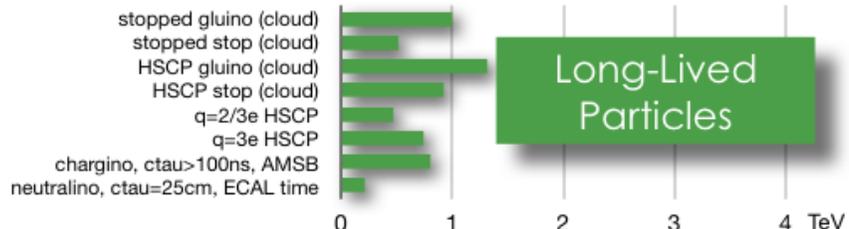
**Heavy Gauge Bosons**



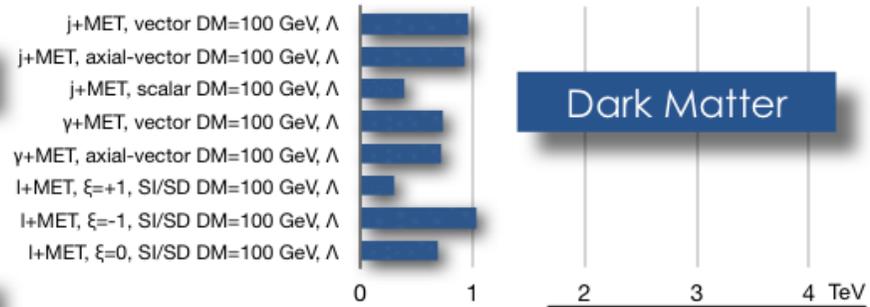
**Excited Fermions**



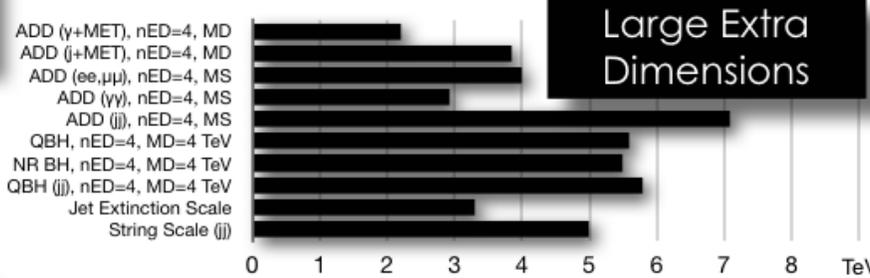
**Multijet Resonances**



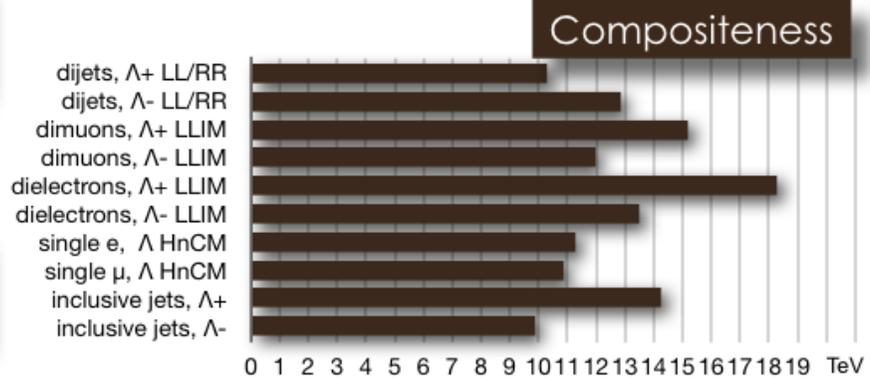
**Long-Lived Particles**



**Dark Matter**

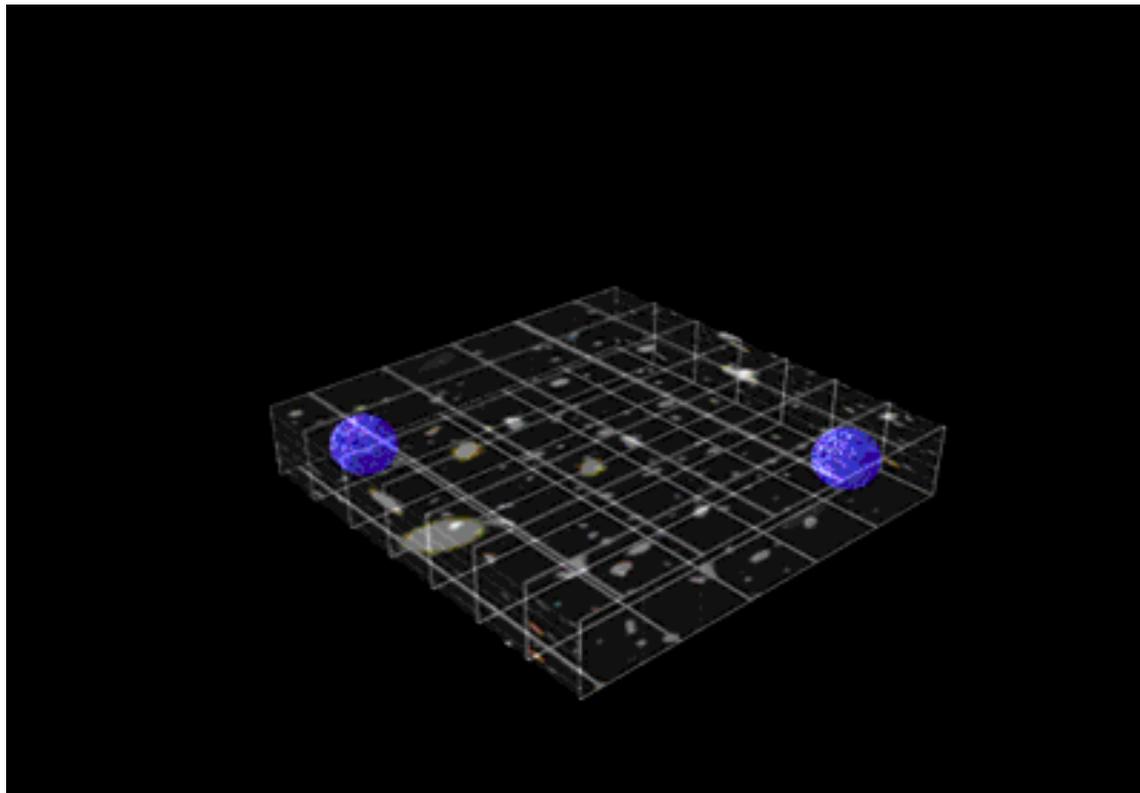


**Large Extra Dimensions**



**Compositeness**

# Результаты первого цикла работы LHC (2010-2012): поиск новой физики в канале множественного рождения струй



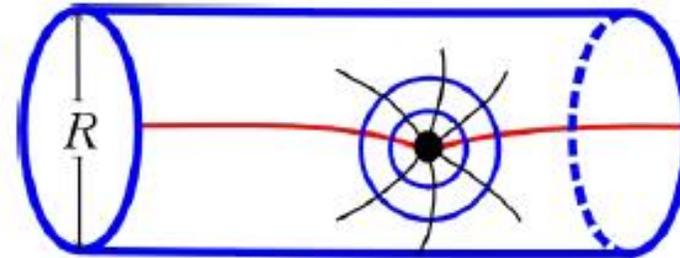
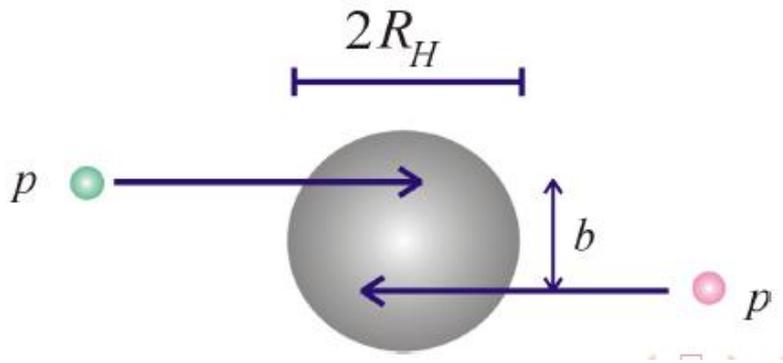
In large extra dimension models

- Gravity stronger at small distances
- Horizon radius larger
- For  $M \sim \text{TeV}$  it increases from  $10^{-38} \text{ fm}$  to  $10^{-4} \text{ fm}$

$$M_{\text{Pl}}^2 = 8\pi M_D^{n+2} r^n$$

$$r_S = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_D} \left[ \frac{M_{\text{BH}}}{M_D} \frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right]^{\frac{1}{n+1}}$$

For these BH  $R_h \ll R$  and they have approximately higher dimensional spherical symmetry



At the LHC partons can come closer than their Schwarzschild horizon



**Black Hole Production**

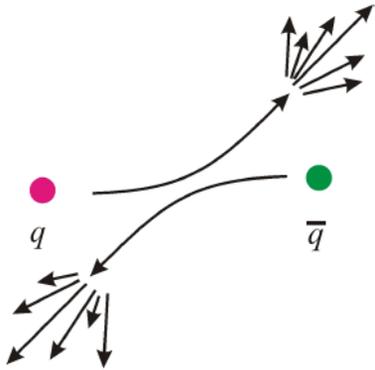
$$\sigma \sim \pi r_S^2$$

Разбиение ЧД и альтернативных объектов по классам, в соответствии с разной физикой явления и отличающейся постановкой экспериментов по обнаружению возможных сигналов

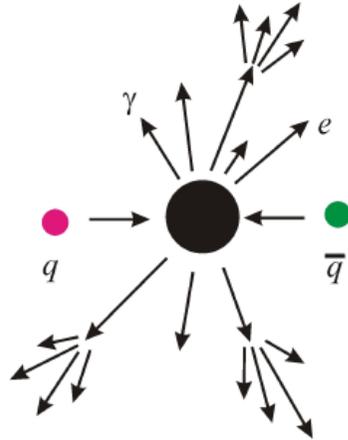
- «Нормальная» квазиклассическая ЧД, энергии хватает для соблюдения условия отхода достаточно далеко от фундаментального масштаба («хороший транспланковский режим»), ЧД с большой энтропией, термальный спектр
- Квантовая ЧД, рождение вблизи порога, малая энергия и энтропия, квазиклассическое описание неприменимо, усиление рождения двух- и трехструйных конфигураций с большими  $p_T$
- Струнный шар (промежуточное состояние в области между высокоэнергетичным рассеянием струн и областью рождения КЧД), фиксированная температура в процессе эволюции, иная форма спектров финальных частиц

Каждый возможный сценарий – предмет исследования и МС моделирования (проанализировано более 20 сценариев, почти 2000 точек в пространстве параметров )

## SM Process



## BH decay



- Multi-jet and hard leptons events
- High spherical
- High energy and  $p_T$

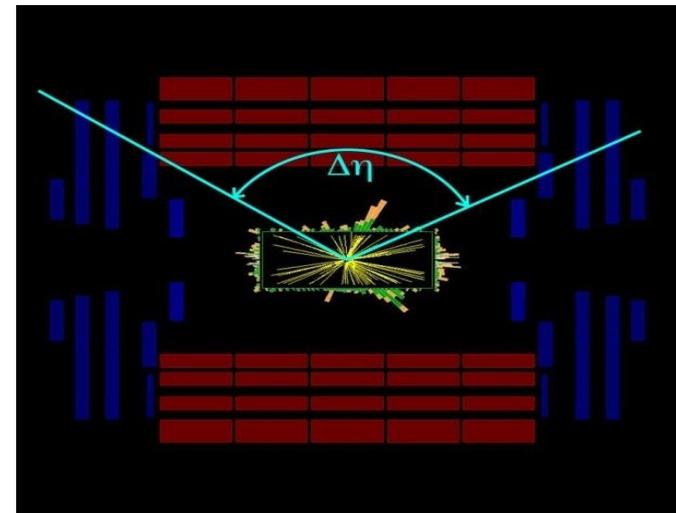
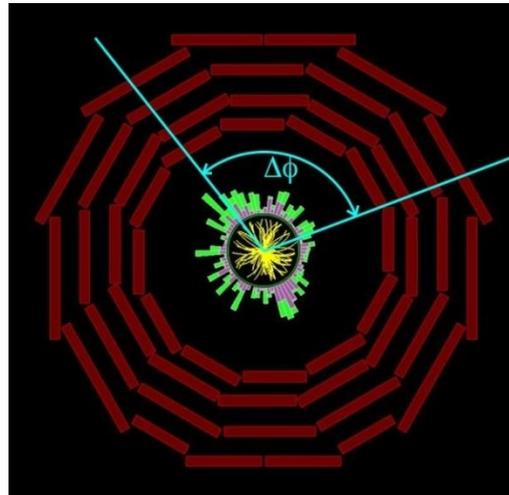


Experimental observables which are sensitive to these features

$$E_T = E \sin \theta$$

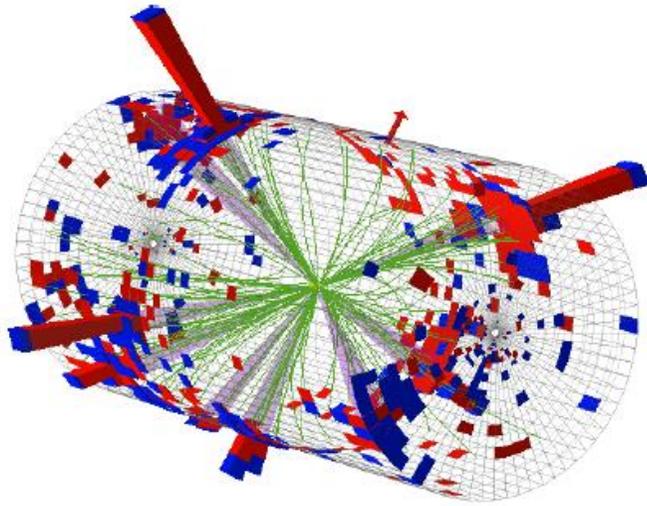
$$S_T = \sum_{i=1}^{N_{jet}} E_{T_i}$$

Jets, photons and leptons,  
 $E_T > 50 \text{ GeV}$   
 Missing  $E_T > 50 \text{ GeV}$





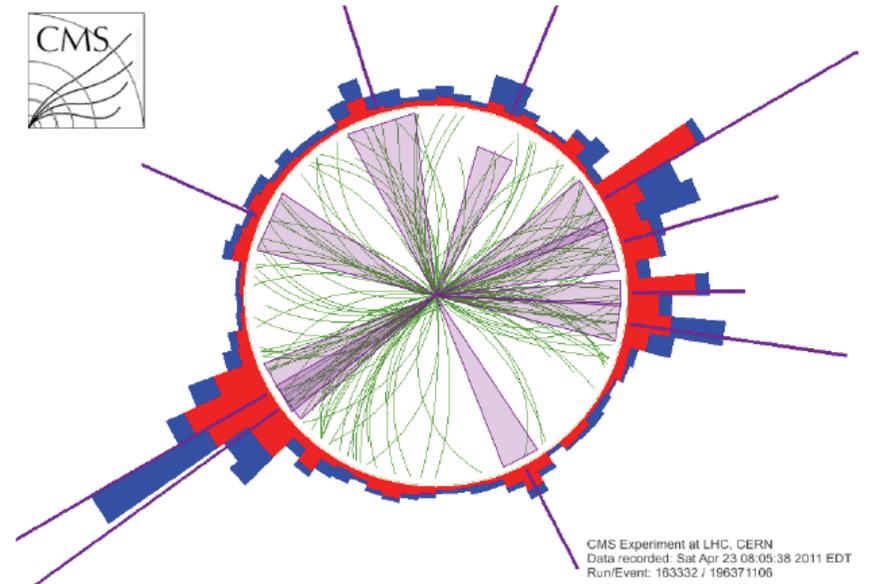
# Дисплей событий



CMS 3D real event visualisation,  
 $N = 9$  BH candidate

$S_T = 2.5$  TeV (Run 165567,  
Event 347495624)

CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 23 21:46:26 2011 EDT  
Run/Event: 165567 / 347495624  
Lumi section: 280  
Orbit/Crossing: 73255863 / 3161

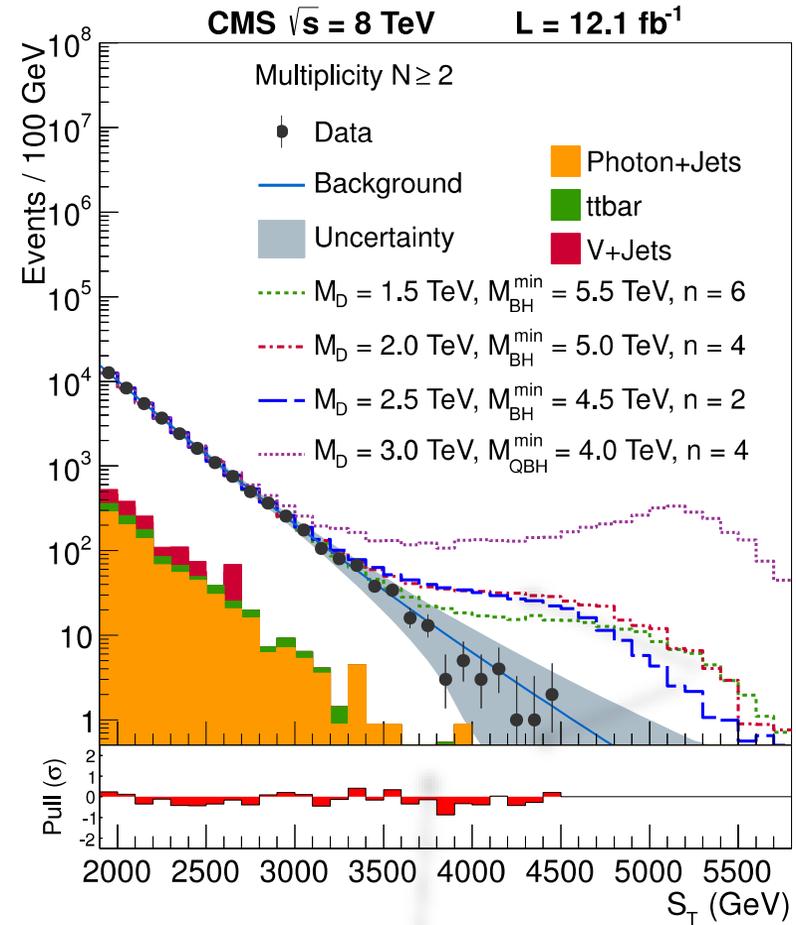
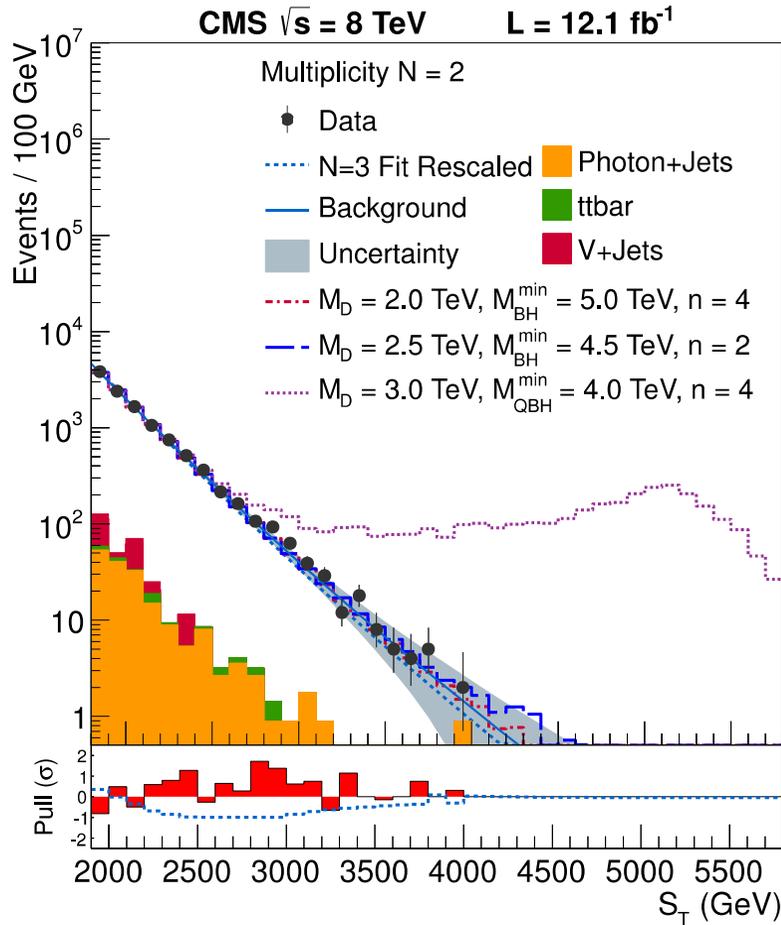


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sat Apr 23 08:05:38 2011 EDT  
Run/Event: 163332 / 196371106

CMS: the transverse view,  
 $N = 10$  BH candidate

$S_T = 1.1$  TeV (Run 163332,  
Event 196371106)

The CMS analysis 2012-2013, 12.1 fb<sup>-1</sup>:

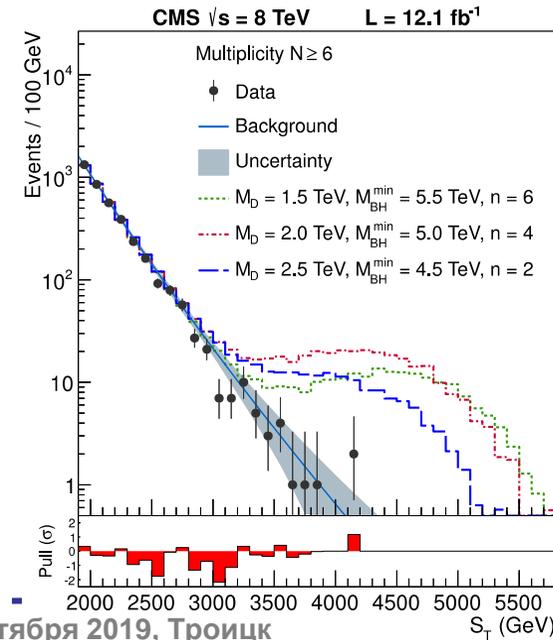
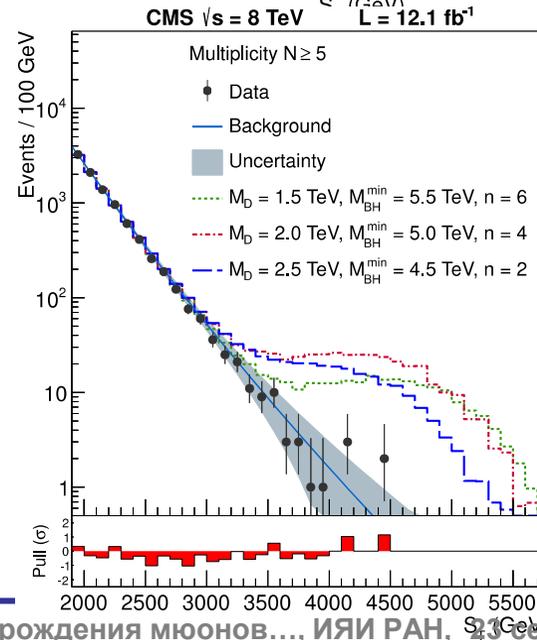
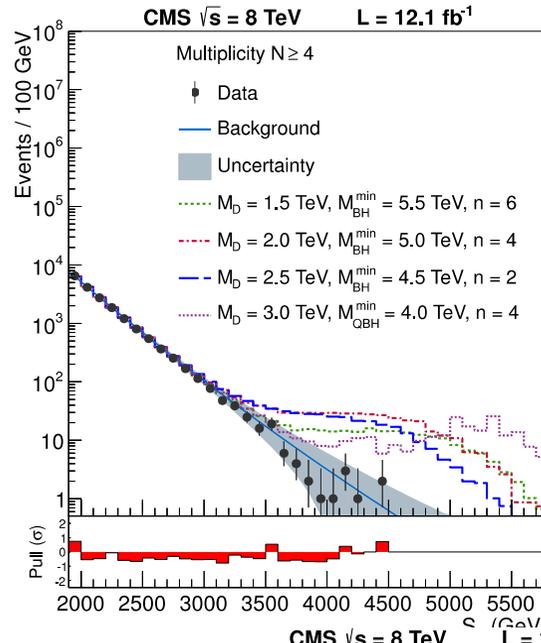
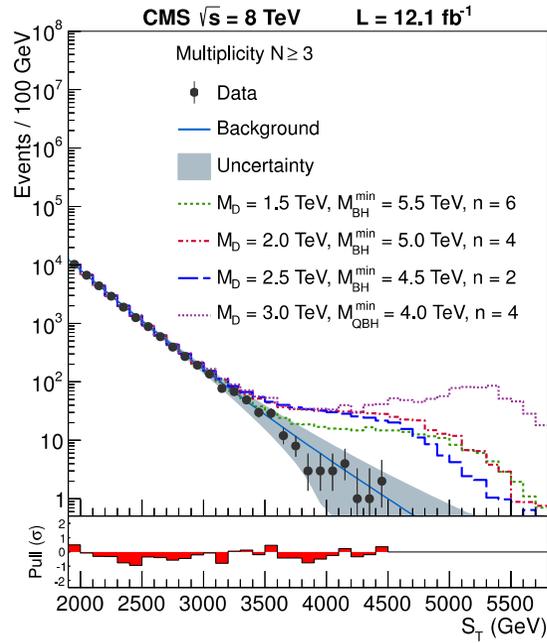


фон: контрольная область  $1.9 < S_T < 2.3$  ТэВ

# $S_T$ с N объектам в конечном состоянии (1)

JHEP 07 (2013) 178, arXiv:1303.5338

The CMS analysis 2012-2013,  
12.1 fb<sup>-1</sup>:



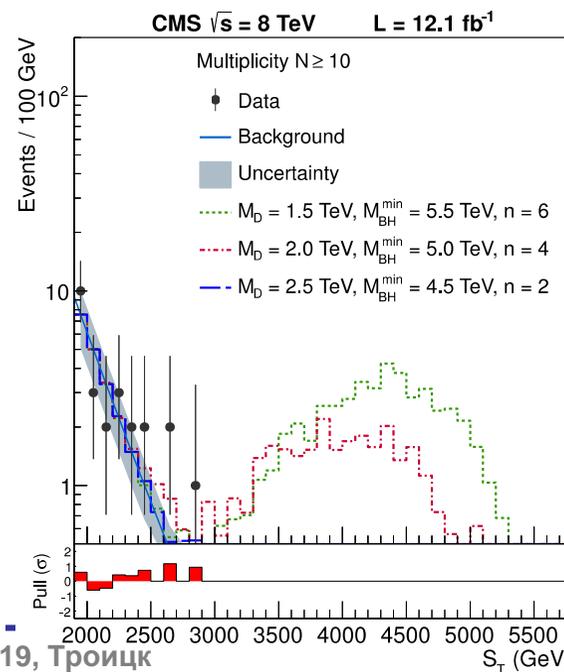
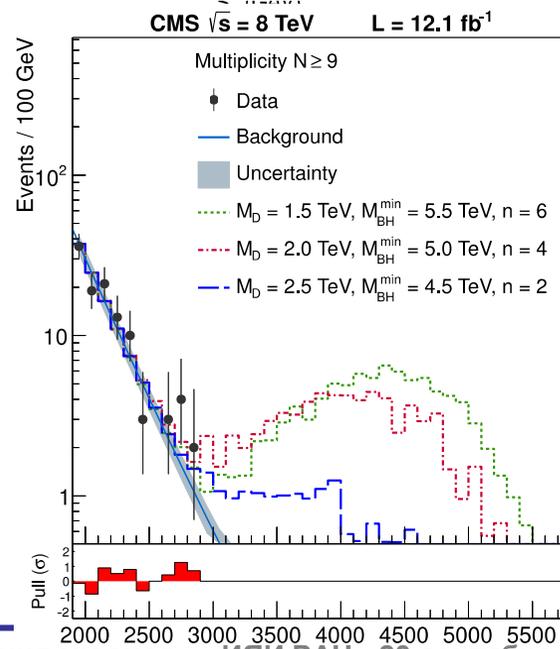
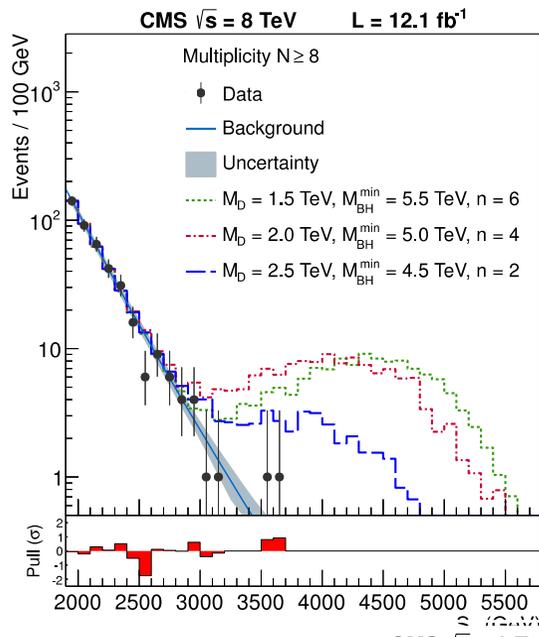
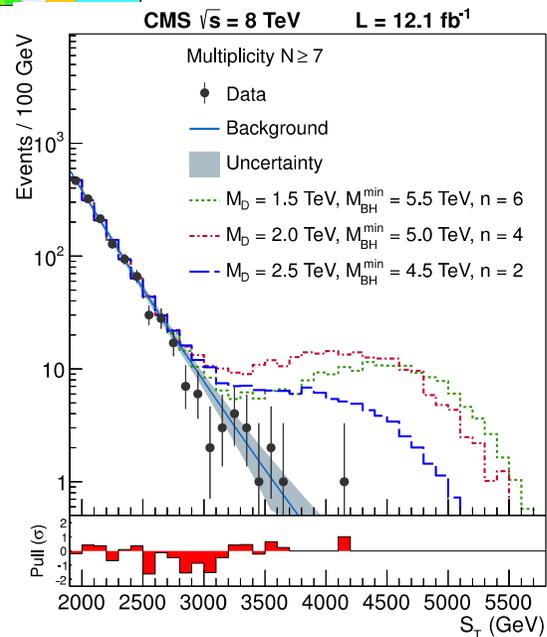


# $S_T$ с N объектам в конечном состоянии (2)



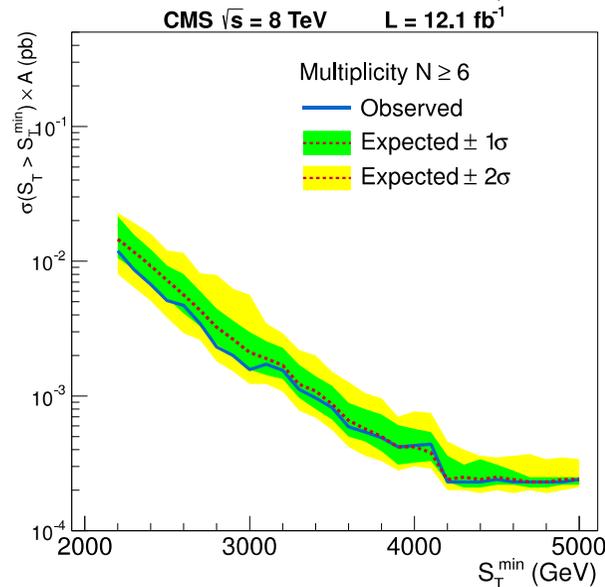
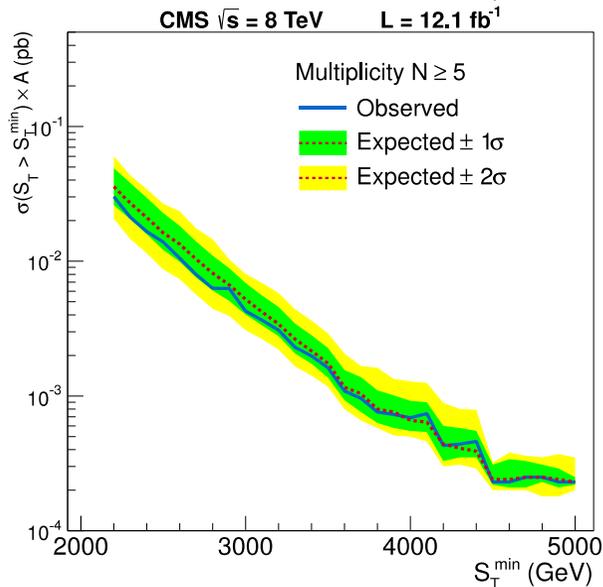
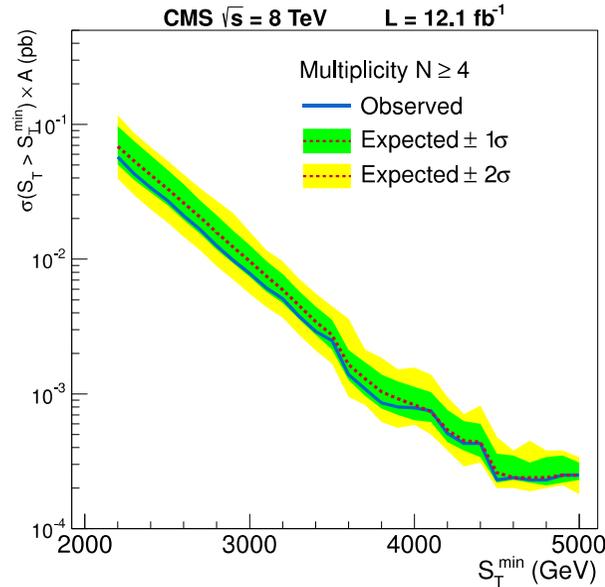
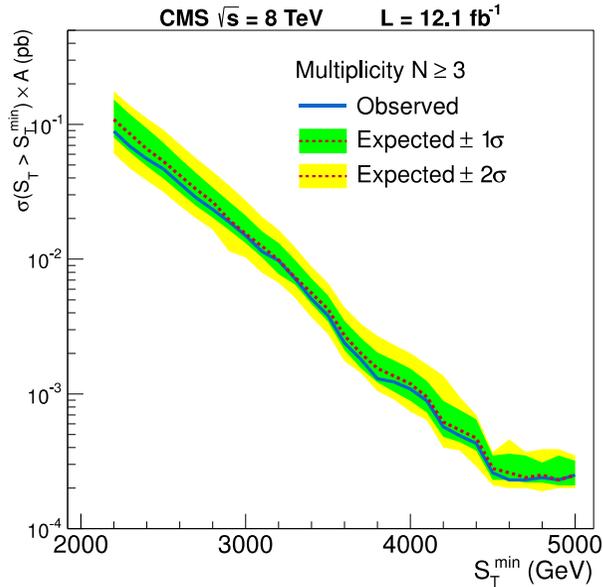
JHEP 07 (2013) 178, arXiv:1303.5338

The CMS analysis 2012-2013,  
12.1 fb<sup>-1</sup>:



# Модельно-независимые пределы на сечения многоструйных событий в СМ

JHEP 07 (2013) 178, arXiv:1303.5338



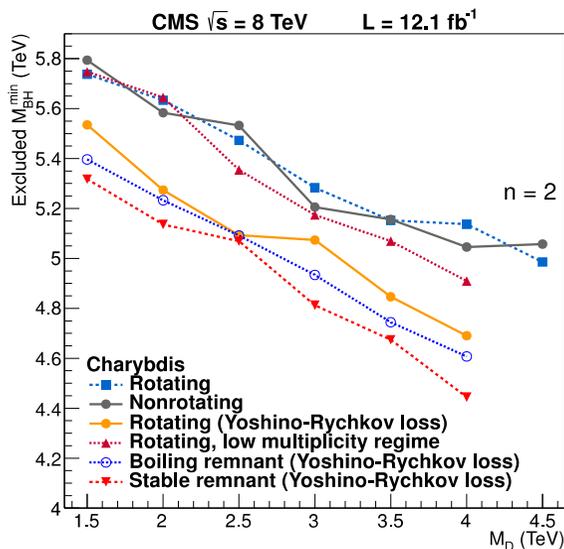
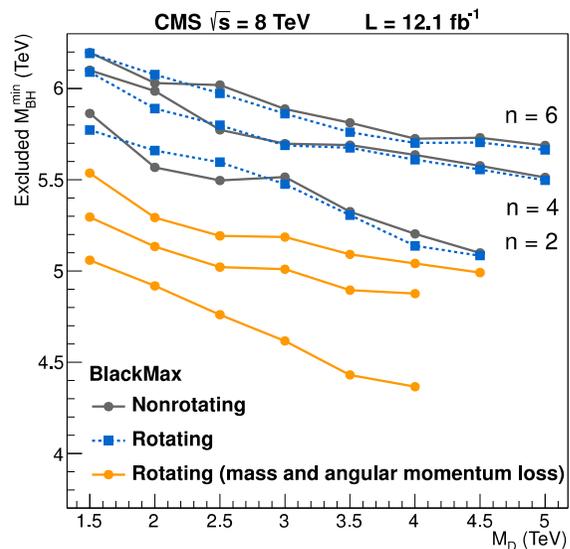


# Результаты поиска ЧД: пределы на модельные параметры

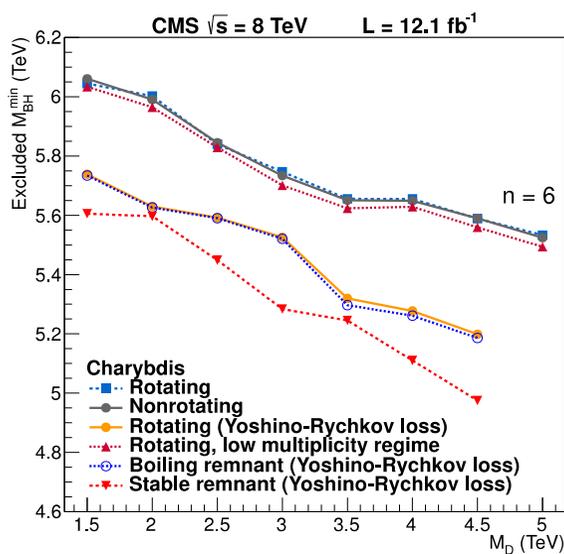
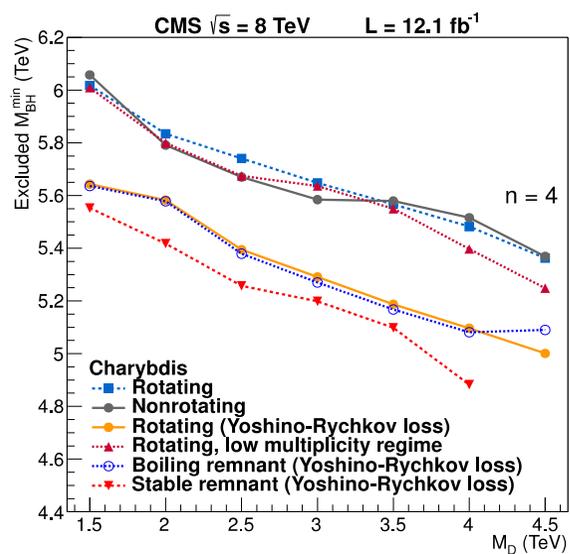
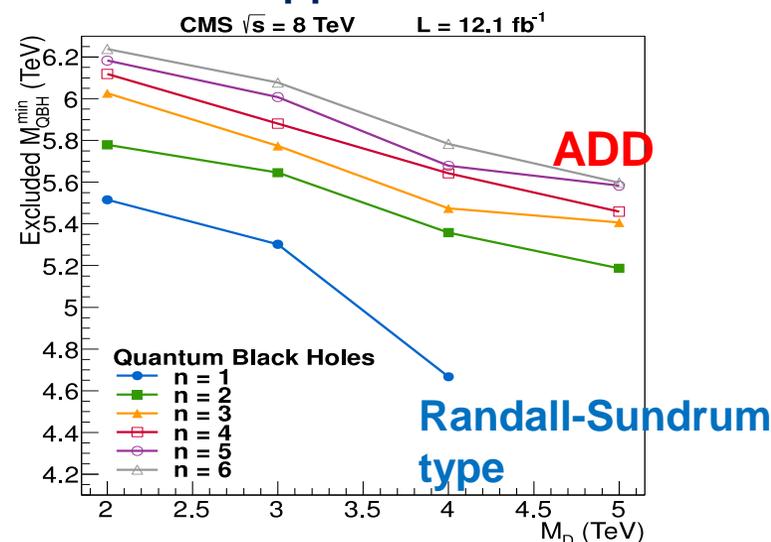


JHEP 07 (2013) 178, arXiv:1303.5338

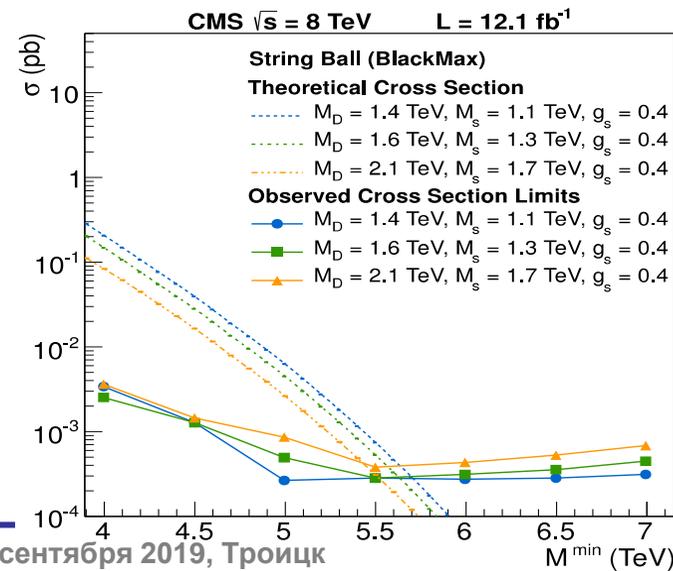
## Квазиклассические ЧД



## Квантовые ЧД

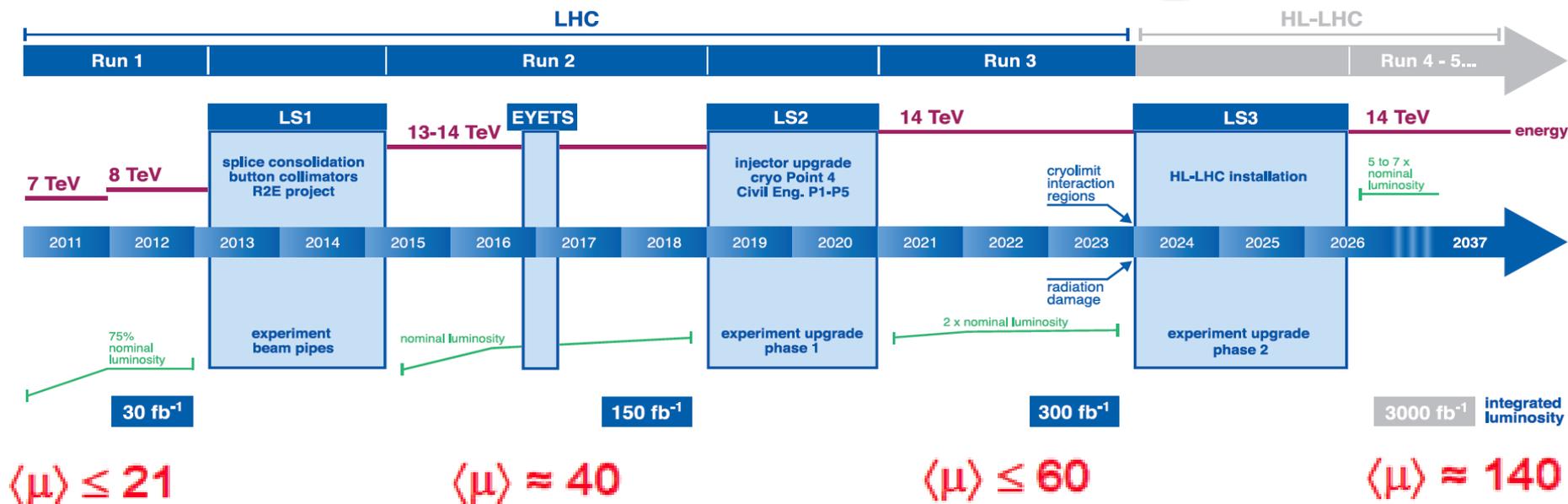


## Струнные шары



# Перспективы исследований

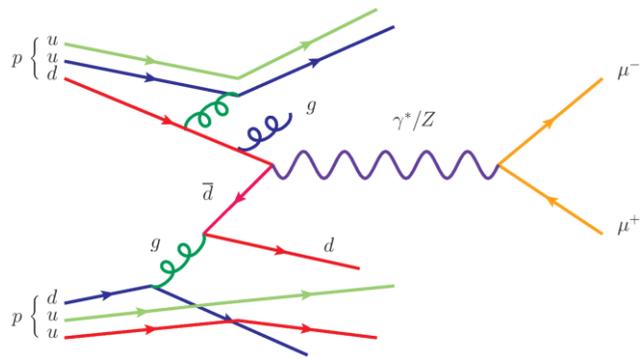
## LHC / HL-LHC Plan



$\langle \mu \rangle$  = average number of pile-up pp interactions per BC.

Start of run 2 parameters defined:  
13 TeV,  $\beta^* \leq 0.5$  m

Parameter	2010	2011	2012	design value
Beam energy	3.5	3.5	4	7
$\beta^*$ in IP 1 and 5 (m)	2.0/3.5	1.5/1.0	0.6	0.55
Bunch spacing (ns)	150	75/50	50	25
Max. number of bunches	368	1380	1380	2808
Max. bunch intensity (protons per bunch)	$1.2 \times 10^{11}$	$1.45 \times 10^{11}$	$1.7 \times 10^{11}$	$1.15 \times 10^{11}$
Normalized emittance at start of fill (mm mrad)	$\approx 2.0$	$\approx 2.4$	$\approx 2.5$	3.75
Peak luminosity (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	$2.1 \times 10^{32}$	$3.7 \times 10^{33}$	$7.7 \times 10^{33}$	$1 \times 10^{34}$
Max. mean number of events per bunch crossing	4	17	37	19
Stored beam energy (MJ)	$\approx 28$	$\approx 110$	$\approx 140$	362



Гипотеза факторизации

функция фрагментации

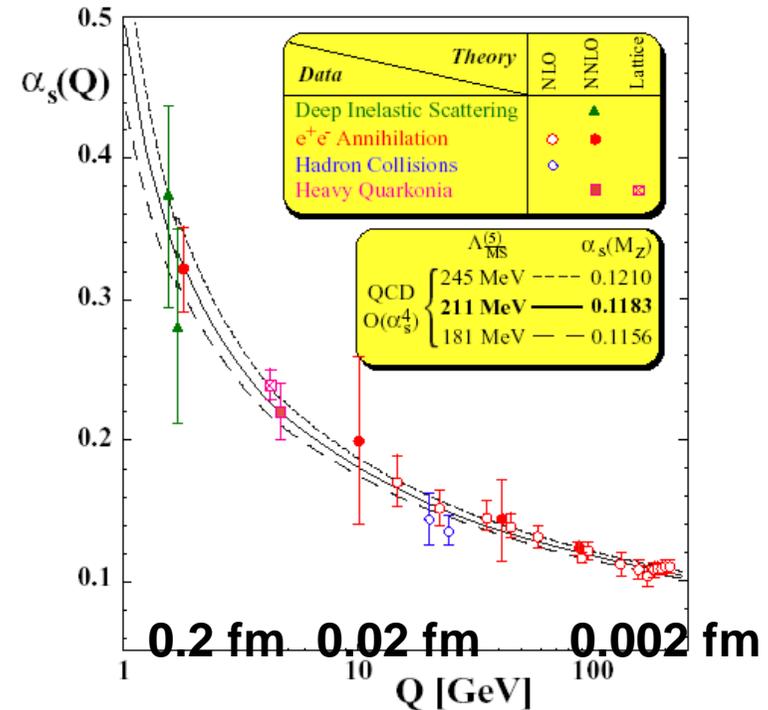
$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} \propto f_{a/A}(x_a, Q^2) \otimes f_{b/B}(x_b, Q^2) \otimes \frac{d\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd}}{dt} \otimes D_{h/c}(z_c, Q^2)$$

партонные функции  
распределения (PDFs)

сечение жесткого  
рассеяния

Что мы не можем точно посчитать?

- ❑ Сечение жесткого процесса в высших порядках КХД (K-factor + излучение в начальном/конечном состоянии)
- ❑ PDF – фит экспериментальных данных + уравнения эволюции
- ❑ Константа взаимодействия - фит экспериментальных данных + уравнения эволюции
- ❑ Функция фрагментации - фит экспериментальных данных



Письма в ЭЧАЯ 11 №6, 1122 (2014), ЯФ 79 №1, 50 (2016)

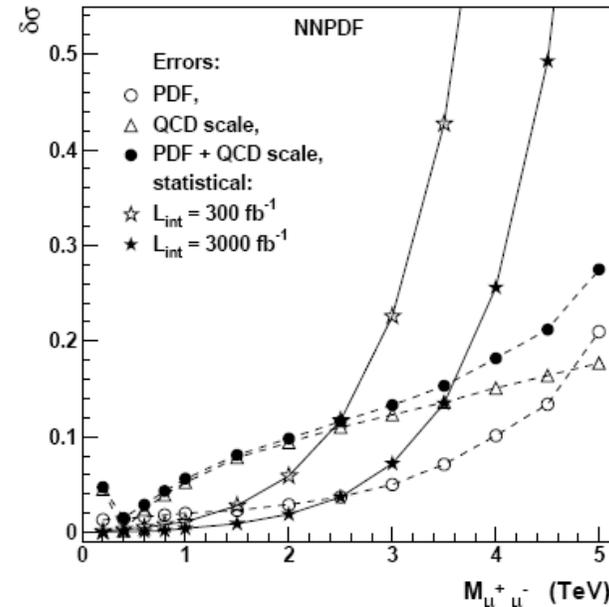
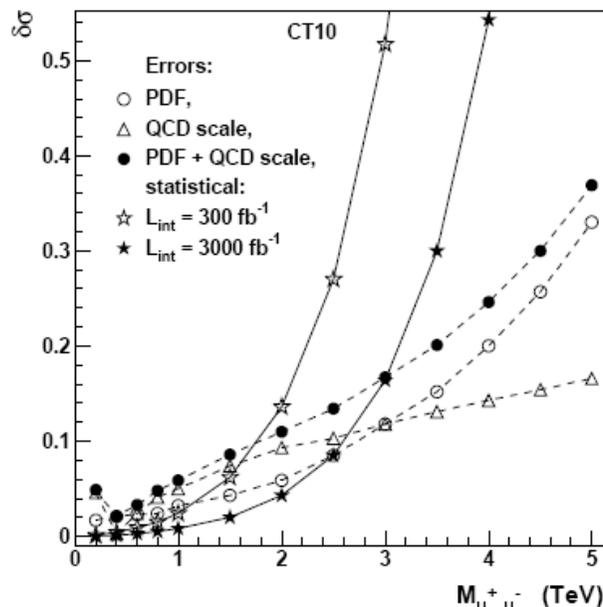
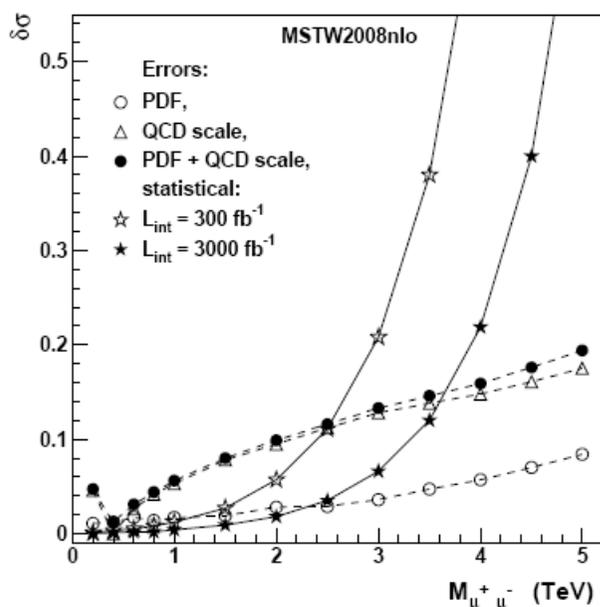
Set CTEQ (90% C.L.) and MSTW (68% C.L.)

- структурные функции (PDF)
  - ✓ использование различных “семейств”
  - ✓ ошибки глобального фита
- выбор масштаба жестких взаимодействий ( $Q^2$ )
- КОНСТАНТА СВЯЗИ

$$\Delta X_+^{PDF} = \sqrt{\sum_{k=1}^d \max^2 [(X_k^+ - X_0), (X_k^- - X_0), 0]}$$

$$\Delta X_-^{PDF} = \sqrt{\sum_{k=1}^d \max^2 [(X_0 - X_k^+), (X_0 - X_k^-), 0]}$$

For comparison normalization factor  $C_{90}=1.645$



Set NNPDF

$$X_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N=308} X^{(i)}$$

$$\Delta X_{PDF} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X^{(i)} - X_0)^2}$$

Теор. ошибки доминируют в области масс до 1.8-2.5 ТэВ и 3-3.5 ТэВ для 300 фбн<sup>-1</sup> и 3000 фбн<sup>-1</sup> соответственно

Разница в вычислениях сечений с помощью разных наборов PDF (CTEQ6, MRST2001, Fermi2002, Botje, Alekhin, ..., ~20 sets) - до 7%

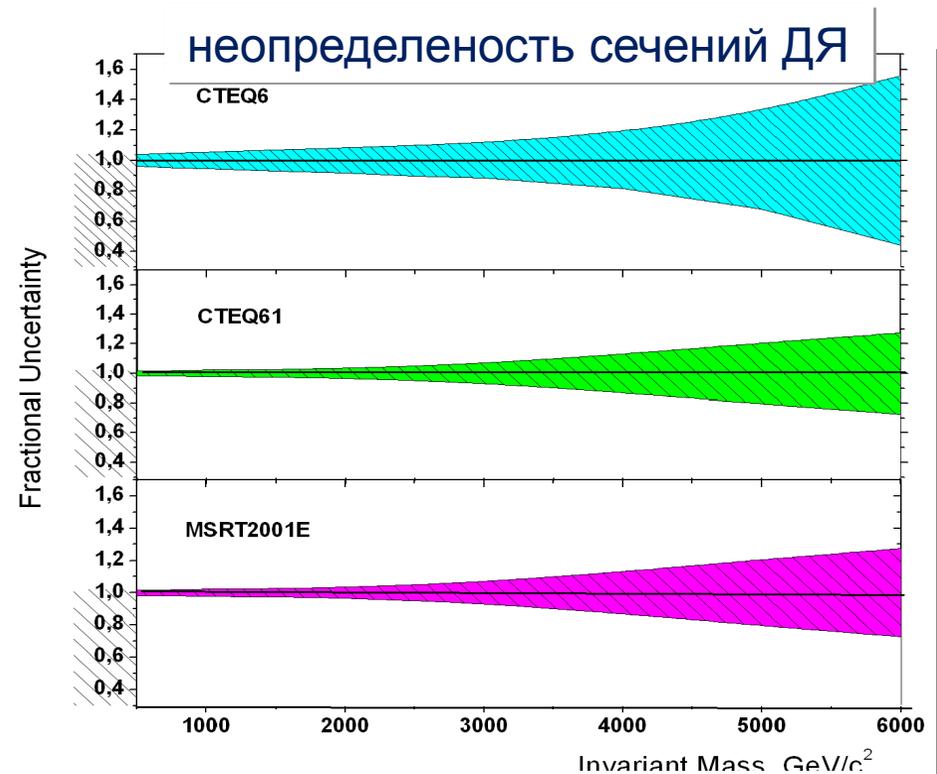
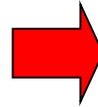
Неопределенность в вычислении эффективности акцептанса - 0.5%

Библиотека LHAPDF позволяет вычислить "внутренние" ошибки для одного набора

- Статистические и систематические ошибки измерений
- Систематические ошибки стат.методов
- Теоретические неопределенности (эволюция DGLAP, КХД поправки, поправки на A-зависимость)
- Неопределенности параметризации в области малых  $Q^2$  (non-perturbative pdf's) – выбор  $Q_0$  для начала эволюции

$$\Delta X = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{k=1}^d D_k^2} \quad D_k = X_{2k} - X_{2k-1} \quad (k = 1-d)$$

$$\Delta X_C = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{k=1}^{2d} R_k^2} \quad R_k = X_k - X_0 \quad (k = 1-2d)$$



$X_0$  – сечение, вычисленное с использованием “лучшего” фита  
 $X_k$  – сечение, вычисленное для k-го подсета, всего 40 наборов PDF's для индивидуальных параметров глобального фита ( $\pm$  для каждого параметра)

## Теория:

- QCD и EW поправки высших порядков (K factors)
- Структурные функции (PDF)
- Выбор масштаба жестких взаимодействий ( $Q^2$ )

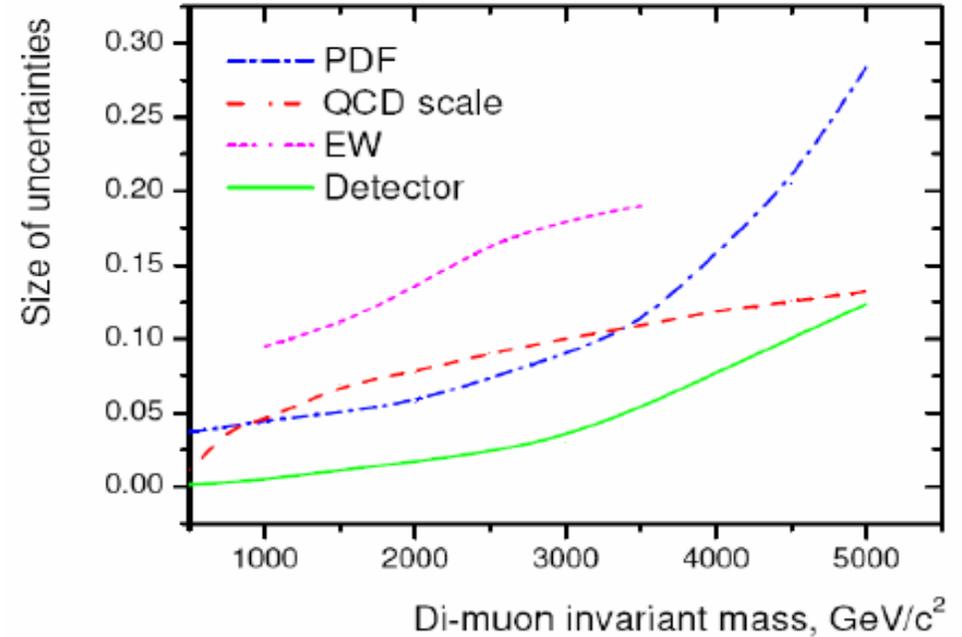
## Измерения

- Невыравненность детекторов
- Магнитное поле
- Наложение событий (pile-up)
- Ошибки триггера и реконструкции
- Неопределенности фонов (формы спектра)

Статистические ошибки превышают ошибки, связанные с неточностью и неэффективностью детектора



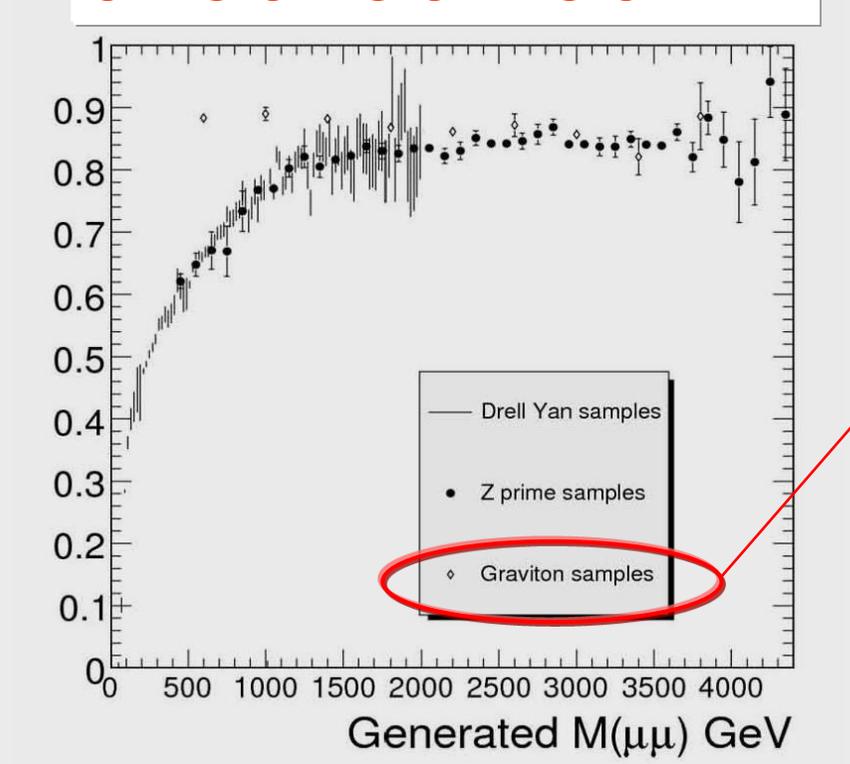
## Systematic errors



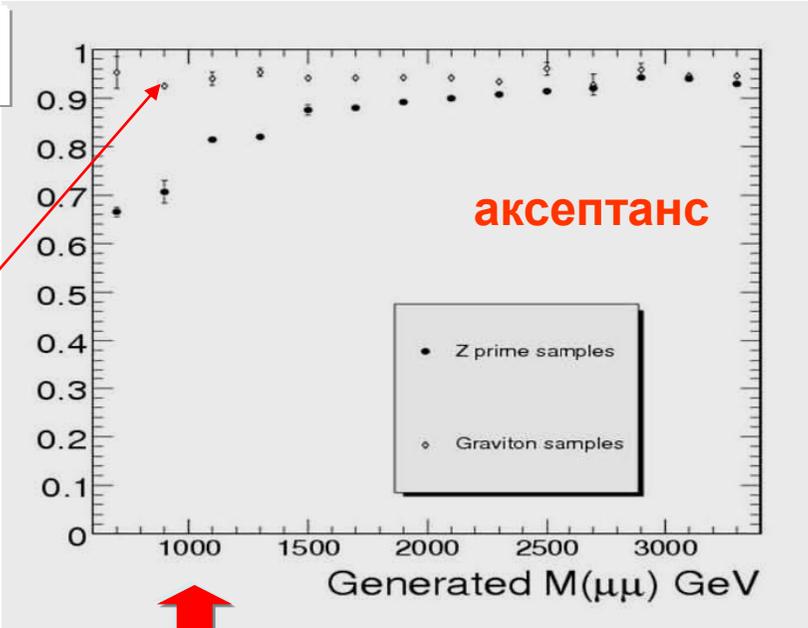
*I. Belotelov et al.  
CMS PTDR, Vol.II (2006)*

$M_{\mu^+\mu^-}$ , TeV/c <sup>2</sup>	Detector smearing	Statistical 1 fb <sup>-1</sup>	Statistical 10 fb <sup>-1</sup>	Statistical 100 fb <sup>-1</sup>	Theor. Syst.
≥ 0.2	$8 \cdot 10^{-4}$	0.025	0.008	0.0026	0.058
≥ 0.5	0.0014	0.11	0.035	0.011	0.037
≥ 1.0	0.0049	0.37	0.11	0.037	0.063
≥ 2.0	0.017		0.56	0.18	0.097
≥ 3.0	0.029			0.64	0.134

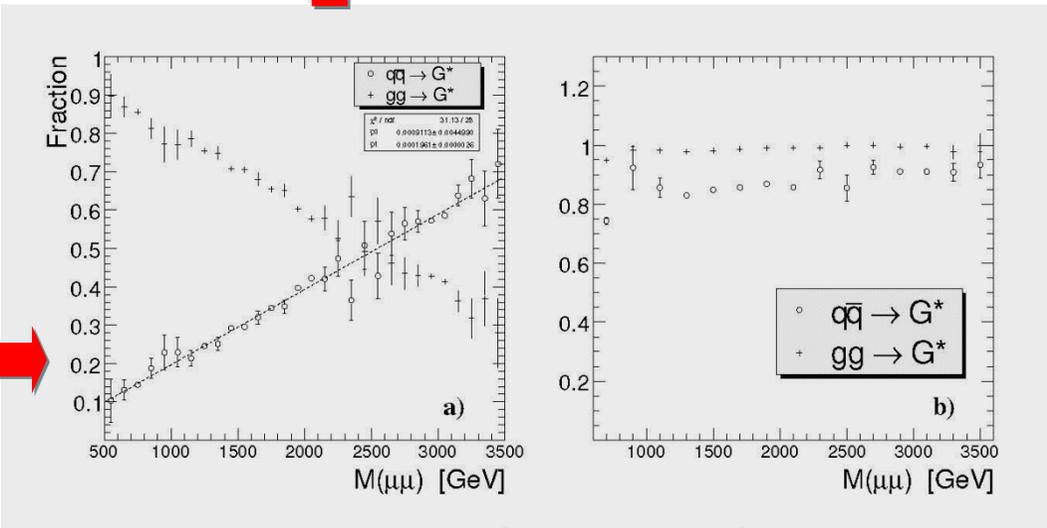
$\epsilon_{acc} \otimes \epsilon_{L1} \otimes \epsilon_{HLT} \otimes \epsilon_{offline}$



$\epsilon_{acc}$



Различное поведение эффективности в области меньших масс обусловлено различными механизмами рождения  $G^*$  и  $Z'(DY)$



## Virtual graviton production

- ☐ two muons in the final state
- ☐ PYTHIA + CTEQ6L, LO + K=1.3
- ☐ Full (GEANT-4) simulation/reco + L1 + HLT
- ☐ Theoretical uncert. (QCD  $\Delta K$ : 0.05 %, EWK: 9÷13.5%, QCD-scale: 4.8-7.7%, PDF: 5.6-6.8%)
- ☐ Misalignment, trigger and off-line reco inefficiency, acceptance due to PDF

## The “counting” estimator for significance:

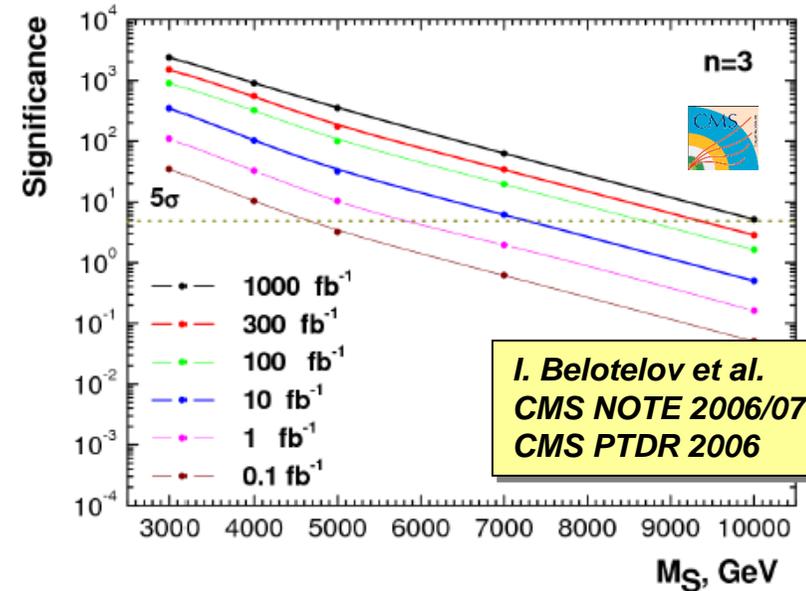
$$S_{c12} = 2 \times \left( \sqrt{N_S + N_B} - \sqrt{N_S} \right)$$

$$S_{eL} = \sqrt{2((N_S + N_B) \ln(1 + N_B/N_S) - N_S)}$$

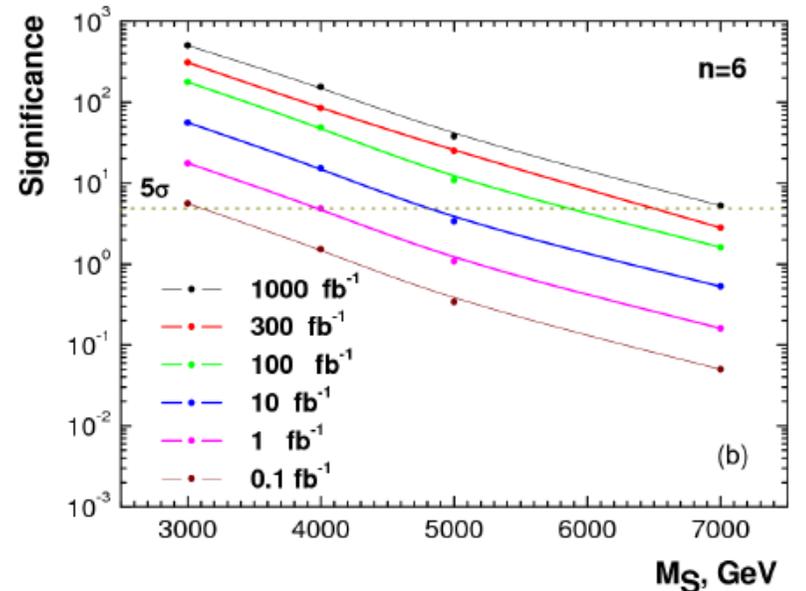
$N_S$  – number of signal events,  $N_B$  – number of bck. events

Ambiguity due to different estimators is 2-40%  $\Rightarrow$

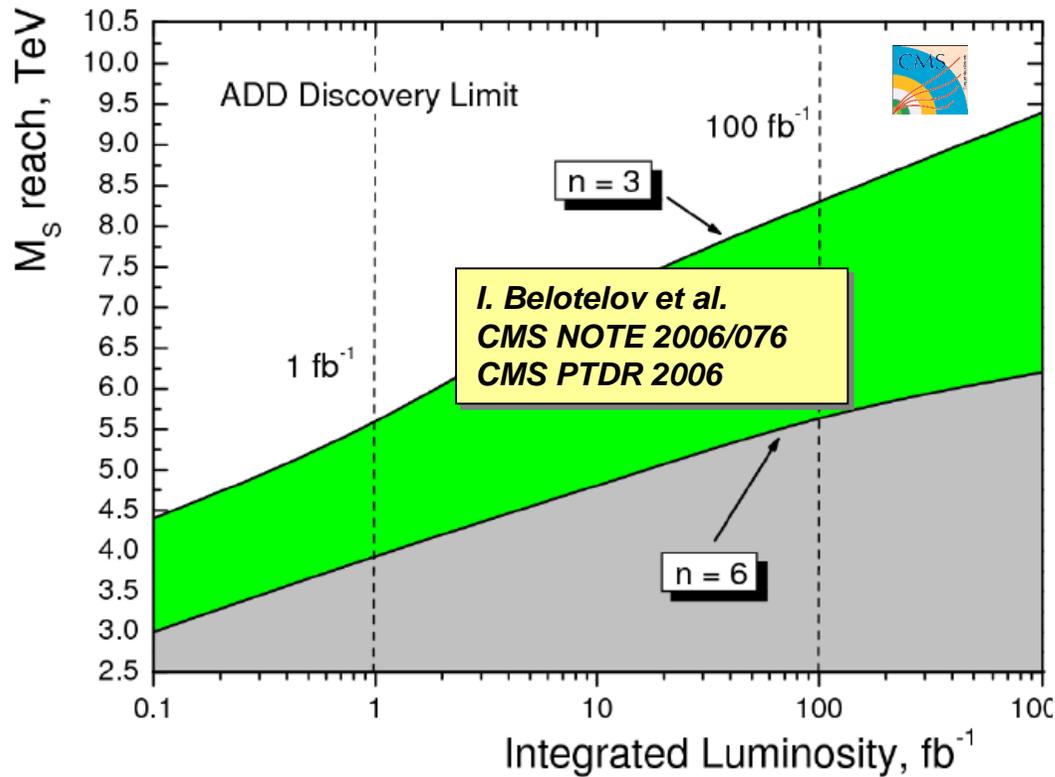
$M_S$  reach up 8.6% depending on S/B



*I. Belotelov et al.  
CMS NOTE 2006/076  
CMS PTDR 2006*

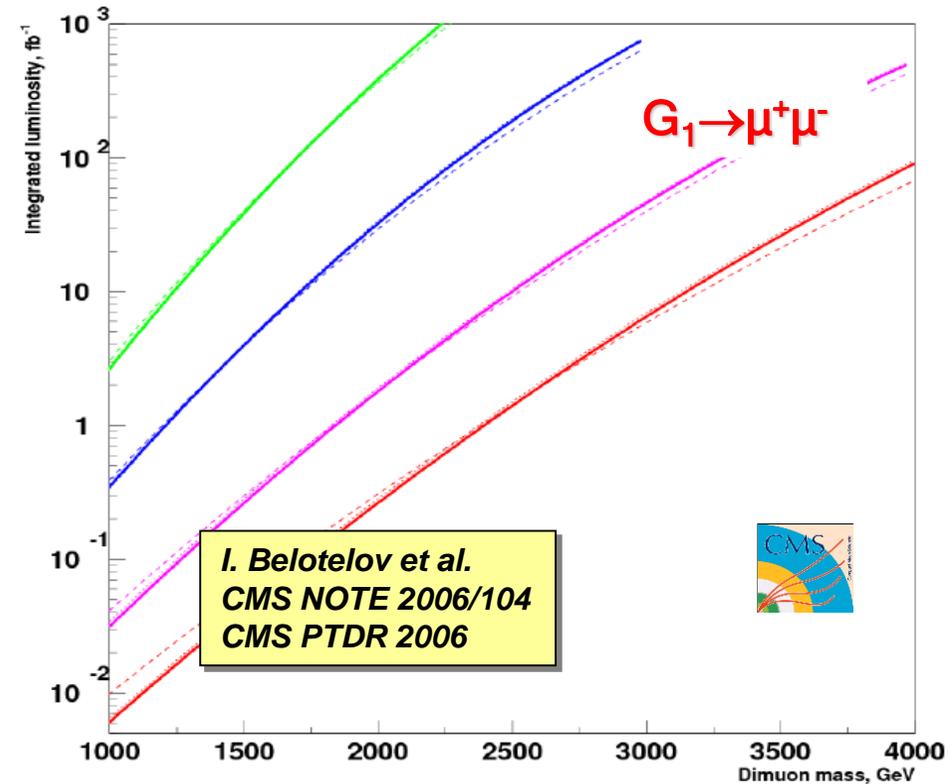


(b)



$M_S, \Gamma_{\text{эВ}}$	3000	4000	5000	7000	10000
$n = 3$					
$1 \text{ фбН}^{-1}$	69	22	7.7	1.7	—
$10 \text{ фбН}^{-1}$	219	68	24	5.2	0.5
$100 \text{ фбН}^{-1}$	694	215	78	16.6	1.6
$300 \text{ фбН}^{-1}$	1201	373	133	29	2.8
$1000 \text{ фбН}^{-1}$	2193	680	243	52	5.0
$n = 6$					
$1 \text{ фбН}^{-1}$	14	4.1	1.0	0.16	—
$10 \text{ фбН}^{-1}$	44	13	3.2	0.51	—
$100 \text{ фбН}^{-1}$	141	41	10	1.6	—
$300 \text{ фбН}^{-1}$	243	70	18	2.82	—
$1000 \text{ фбН}^{-1}$	445	129	32	5.1	3.4

- ❑ two muons/electrons in the final state
- ❑ Bckg: Drell-Yan/ZZ/WW/ZW/ttbar
- ❑ PYTHIA/CTEQ6L
- ❑ LO + K=1.30 both for signal and DY
- ❑ Full (GEANT-4) simulation/reco
- ❑ Viable L1 + HLT(trigger) cuts
- ❑ Theoretical uncert. (QCD  $\Delta K$ : 0.05 %, EWK: ~10%, QCD-scale: 11-17%, PDF: 10-46%)
- ❑ Misalignment, trigger and off-line reco inefficiency, pile-up, acceptance due to PDF

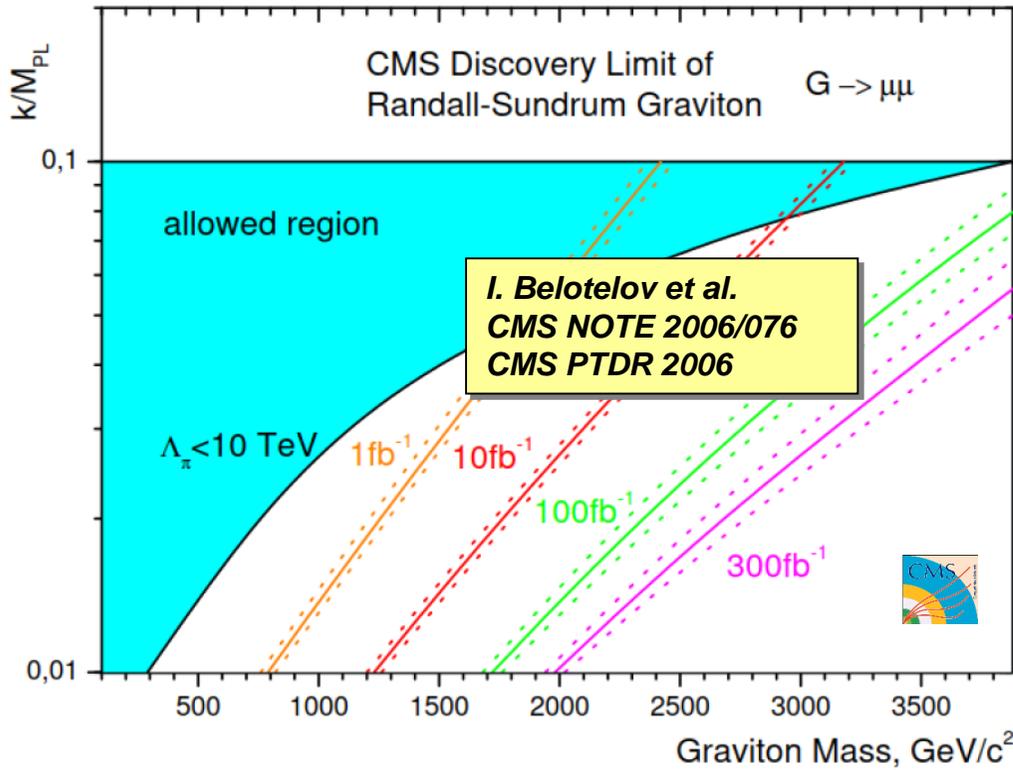


The binned maximum-likelihood fitting:

$$S_L = \sqrt{2 \ln(\mathcal{L}_{s+b}/\mathcal{L}_b)}$$

in a good agreement with counting methods

Константа $c$	Метод оценки стат. значимости	1 фбн <sup>-1</sup>	10 фбн <sup>-1</sup>	100 фбн <sup>-1</sup>	300 фбн <sup>-1</sup>
0.01	$S_{cP}$	0.75	1.20	1.69	1.95
	$S_{cL}$	0.77	1.21	1.71	1.97
	$S_L$	0.78	1.23	1.73	1.99
0.02	$S_{cP}$	1.21	1.72	2.30	2.63
	$S_{cL}$	1.22	1.72	2.31	2.64
	$S_L$	1.22	1.74	2.34	2.68
0.05	$S_{cP}$	1.83	2.48	3.24	3.67
	$S_{cL}$	1.85	2.49	3.26	3.71
	$S_L$	1.85	2.51	3.31	3.79
0.1	$S_{cP}$	2.34	3.11	4.12	4.52
	$S_{cL}$	2.36	3.13	4.14	4.54
	$S_L$	2.36	3.16	4.23	4.73



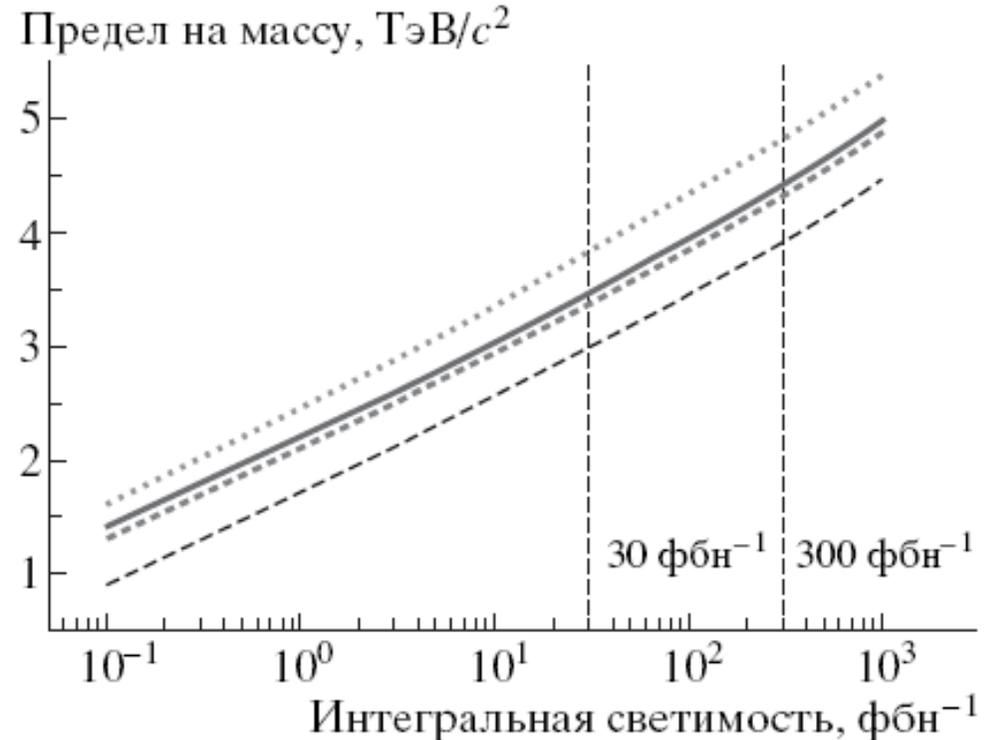
Константа $c$	Сценарий НДС	1 фбн <sup>-1</sup>	10 фбн <sup>-1</sup>	100 фбн <sup>-1</sup>	300 фбн <sup>-1</sup>
0.01	Идеальный дет.	0.77	1.21	1.71	1.97
	Long Term	0.74	1.18	1.65	1.92
0.1	Идеальный дет.	2.36	3.13	4.15	4.54
	Long Term	2.34	3.09	4.03	4.43
	First Data	2.03	—	—	—

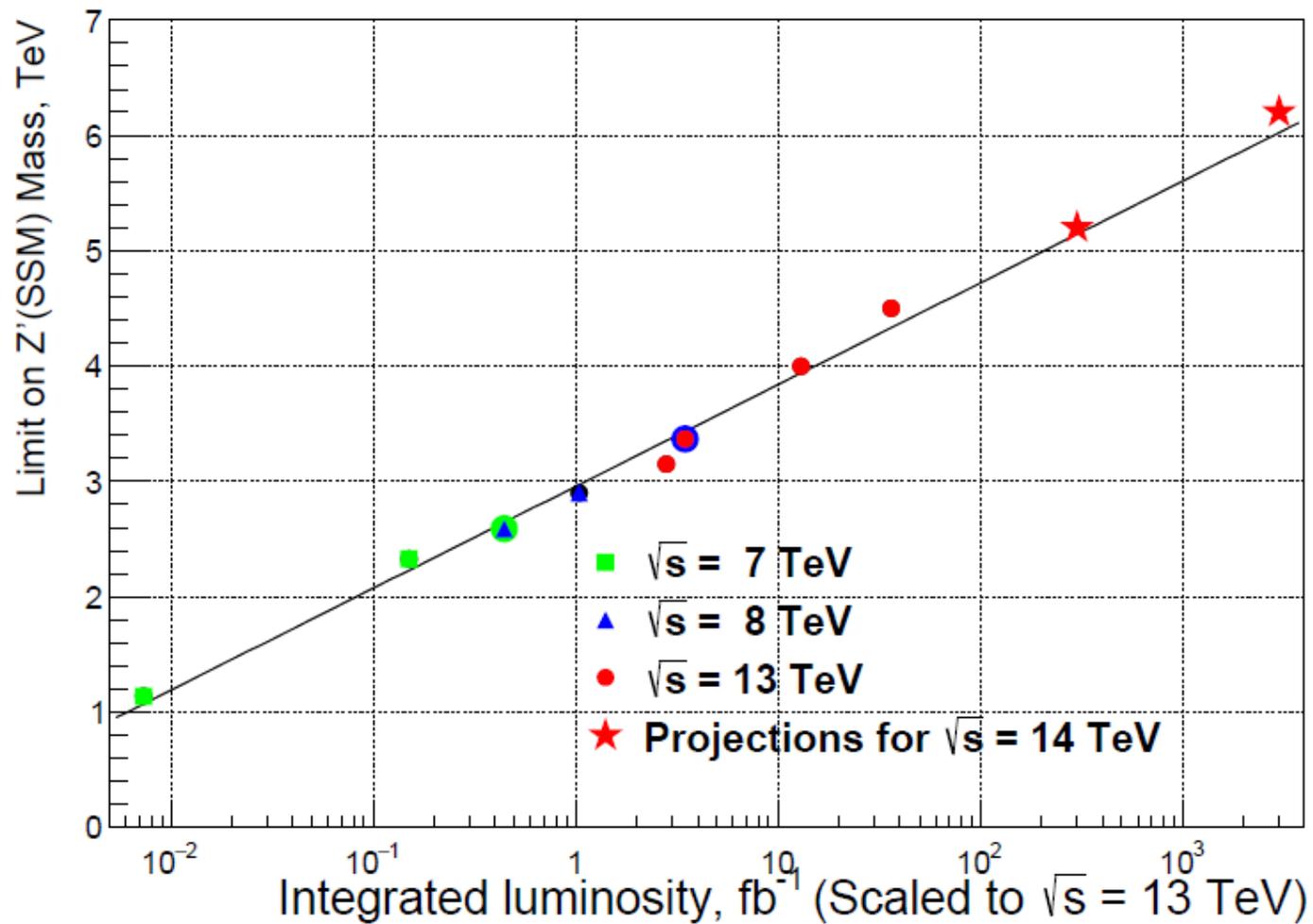
- TeV<sup>-1</sup> Extra Dimension Model: I. Antoniadis, 1991
  - ✓ The fundamental scale is not planckian:  $M_D \sim \text{TeV}$
  - ✓ Gauge bosons can travel in the bulk
    - ⇒ KK- modes of gauge bosons (spin-1)

- Extended gauge models
  - ✓ E<sub>6</sub> GUT:  $Z_\psi, Z_\chi, Z_\eta$  (spin-1)
  - ✓ SO(10): Left-Right Model ( $Z_{LR}$ ) etc.

$$g_{Z^0} \left( \frac{g_{Z'}}{g_{Z^0}} \right) (Q_\chi \cos\theta_{E_6} + Q_\psi \sin\theta_{E_6})$$

где свободный параметр модели  $\theta_{E_6}$  может принимать значения от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ ,  $(g_{Z'}/g_Z)^2 = (5/3)\sin^2\theta_W$ , а  $Q_\psi = [1, 1, 1]/(2\sqrt{6})$  и  $Q_\chi = [-1, 3, -5]/(2\sqrt{10})$  для  $[(u, d, u^c, e^c), (d^c, \nu e^-), (N^c)]$

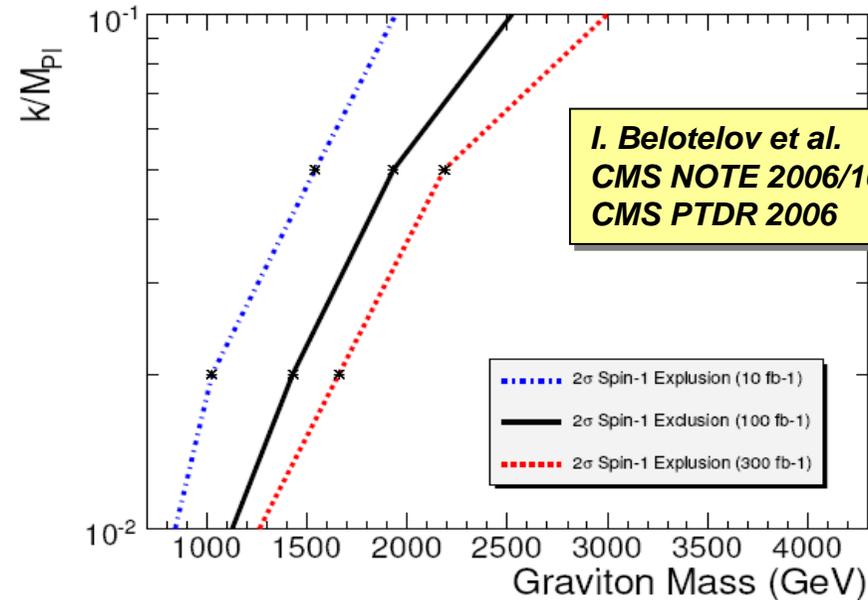
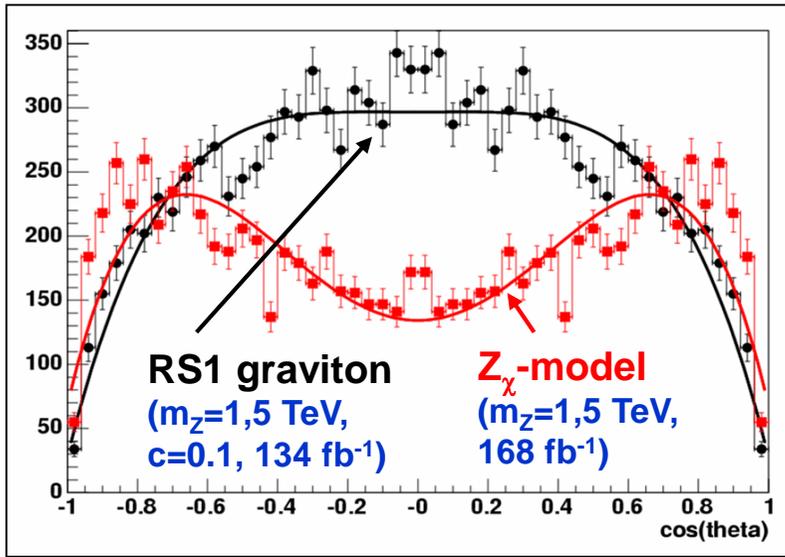
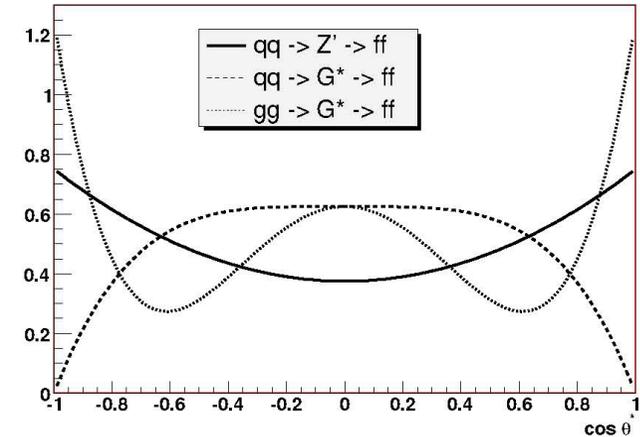




ЯФ 70 №1, 61 (2007)

**Spin-1 States:**  $Z'$  from extended gauge models,  $Z_{KK}$   
**Spin-2 States:** RS1-graviton

Channel	$d$ -functions	Normalised density for $\cos\theta^*$
$q\bar{q} \rightarrow G^* \rightarrow f\bar{f}$	$ d_{1,1}^2 ^2 +  d_{1,-1}^2 ^2$	$P_q = \frac{5}{8} (1 - 3 \cos^2 \theta^* + 4 \cos^4 \theta^*)$
$g g \rightarrow G^* \rightarrow f\bar{f}$	$ d_{2,1}^2 ^2 +  d_{2,-1}^2 ^2$	$P_g = \frac{5}{8} (1 - \cos^4 \theta^*)$
$q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z^0/Z' \rightarrow f\bar{f}$	$ d_{1,1}^1 ^2 +  d_{1,-1}^1 ^2$	$P_1 = \frac{3}{8} (1 + \cos^2 \theta^*)$

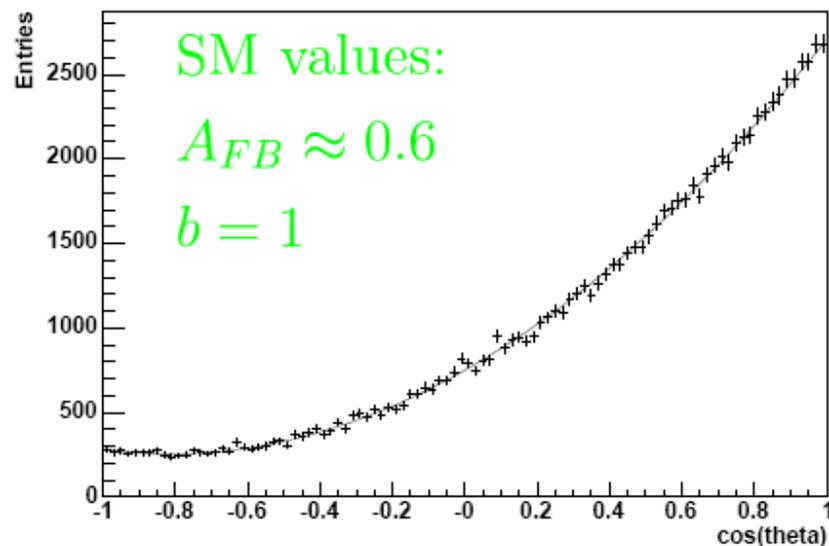


I. Belotelov et al.  
 CMS NOTE 2006/104  
 CMS PTDR 2006

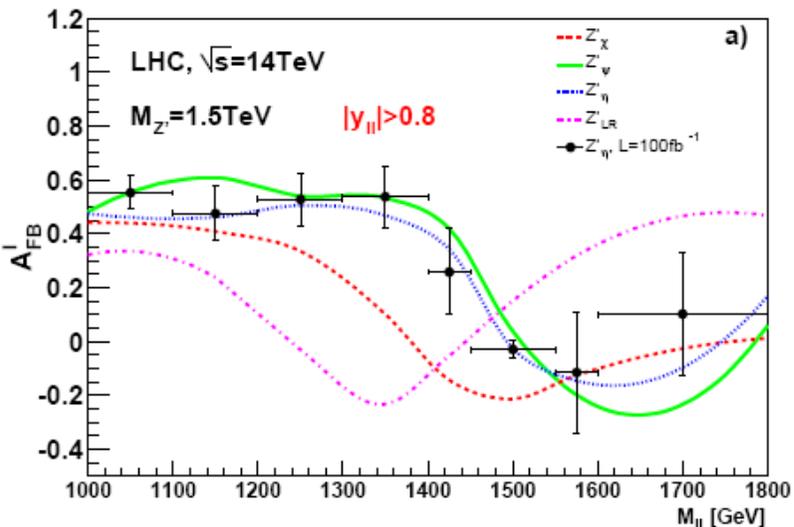
$A_{FB}$  чувствительна к соотношению векторной и аксиальной составляющей взаимодействия



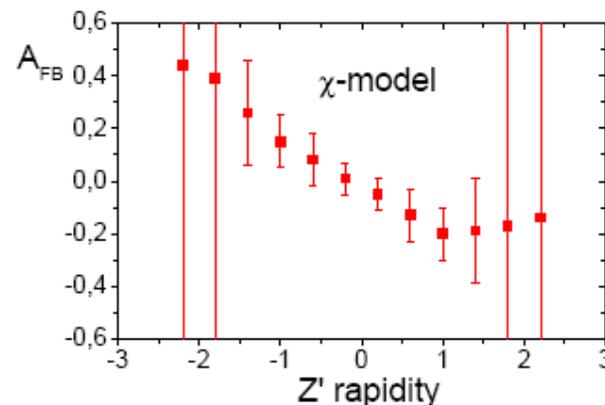
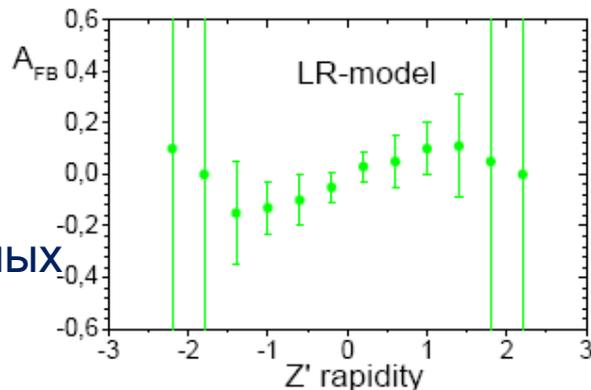
тест на присутствие “новой” физики



Forward backward asymmetry measurement



разделение возможно до  $m \sim 1-1.5 \text{ ТэВ}/c^2$



Возможность “селекции” расширенных калибровочных моделей!

# Коррекция AFB

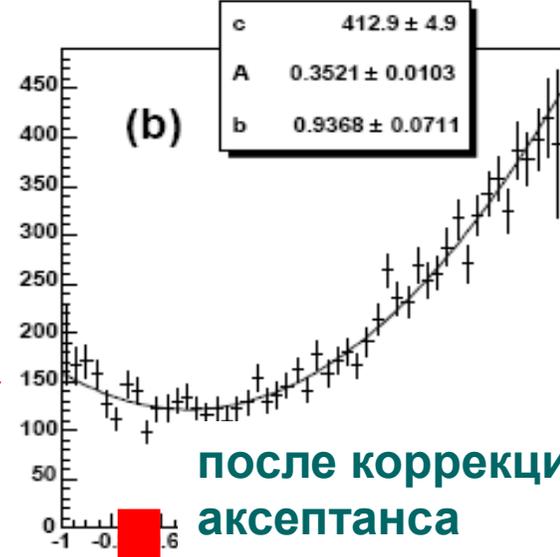
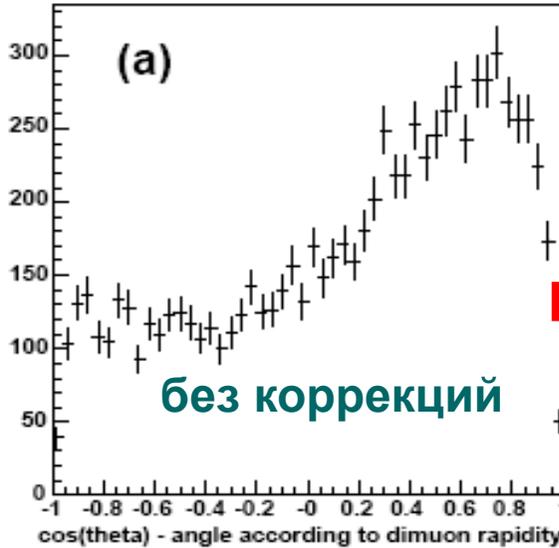
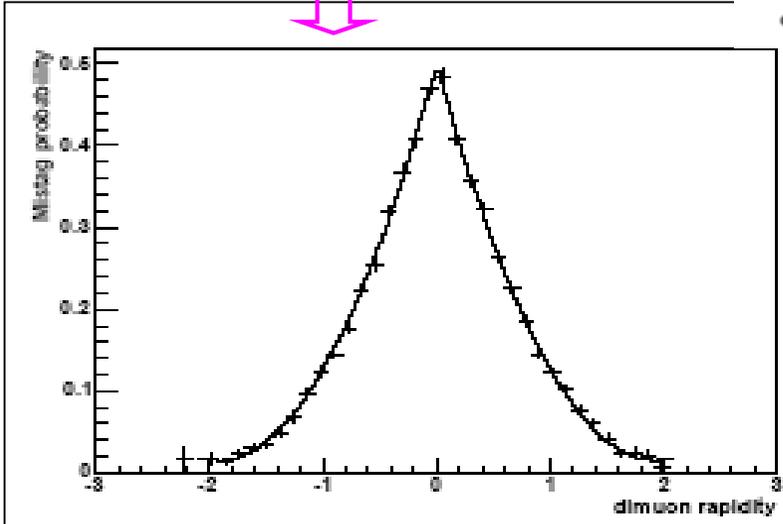
- (1) направление движения кварка в  $pp$  коллайдере точно неизвестно
- (2) угловые распределения сильно искажены акцептансом



за направление движения кварка принимается направление движение ди-мюона ( $Z'/G^*/\dots$ )



“mistag probability” (доля событий с “неправильным” направлением кварка)

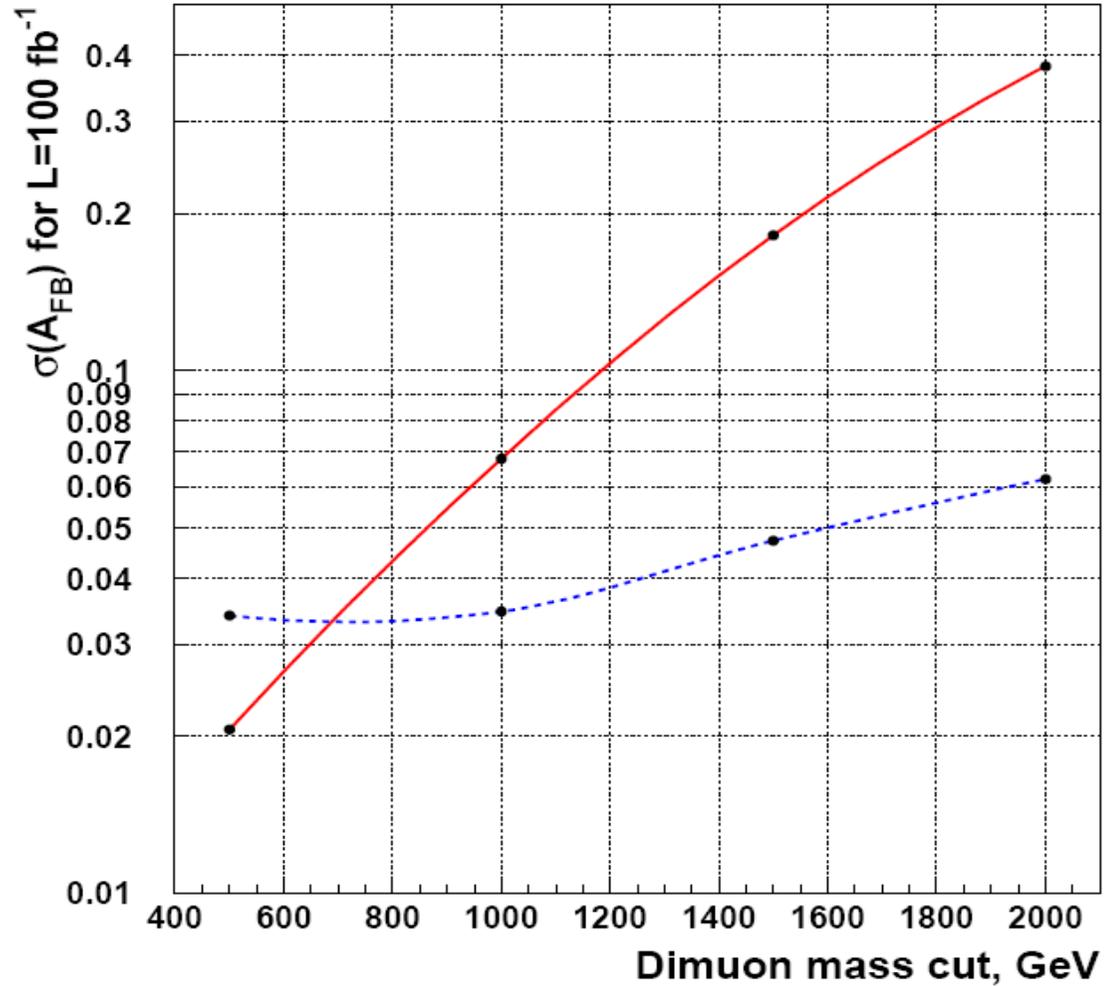


$A_{FB}^{theor} = 0.61$   
 $A_{FB}^{extr} = 0.62 \pm 0.02$



## Систематика

- зависимость “mistag probability” от различных наборов PDF
- $\Delta K = 0.05$
- EWK поправки
- QCD-scale
- влияние невыравненности (пренебрежимо мало)
- Pile-up
- фоновые процессы



# Выводы и результаты (1)

Предложена, обоснована и детально разработана программа физических исследований эксперимента CMS по проверке стандартной модели и поиску новой физики в канале с парой мюонов в конечном состоянии, образующихся в столкновениях пучков протонов при энергии 14 ТэВ в с.ц.м. В рамках этих работ получены следующие результаты:

1. С учетом влияния взаимной невыравненности детекторных систем установки CMS и специфики взаимодействия мюонов высоких энергий с веществом установки разработаны и оптимизированы методы онлайн и оффлайн отбора мюонных пар со значениями инвариантной массы до нескольких ТэВ.
2. На данных Монте–Карло и данных тестов на пучках SPS и глобального сеанса на космических мюонах при включенном магнитном поле проведен широкомасштабный тест программного обеспечения CMS для моделирования, реконструкции и отбора событий, содержащих мюоны с поперечными импульсами до нескольких ТэВ.
3. Впервые продемонстрирована возможность экспериментального измерения сечения процесса Дрелла–Яна и пространственной асимметрии вылета мюона в области инвариантных масс до нескольких ТэВ, которые были недоступны для измерения до LHC. Разработаны методики измерения сечения процесса Дрелла–Яна и пространственной асимметрии вылета мюона, включая методы подавления фоновых процессов и коррекцию систематических эффектов, способы оценки экспериментальных систематических погрешностей.

4. Рассчитаны теоретические погрешности вычислений сечения процесса Дрелла–Яна, связанные с неточным знанием функций распределения кварков и глюонов, неоднозначностью выбора шкалы КХД, конечной точностью определения бегущей константы связи КХД.
5. С учетом влияния систематических эффектов, связанных с регистрирующей аппаратурой, методов отбора и реконструкции мюонов и точности теоретических вычислений впервые показана возможность наблюдения сигналов от многомерной гравитации, предсказываемых сценарием с большими дополнительными измерениями (модель ADD). Разработана методика поиска сигналов новой физики нерезонансного типа в канале с парой мюонов в конечном состоянии.
6. С учетом влияния систематических эффектов, связанных с регистрирующей аппаратурой, методов отбора и реконструкции мюонов и точности теоретических вычислений впервые показана возможность наблюдения тяжелого резонансного состояния со спином 2 на примере модели многомерной гравитации RS1, основанной на гипотезе «стянутых» дополнительных пространственных измерений с метрикой многомерного пространства анти–де Ситтера AdS5. Также впервые показана возможность наблюдения тяжелого резонансного состояния со спином 1 на примере предсказаний расширенных калибровочных моделей, основанных на группах TBO E6 и SO(10). Разработана методика поиска сигналов новых резонансных состояний со спином 2 и спином 1 в канале с парой мюонов в конечном состоянии.

**Предложенная программа исследований легла в основу соответствующих глав концептуальных документов коллаборации CMS ``CMS Physics Technical Design Report Vol.I: Detector performance and software'', ``CMS Physics Technical Design Report Vol. II: Physics Performance'', определяющих стратегию и методы научных исследований коллаборации.**

Реализация и развитие программы физических исследований эксперимента CMS по проверке стандартной модели и поиску новой физики в канале с парой мюонов в конечном состоянии была развита во время обработки и анализа экспериментальных данных, полученных коллаборацией CMS на пучках сталкивающихся протонов при 7 и 8 ТэВ в с.ц.м во время первого этапа работы LHC (RUN1) в 2011 г. и 2012 г. В рамках этих работ получены следующие результаты:

7. Впервые измерены дифференциальное сечение  $d\sigma/dm$  процесса Дрелла–Яна в области значений инвариантной массы пары лептонов от 15 до 2000 ГэВ и дважды дифференциальное сечение  $d\sigma/dm dy$  в области масс от 20 до 1500 ГэВ и быстроты пары  $|y| < 2.4$ . Измерения дважды дифференциального сечения покрывают диапазон значений масштабной переменной Бьёркена  $3 \times 10^{-4} < x < 1.0$  и переданного четырехимпульса  $6.0 \times 10^2 < Q^2 < 7.5 \times 10^5$  ГэВ<sup>2</sup>. Дифференциальное сечение измерено в более широком диапазоне  $3 \times 10^2 < Q^2 < 3 \times 10^6$  ГэВ<sup>2</sup>. Измерена энергетическая зависимость сечений.
8. С рекордной точностью измерены инклюзивные сечения рождения  $Z^0$ –бозона  $\sigma_Z = 986.4 \pm 0.6$  (стат.)  $\pm 5.9$  (сист.)  $\pm 21.7$  (теор.)  $\pm 21.7$  (свет.) пбн при 7 ТэВ и  $\sigma_Z = 1138 \pm 8$  (эксп.)  $\pm 25$  (теор.)  $\pm 30$  (свет.) пбн при 8 ТэВ/с.
9. Впервые измерены значения пространственной асимметрии вылета лептонов AFB для величины инвариантной массы лептонной пары  $40 < m < 2000$  ГэВ и быстроты пары  $|y| < 2.4$ . Впервые в канале с парой мюонов измерено значение эффективного угла Вайнберга  $\sin^2\theta_{\text{eff}}$ , которое составило  $0.2287 \pm 0.0020$  (стат.)  $\pm 0.0025$  (сист.).

10. Установлены верхние пределы на сечение рождения нейтральных калибровочных бозонов расширенного калибровочного сектора  $Z'$  с распадом на пару лептонов и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на массы резонансных состояний со спином 1 в зависимости от констант связи моделей расширенной калибровочной группы  $E_6$  и симметричной «лево–правой» модели.
11. Установлены верхние пределы на сечение рождения калуца–клейновских возбужденных состояний многомерного гравитона GKK с распадом на пару лептонов и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на массы резонансных состояний со спином 2 в зависимости от констант связи в модели дополнительных пространственных измерений Рэндалл–Сандрум, тип 1.
12. Установлены верхние пределы на сечение процесса рождения пар мюонов с виртуальным обменом гравитонами GKK и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на фундаментальный масштаб многомерной гравитации  $\Lambda_T$  и в альтернативном описании MS в зависимости от числа дополнительных измерений  $n$  в модели ADD.
13. Впервые модельно–независимым способом получены верхние пределы (95% CL) на сечения процессов множественного рождения частиц в области значений полной поперечной энергии  $ST$  от 1.5–5.0 ТэВ для классов событий с множественностью  $N > 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ .
14. Впервые в коллайдерных экспериментах получены верхние пределы (95% CL) на сечения процессов образования квазиклассических и квантовых микроскопических черных дыр, а также струнных шаров в различных модельных предположениях. Впервые получены ограничения на пространство параметров (массы объектов, фундаментальный масштаб MD и число дополнительных измерений  $n$ ) для МЧД в моделях низкоэнергетической гравитации ADD и RS1.



Спасибо за внимание!



# Extra Slides



# Публикации (1)



## Статьи в научных журналах

- G. Bayatian, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance”, CERN-LHCC-2006-021; CMS-TDR-008-2, CERN, Geneva, 2006; ISBN 978-92-9083-269-0, 641 pp.; J. Phys. G: Nucl. Part. 34, 995 (2006), pp. 1248–1252, 1448–1454.
- I. I. Belotelov, A. O. Golunov, I. A. Golutvin, ..., S. V. Shmatov et al., “Electromagnetic Secondaries and Punch–Through Effects in the CMS ME1/1”, Письма в ЭЧАЯ, 4, 583–586 (2007).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Performance of CMS Muon Reconstruction in Cosmic–Ray Events”, JINST 5, T03022 (2010).
- A. Lanyov and S. Shmatov, “Studies of Drell–Yan dimuon events in the CMS experiment”, Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 177–178, 302 (2008).
- В. Ф. Конопляников, М. В. Савина, С. В. Шматов, С. Г. Шульга, “Неопределенности сечения рождения пар мюонов в процессе Дрелла–Яна при столкновении протонов на LHC”, Письма в ЭЧАЯ 11, 1122 (2014).
- М. Г. Гавриленко, В. Ф. Конопляников, М. В. Савина, С. Г. Шульга, С. В. Шматов, “Сечения процесса Дрелла–Яна в столкновении протонов на LHC”, ЯФ 79, 50 (2016).
- С. В. Шматов, С. Г. Шульга, “Теоретические неопределенности в сечениях инклюзивного рождения струи в экспериментах LHC при энергии 14 ТэВ”, ПФМТ 4, 18 (2010).
- С. В. Шматов, “Поиск дополнительных измерений в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере”, ЯФ 74, 511 (2011).
- S. Shmatov, “Search for extra dimensions with the CMS detector”, Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 177–178, 330 (2008).

## Статьи в научных журналах

- I. Golutvin, P. Moissenz, V. Palichik, M. Savina, S. Shmatov, “Search for TeV–scale bosons in the dimuon channel at the LHC”, Czech. J. Phys. 54, A261 (2004).
- И. А. Голутвин, В. В. Пальчик, М. В. Савина, С. В. Шматов, “Поиск новых нейтральных калибровочных бозонов на LHC”, ЯФ 70, 61 (2007).
- V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Measurements of differential and double–differential Drell–Yan cross sections in proton–proton collisions at 8 TeV”, Eur. Phys. J. C 75, 147 (2015).
- С. В. Шматов, “Изучение физики стандартной модели в эксперименте CMS”, ЭЧАЯ 48, 701 (2017).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Measurement of the differential and doubledifferential Drell–Yan cross sections in proton–proton collisions at 7 TeV”, JHEP 12, 030 (2013).
- И. Н. Горбунов, С. В. Шматов, “Изучение процессов Дрелла–Яна в эксперименте CMS”, ЯФ 78, 647 (2015).
- V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Forward–backward asymmetry of Drell–Yan lepton pairs in pp collisions at 8 TeV”, Eur. Phys. J. C 76 (2016) 325.
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Forward-backward asymmetry of Drell–Yan lepton pairs in pp collisions at 7 TeV”, Phys. Lett. B 718, 752 (2013).
- I. N. Gorbunov and S. V. Shmatov, “Measurement of the Forward–Backward Asymmetry of  $\mu+\mu$ –Pairs in CMS”, ЭЧАЯ 45 , 211 (2014).



# Публикации (3)



## Статьи в научных журналах

- И. Н. Горбунов, С. В. Шматов, “Измерение асимметрии «вперед–назад» и слабого угла смешивания в процессах рождения пар лептонов в  $pp$ –столкновениях при 7 ТэВ в эксперименте CMS на LHC”, ЯФ 76, 1160 (2013).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Measurement of the weak mixing angle with the Drell–Yan process in proton–proton collisions at the LHC”, Phys. Rev. D 84, 112002 (2011).
- V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for physics beyond the standard model in dilepton mass spectra in proton–proton collisions at 8 TeV”, JHEP 1504, 025 (2015).
- С. В. Шматов, “Некоторые результаты эксперимента CMS на LHC по поиску физики за рамками Стандартной модели”, ЭЧАЯ 49 №4, 1291–1301 (2018).
- И.А. Голутвин, С. В. Шматов, “Эксперимент CMS: результаты и перспективы”, ЭЧАЯ 48, 604 (2017).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for heavy narrow dilepton resonances in  $pp$  collisions at 7 TeV and 8 TeV”, Phys. Lett. B 720, 63 (2013).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for narrow resonances in dilepton mass spectra in  $pp$  collisions at 7 TeV”, Phys. Lett. B 714, 158 (2012).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for Resonances in the Dilepton Mass Distribution in  $pp$  Collisions at 7 TeV”, JHEP 05, 093 (2011).
- С. В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS на LHC по поиску дополнительных пространственных измерений”, ЯФ 79, 157 (2016).
- С. В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS”, ЯФ 78, 546 (2015).



# Публикации (4)



## Статьи в научных журналах

- С.В. Шматов, “Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействиях протонов при 7 ТэВ в эксперименте CMS на LHC”, ЯФ 76, 1166 (2013).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for microscopic black holes in pp collisions at 8 TeV”, JHEP 07, 178 (2013).
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for microscopic black holes in pp collisions at 7 TeV”, 5 CERN-PH-EP-2012-045; JHEP 04, 061 (2012).
- V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider”, Phys. Lett. B. 697, 434 (2011).

## Препринты ОИЯИ, ЦЕРН и коллаборации CMS

- G. Bayatian, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “CMS Physics Technical Design Report Vol.I: Detector performance and software”, CERN LHCC-2006-001; CMS-TDR-008-1, CERN, Geneva, 2006; ISBN 978-92-9083-268-3, 521 p., pp. 332–364.
- I. Belotelov, ..., S. Shmatov et al., “Influence of misalignment scenarios on muon reconstruction”, CERN-CMS-NOTE-2006-017, 2006, CERN, Geneva, 20 pp.
- Mingshui Chen, ..., Sergei Shmatov et al., “Search for New High–Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in the CMS Experiment”, CERN CMS AN-2007/038, CERN, Geneva, 81 pp.
- S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), “Search for New High–Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in the CMS Experiment”, CMS PAS SBM-07-002, CERN, Geneva, 14 pp.
- I. Belotelov, ..., S. Shmatov et al., “Study of Drell–Yan Di–muon Production with the CMS Detector”, CERN-CMS-NOTE-2006-123, CERN, Geneva, 2006, 14 pp.



# Публикации (5)



## Препринты ОИЯИ, ЦЕРН и коллаборации CMS, материалы конференций и семинаров

- I. Golutvin,..., S. Shmatov, V. Zykunov, “Study of Forward–Backward Asymmetry in Drell–Yan Dimuon Production with the CMS Detector”, CERN-CMS AN 2007/003, CERN, Geneva, 2007, 17 pp.
- I. Belotelov,..., S. Shmatov et al., “Search for ADD Extra Dimensional Gravity in Dimuon Channel with the CMS Detector”, CERN-CMSNOTE-2006-076, 2006, CERN, Geneva, 14 pp.
- I. Belotelov,..., S. Shmatov et al., “Search for Randall–Sundrum Graviton Decay into Muon Pairs”, CERN-CMS-NOTE-2006-104, 2006, CERN, Geneva, 28 pp.
- I. Gorbunov, ..., S. Shmatov, D. Silvers, “Forward–backward asymmetry of Drell-Yan muon pairs”, CMS AN-2013/260, CERN, Geneva, 2013, 39 pp.
- G. Alverson, ..., S. Shmatov et el., “Search for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs in pp Collisions at 8 TeV”, CMS AN-2012/182; CMS AN-2012/422, CERN, Geneva, 60 pp.
- S. Schmitz,..., S. Shmatov et al., “Statistical Inference in a Search for a Narrow Resonance”, CMS AN-2012/185, CERN, Geneva, 2012, 15 pp.
- D. Acosta,..., S. Shmatov et el., “Search for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs with Collisions Gathered at 7 TeV”, CMS AN-2011/472, CERN, Geneva, 2011, 47 pp.
- D. Acosta,..., S. Shmatov et el., “Search for High-Mass Resonances Decaying to Muon Pairs with 15 pb<sup>-1</sup> of collisions gathered at 7 TeV”, CMS AN-2010/317, CERN, Geneva, 2010, 80 pp.
- A. Ferapontov, ..., S. Shmatov, B. Bilin, “Searches for Microscopic Black Holes Production in pp Collisions at 8 TeV with the CMS Detector”, CMS AN-2012/146, CERN, Geneva, 2012, 27 pp.
- A. Ferapontov, G. Landsberg, P. Tsang, V. Konopliyanikov, M. Savina, S. Shmatov, B. Bilin, “Search for microscopic black holes in pp collisions at 7 TeV”, CMS AN-2011/256, CERN, Geneva, 2011, 32 pp.



# Публикации (6)



## Препринты ОИЯИ, ЦЕРН и коллаборации CMS, материалы конференций и семинаров

- I. Golutvin, A. Saproinov, M. Savina, S. Shmatov, “ADD extra dimensional gravity and di-muon production at LHC”, Proceedings of 18<sup>th</sup> International Workshop on High-Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP 2004), June 17–23, 2004, St.Petersburg, Russia, M.N. Dubinin (ed.), V.I. Savrin (ed.) (Moscow State U.), 2004, 459 pages; hep-ph/0502126.
- S. Shmatov, “Search for Extra Dimensions with Atlas and CMS Detectors at the LHC”, Proceedings of the XXXIII International Conference on High Energy Physics (ICHEP’06) on behalf of the ATLAS and CMS Collaborations, July 26 – August 02, 2006, Moscow, Russia, Alexey Sissakian (ed.), Gennady Kozlov (ed.), Elena Kolganova (ed.) (Dubna, JINR); New Jersey: World Scientific (2007) Conference: C06-07-26, 1264 pages; arXiv:0707.0470.
- I. Golutvin, E. Rogalev, M. Savina, S. Shmatov, “Search for new heavy resonances at LHC”, Proceedings of 18th International Workshop on High-Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP 2004), June 17–23, 2004, St.Petersburg, Russia, M. Dubinin (ed.), V. Savrin (ed.) (Moscow State U.), 2004, 459 pages; hep-ph/0502009.
- С. В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS”, Физика на LHC: Труды объединенного семинара RDMS CMS. — Дубна, 2016. — Вып. 4 — 13–119, ISBN 978-5-9530-0437-4.

## Главы в монографиях

- М. В. Савина, С. В. Шматов, “Физика с дополнительными пространственными измерениями”, В глубь материи: Физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве, М. Этерна, 2009, - 576 с., ISBN 978-5-480-00211-9.
- М. В. Савина, С. В. Шматов, “Физика дополнительных измерений на Большом адронном коллайдере”, Экспериментальные методы в физике частиц, Ответственный редактор – А. В. Зарубин, Дубна: ОИЯИ, 2004. 374 с., ISBN 978-5-9530-0095-2.



# Представления результатов



Результаты исследований, составивших диссертацию, докладывались автором на научных семинарах ОИЯИ, ИТЭФ, НИИЯФ МГУ, ПИЯФ; рабочих совещаниях коллаборации CMS, проходивших в ЦЕРН, ОИЯИ, ИТЭФ, МГУ; ежегодных конференциях коллаборации RDMS CMS (2002-2013 г.); на международных рабочих совещаниях, научных школах, конференциях и симпозиумах (всего более 80 выступлений)

- Сессии-конференции отделения ядерной физики РАН ``Физика фундаментальных взаимодействий`` в 2009, 2011, 2013, 2014, 2016 гг.
- Симпозиум по физике на адронных коллайдерах (Hadron Collider Physics Symposium -HCP2007), 20-26 May 2007 La Biodola, Isola d'Elba, Italy
- Международная ``рочестерская`` конференция по физике высоких энергий (XXXIII International Conference on High Energy Physics - ICHEP'06), ОИЯИ, РАН, Москва, Россия
- Международное рабочее совещание по физике высоких энергий и квантовой теории поля (18th International Workshop on High-Energy Physics and Quantum Field Theory -QFTHEP2004), 17-23 June, 2004, St.Petersburg, Russia
- Международная конференция по физике на LHC (Physics at LHC - LHC-Praha-2003), 6-12 July 2003, Prague, Czech Republic
- Зимняя дубненская международная школа современной теоретической физики (DIAS-TH) ``Физика на Большом адронном коллайдере``, 30 января - 06 февраля, 2012 г.



# Личный вклад



2002-2019: физический координатор группы ОИЯИ в CMS

2002-2007: подготовка программы физических исследований эксперимента CMS (PhTDR vol.1 и vol.2) – координатор (линк-персон) анализов CMS “Изучение процесса Дрелла-Яна”, “Поиск резонансного сигнала (RS-1-гравитон) в канале с парой мюонов”, “Поиск нерезонансного сигнала (сценарий ADD) в канале с парой мюонов”

2008-2009: подготовка к первому набору данных при пониженной энергии - определяющий вклад (responsibility) в изучение MC, триггер, изучение пространственной невыравненности детекторных систем

2010-... обработка и анализ данных при 7, 8, 13 ТэВ – определяющий вклад в исследования с парой мюонов, ответственность группы ОИЯИ за сравнение данных и MC в исследованиях в канале с парой мюонов, за изучение систематических эффектов, полная ответственность измерение асимметрии “вперед-назад”.  
Определяющий вклад в MC процессов множественного рождения струй (сигнал/фон), изучение систематических эффектов

Подготовлено 4 кандидатских/PhD диссертаций (3 под личным руководством), более 10 магистерских работ

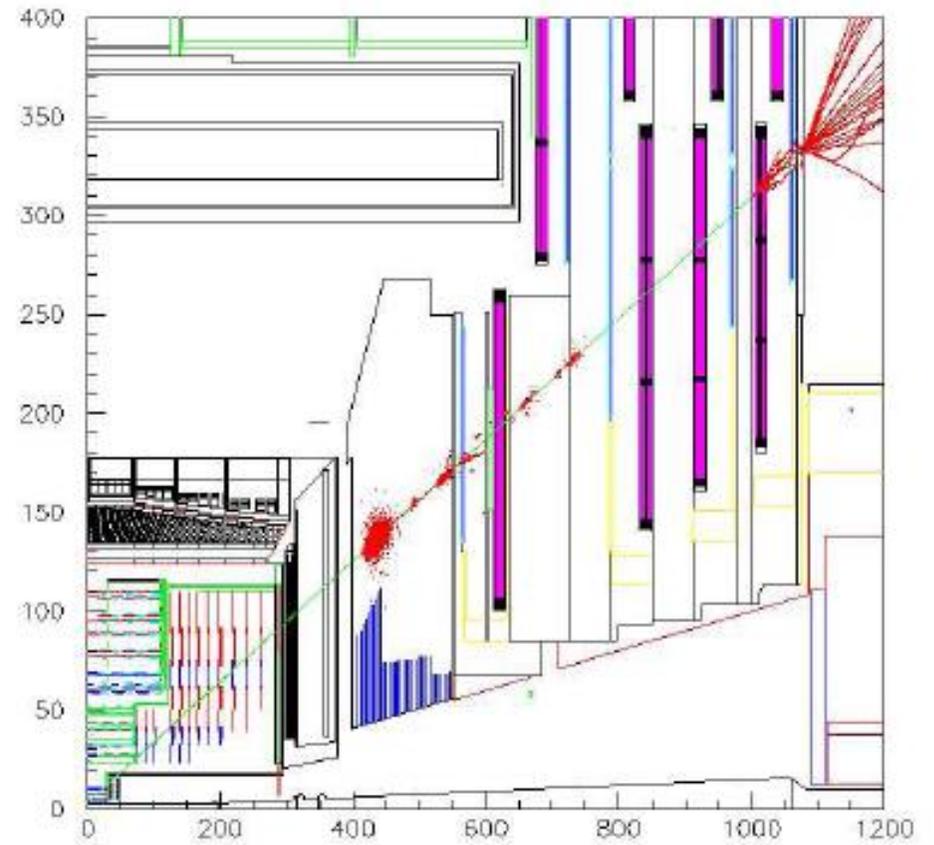
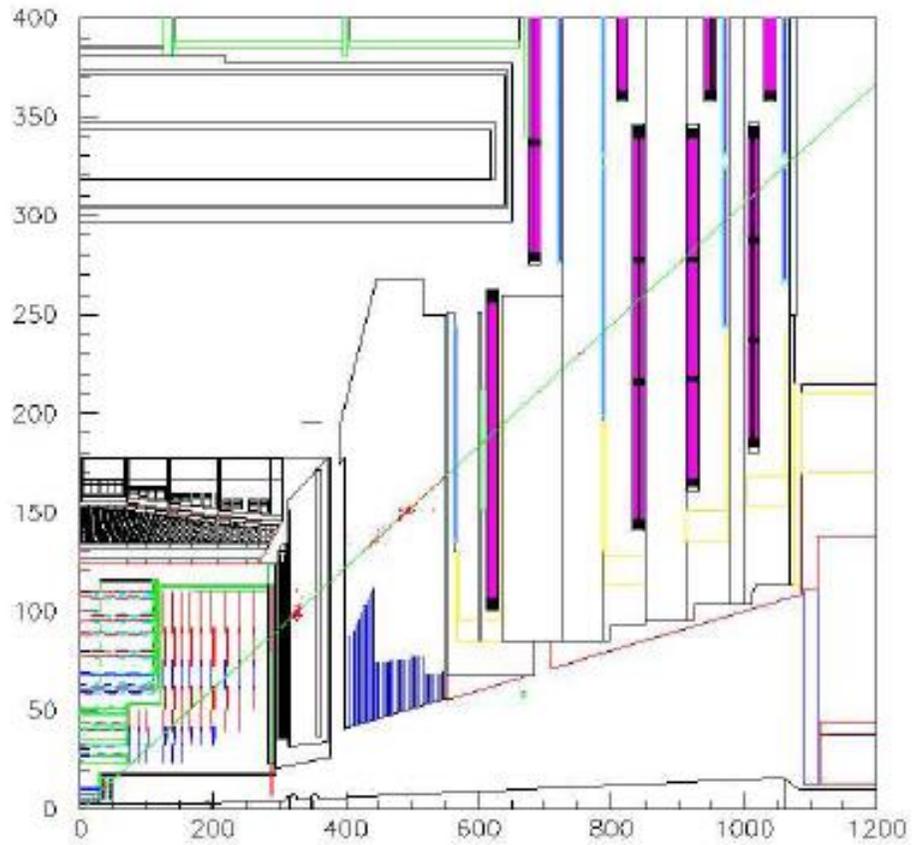


Таблица 2.1. Сравнение величины  $\Delta(1/p_T)$  для одиночного мюона с  $p_T = 1000$  ГэВ/ $c^2$  при использовании различных алгоритмов [54].

Метод	Log Likelihood	RMS, ГэВ/ $c$	$\sigma$ , ГэВ/ $c$
Tracker only	-18.37	266	149
GMR	-20.94	242	75.0
TMR	-21.03	269	74.8
PMR	-21.50	190	80.1
Tune N	-21.62	197	76.7
Tune P	-22.01	176	74.0

Таблица 2.2. Сравнение величины  $\Delta(1/p_T)$  для одиночного мюона с  $p_T = 10$  ГэВ/ $c$  и использованием различных алгоритмов [54].

Метод	Log Likelihood	RMS, ГэВ/ $c$	$\sigma$ , ГэВ/ $c$
Tracker only	-17.60	0.158	0.183
GMR	-17.30	0.251	0.188
TMR	-17.40	0.174	0.187
PMR	-17.14	0.244	0.189
Tune N	-17.30	0.199	0.187
Tune P	-17.34	0.204	0.187

Таблица 2.3. Сравнение невязок величины  $R(1/p_T)$  для различных алгоритмов реконструкции по данным CRAFT2008 [54].

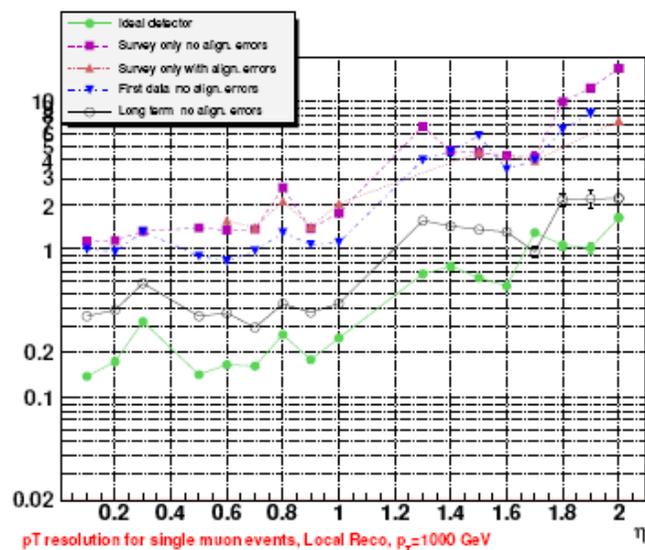
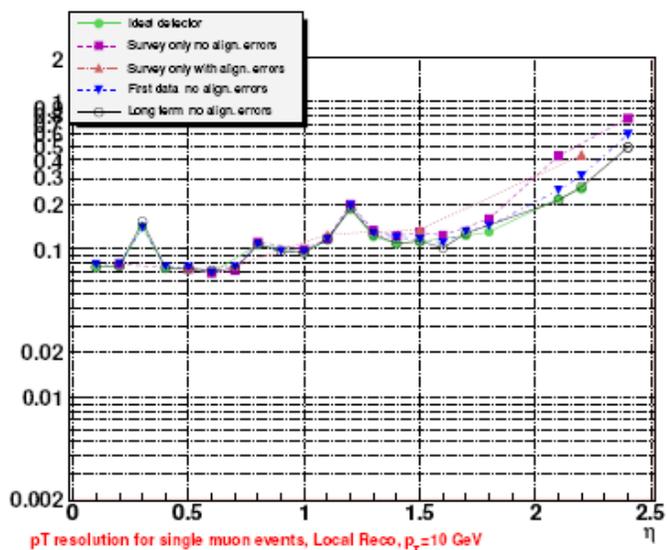
Алгоритм	$\sigma$ , %	RMS, %
Tracker only	5.5±0.1	7.6±0.2
GMR	6.1±0.2	9.5±0.3
TPFMS	5.2±0.1	6.9±0.2
PMR	5.5±0.2	6.9±0.2
Sigma switch	5.3±0.1	7.4±0.2
TMR	5.1±0.1	7.3±0.2
Tune P	5.0±0.1	6.5±0.2



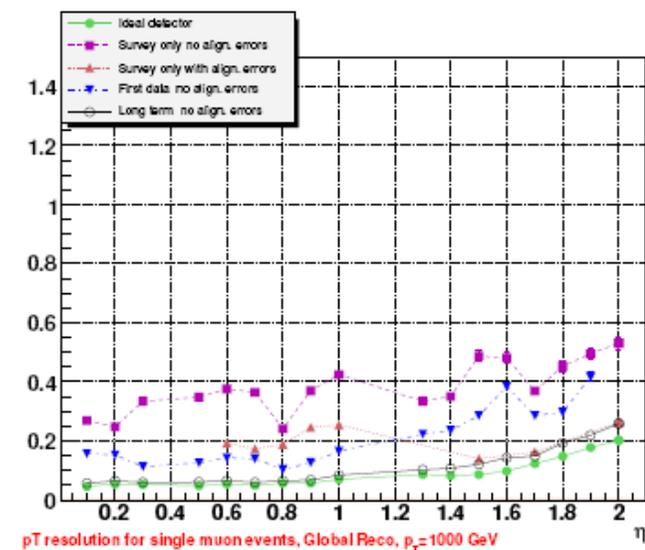
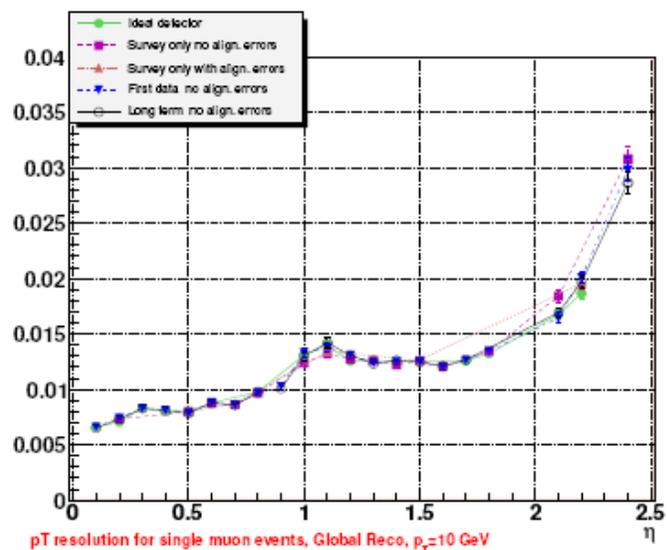
50 GeV

1000 GeV

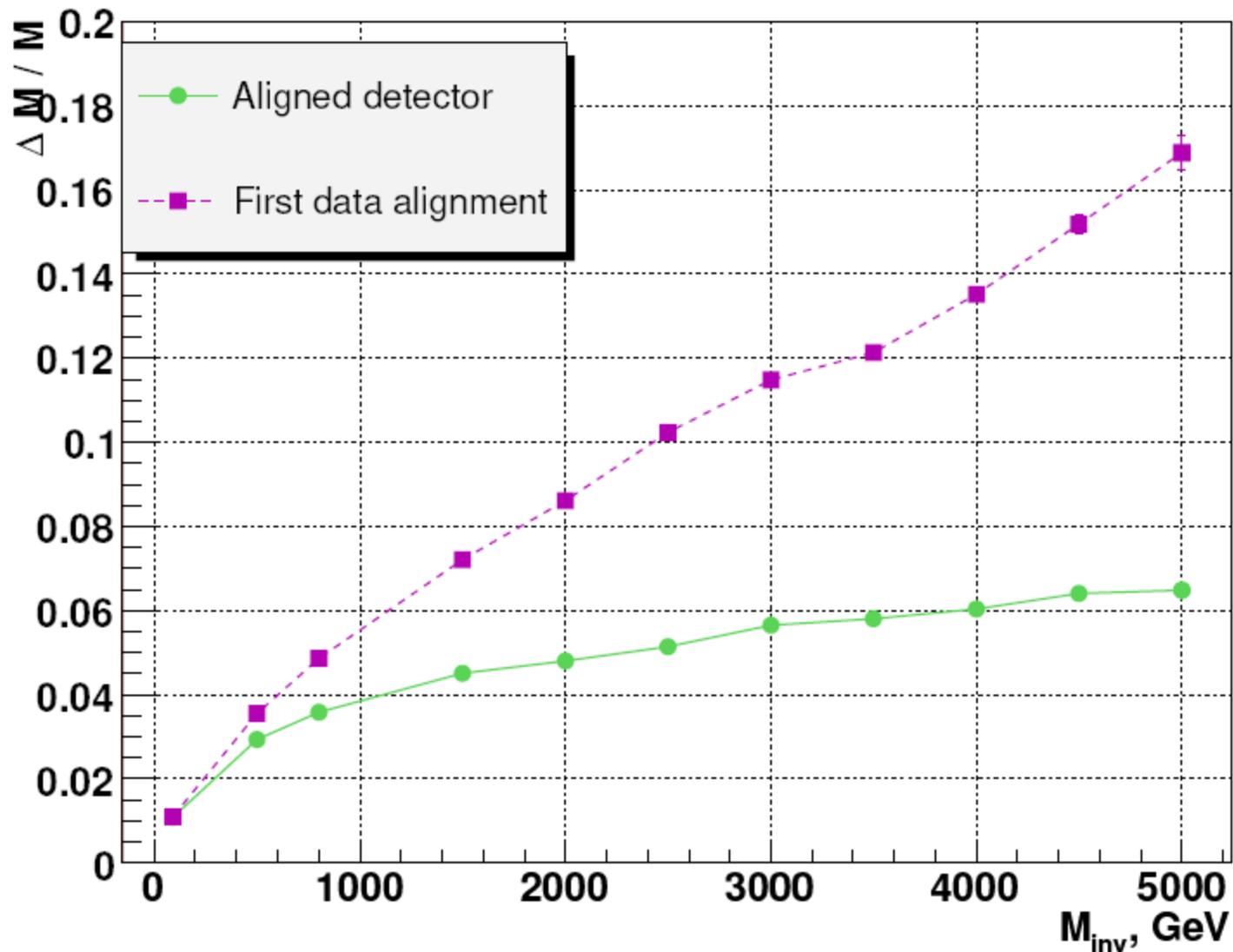
L2



L3

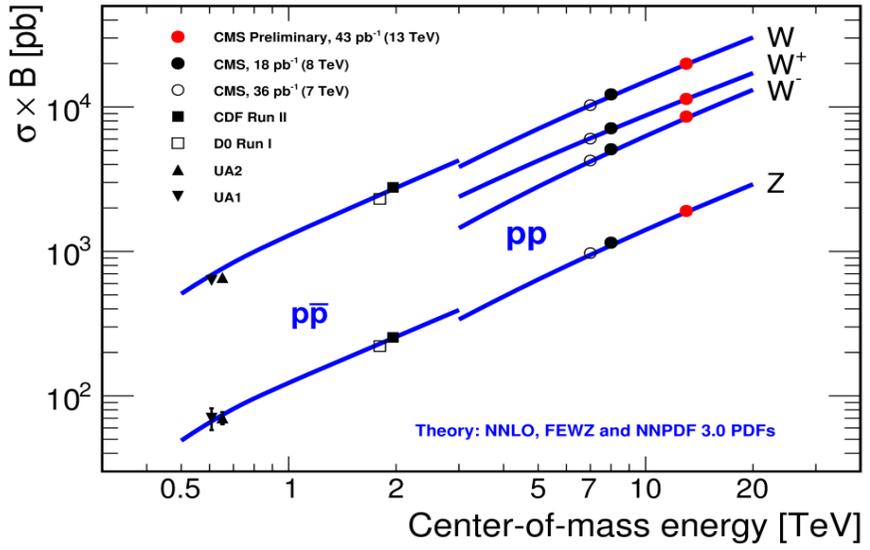
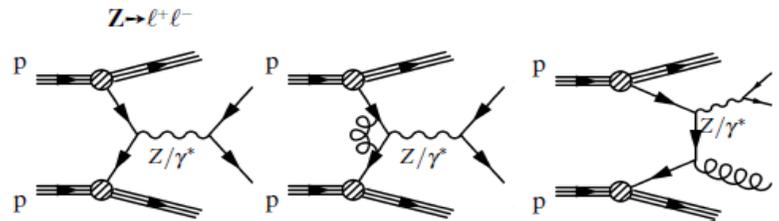


### $M_{inv}$ resolution for DY events



## High rate at the LHC

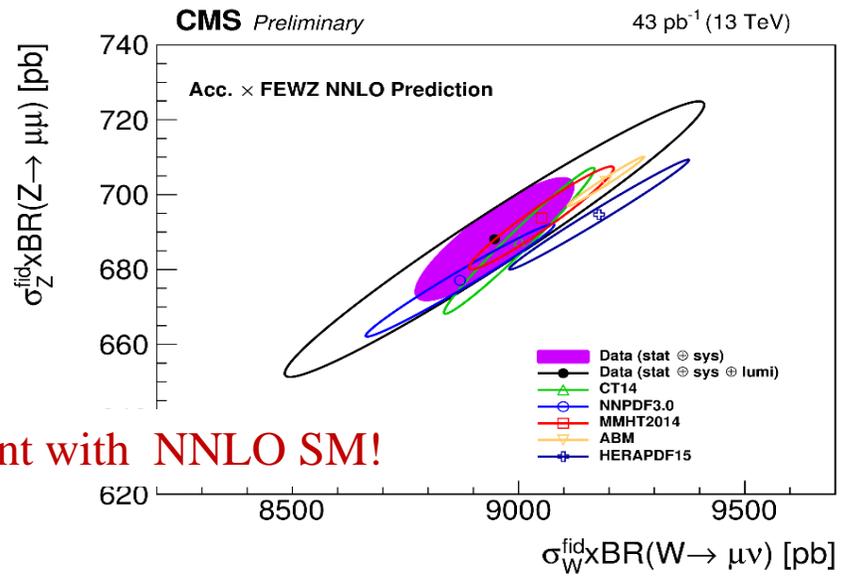
- ✓ provides statistic to study inclusive and differential distributions
- ✓ Good understanding of the detectors allow for precision measurements
- ✓ Test p-QCD and PDF in different regimes
- ✓ Developments and testing of new MC generators and techniques



CMS Preliminary 43 pb<sup>-1</sup> (13 TeV)

Process	Observation (exp. ± exp. ⊕ theory)	Theory: FEWZ (NNLO), NNPDF3.0
$W^+ \rightarrow l^+ \nu$	$11370 \pm 50_{\text{stat}} \pm 230_{\text{syst}} \pm 550_{\text{lumi}}$ pb	$11330 \pm 300$ pb
$W^- \rightarrow l^- \nu$	$8580 \pm 50_{\text{stat}} \pm 160_{\text{syst}} \pm 410_{\text{lumi}}$ pb	$8370 \pm 230$ pb
$W \rightarrow l \nu$	$19950 \pm 70_{\text{stat}} \pm 360_{\text{syst}} \pm 960_{\text{lumi}}$ pb	$19700 \pm 520$ pb
$Z \rightarrow l^+ l^-$	$1910 \pm 10_{\text{stat}} \pm 40_{\text{syst}} \pm 90_{\text{lumi}}$ pb	$1870 \pm 50$ pb
$W^+ \rightarrow l^+ \nu / W^- \rightarrow l^- \nu$	$1.323 \pm 0.010_{\text{stat}} \pm 0.021_{\text{syst}}$	$1.354 \pm 0.011$
$W^+ \rightarrow l^+ \nu / Z \rightarrow l^+ l^-$	$5.96 \pm 0.04_{\text{stat}} \pm 0.$	$6.06 \pm 0.05$
$W^- \rightarrow l^- \nu / Z \rightarrow l^+ l^-$	$4.50 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0. \nu_{\text{syst}}$	$4.48 \pm 0.02$
$W \rightarrow l \nu / Z \rightarrow l^+ l^-$	$10.46 \pm 0.06_{\text{stat}} \pm 0.16_{\text{syst}}$	$10.55 \pm 0.07$

Good agreement with NNLO SM!



ratio (exp./th.) of total cross sections and ratios



# Благодарность моим коллегам и соавторам



## СПИСОК УЧАСТНИКОВ ТЕМЫ от ОИЯИ и СТРАН-УЧАСТНИЦ

### Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В.Ю. Алексахин, И.И. Белотелов, П.Д. Бунин, А.Г. Володько, М.Г. Гавриленко, А.О. Голунов, И.А. Голутвин, Н.В. Горбунов, И.Н. Горбунов, Н.С. Голова, И.М. Граменицкий, А.Г. Долбидов, Н.Н. Евдокимов, Ю.В. Ершов, В.Е. Жильцов, А.В. Зарубин, А.Ю. Каменев, В.Ю. Каржавин, Ю.Т. Кирюшин, В.Ф. Конопляников, В.В. Кореньков, А.М. Куренков, А.В. Ланёв, В.А. Матвеев, И.М. Мельниченко, В.В. Мицын, С.А. Мовчан, П.В. Моисенз, Д.А. Олейник, В.В. Пальчик, В.В. Перельгин, А.Ш. Петросян, М.В. Савина, Р.Н. Семенов, И.Н. Семенюшкин, В.А. Смирнов, Д.А. Смолин, Т.А. Стриж, О.В. Теряев, Е.А. Тихоненко, В.В. Трофимов, С.Г. Шульга, В.С. Хабаров, С.В. Хабаров, И.А. Филозова

### Ереванский физический институт им. А. Алиханяна, Ереван, Армения

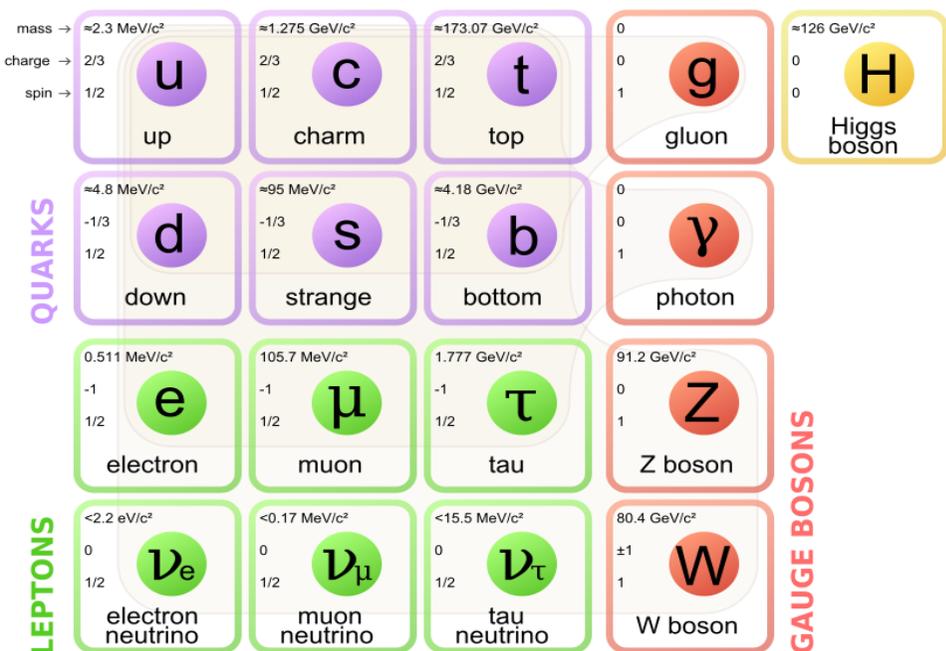
А.М. Сирунян, А.Тумасян, В.А. Хачатрян, С.А. Чатрчян

### Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий

#### Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Я. Дылышка, В. Ермольчик, В.А. Зыкунов, В.А. Мосолов, Х.С. Гонсалес, Н.М. Шумейко

Эксперименты на LEP, SLC, Tevatron, KEK установили, что наше понимание физических процессов находится в отличном согласии с экспериментальными данными в области энергий  $Q \sim 100$  ГэВ



Стандартная модель взаимодействий элементарных частиц (СМ) проверена с большой точностью

**однако**

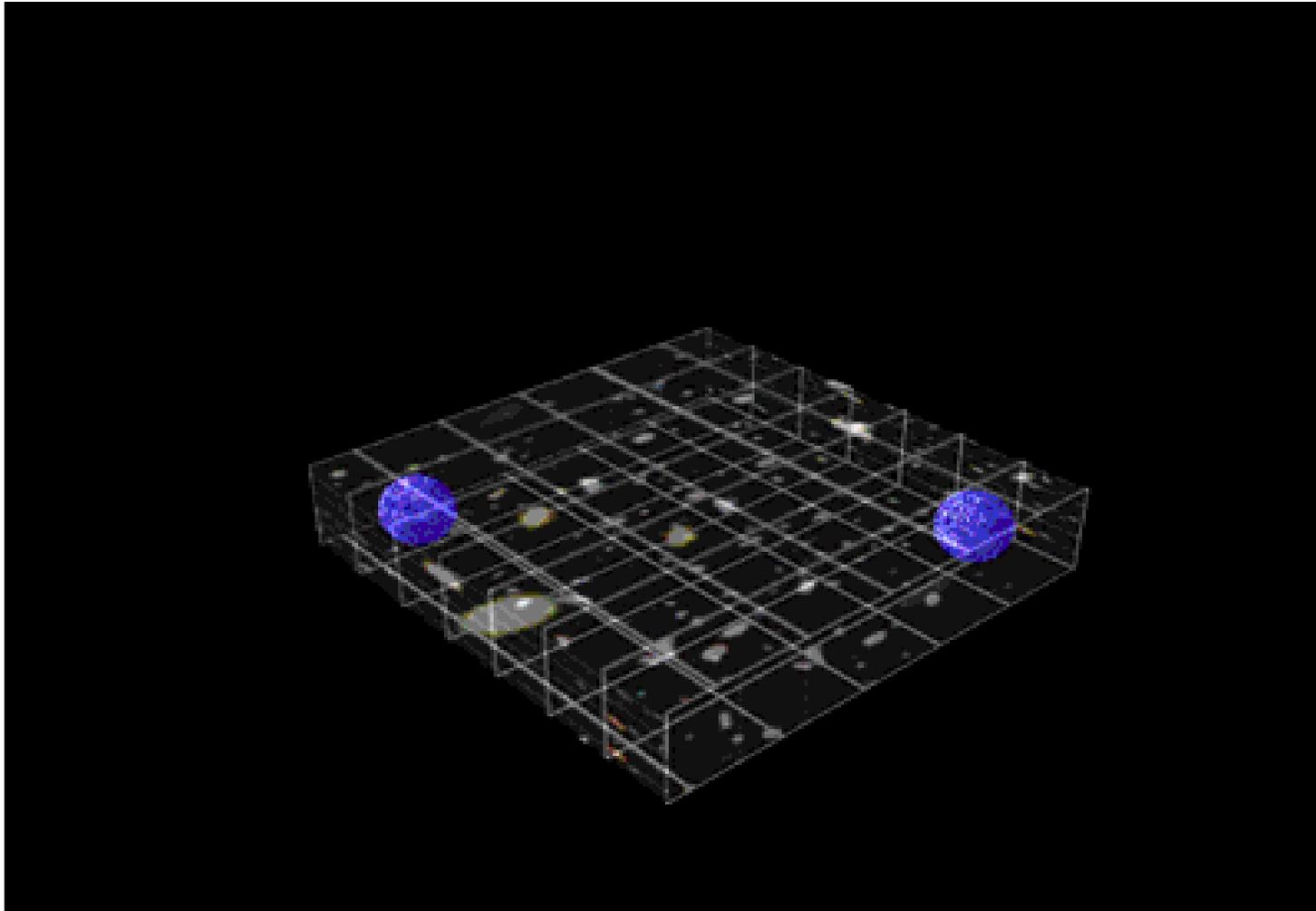
- Механизм нарушения электрослабой симметрии (механизм Хиггса) не доказан (бозон Хиггса не найден)
- СМ имеет ряд недостатков и нерешенных вопросов, которые очевидно не могут быть решены в рамках самой СМ



Главными задачами физической программы CMS являются

- Поиск бозона Хиггса в диапазоне масс от  $\sim 115$  ГэВ до  $1000$  ГэВ
- Поиск новой физики за пределами СМ

# Two-particle Interaction on the 3D-brane

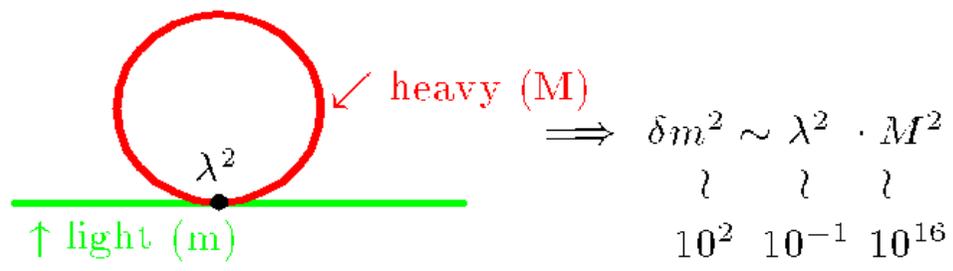


Extra dimensions can be large enough **R!!!**  $M^{-1} \left( \frac{M_{Pl}}{M} \right)^{2/d} \sim 10^{32/d} \times 10^{-17} \text{ sm}$   
 $\sim \mu\text{m}$  for a flat space

# Hierarchy

## Higgs selfenergy – quadratic divergency and fine tuning

First formulated by S.Weinberg '76



Radiative corrections to the "naked" higgs mass



very large contributions



must be compensated by a bare mass value  $m_0$ :

From the gauge sector  $\rightarrow m_H^2 = m_0^2 + (c_2 g^2 + c_4 g^4 + ..) \Lambda^2$

How large the UV scale  $\Lambda$  can be?  $\rightarrow$  Two standard UV cut-offs  $\rightarrow$

$M_{GUT} \approx 10^{16} GeV$

$M_{Pl} \approx 10^{19} GeV$

$\left(\frac{\eta}{\Lambda}\right)^2 \approx 10^{-28} - 10^{-34}$

Absolutely unclear what can provides fine-tuning at such a small level !

# Higgs bosons as a SM particle

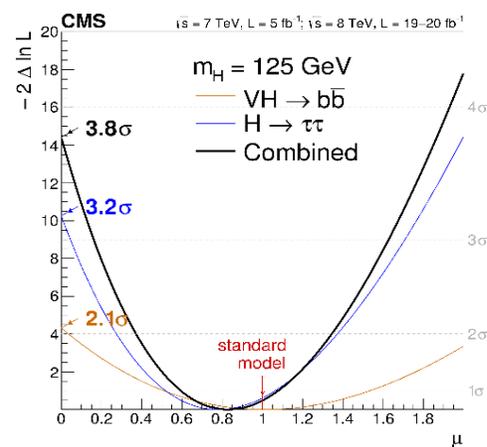
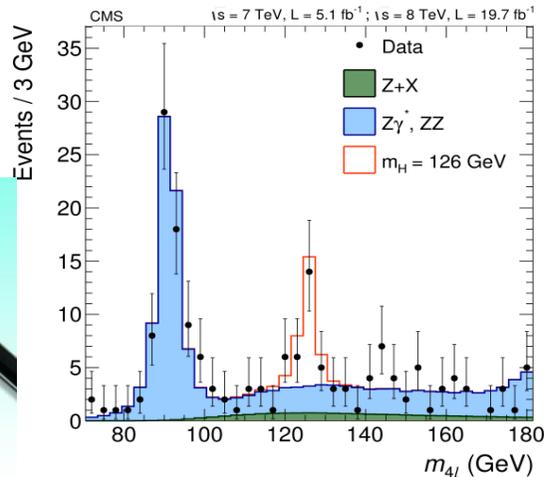
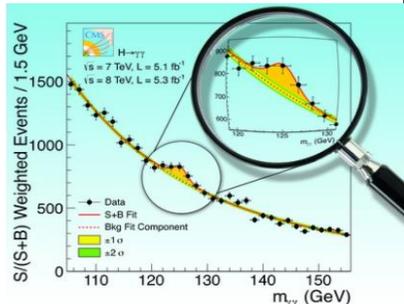
Higgs boson was observed in decays

✓ bosons:  $\gamma\gamma$  ( $5.7\sigma$ ),  $ZZ$  ( $6.8\sigma$ ),  $WW$  ( $4.3\sigma$ )

✓ fermions:  $bb$  ( $2.6\sigma$ ) and  $\tau\tau$  ( $3.2\sigma$ )

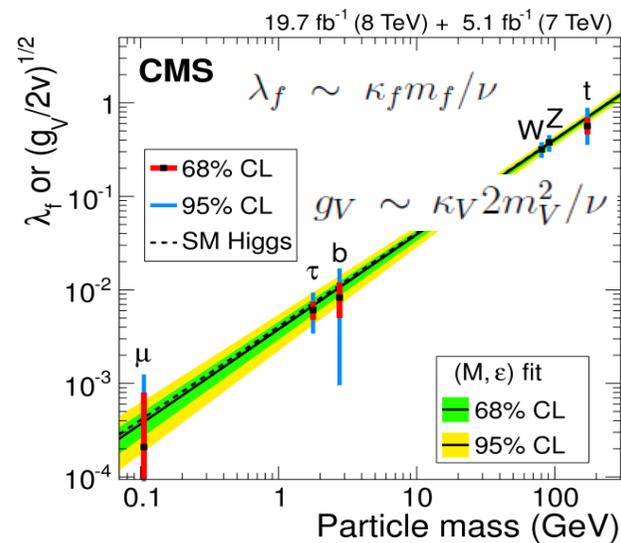
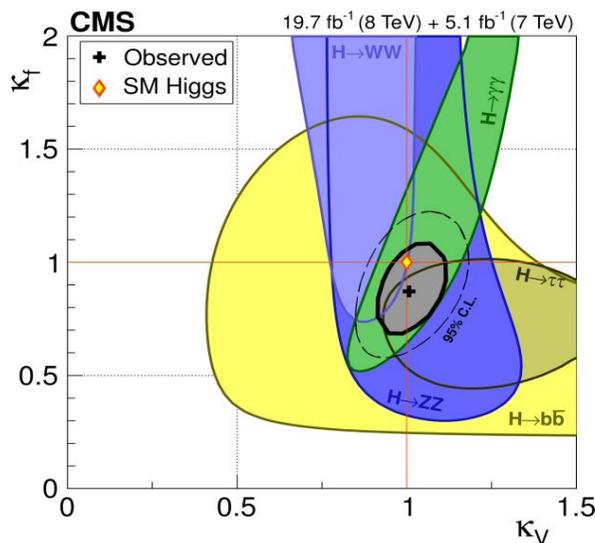
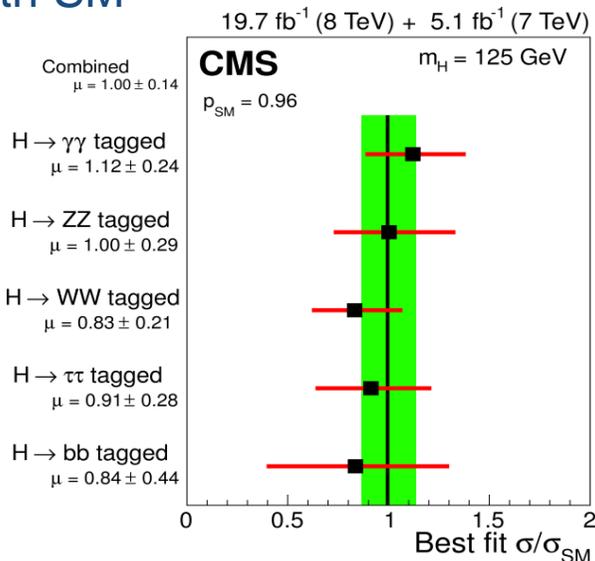
Higgs is  $0^+$  state ( $J^P$ )

Higgs width:  $< 22$  MeV  
( $4.15$  MeV in SM)



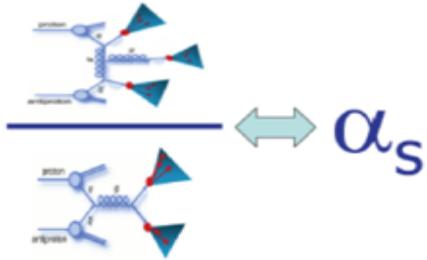
Signal strength is fully compatible with SM

Couplings fits SM predictions



No significant signal non-SM Higgs: any additional Higgs will indicate new physics

Ratio of 3-jets of 2-jets, 3-jet mass & inclusive jets x-sections constrain  $\alpha_s$  (NLO only) up to so-far unprobed scales  $Q \sim 1.4$  TeV



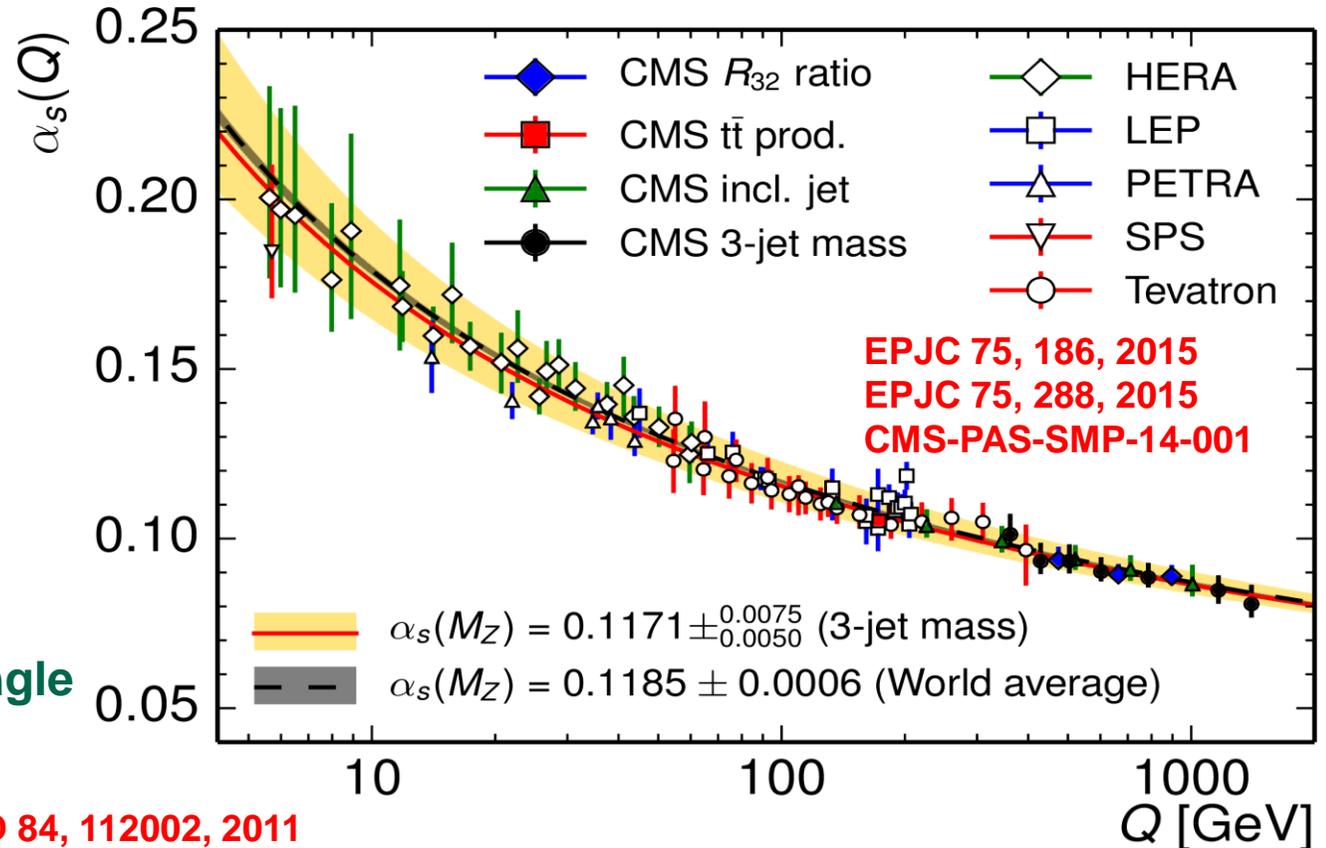
$$R_{32} = \frac{d\sigma_{3+}/dp_T}{d\sigma_{2+}/dp_T} \propto \alpha_s(Q)$$

$$Q = \langle p_{T1,2} \rangle = \frac{p_{T1} + p_{T2}}{2}$$

The effective weak mixing angle is measured with Drell-Yan processes

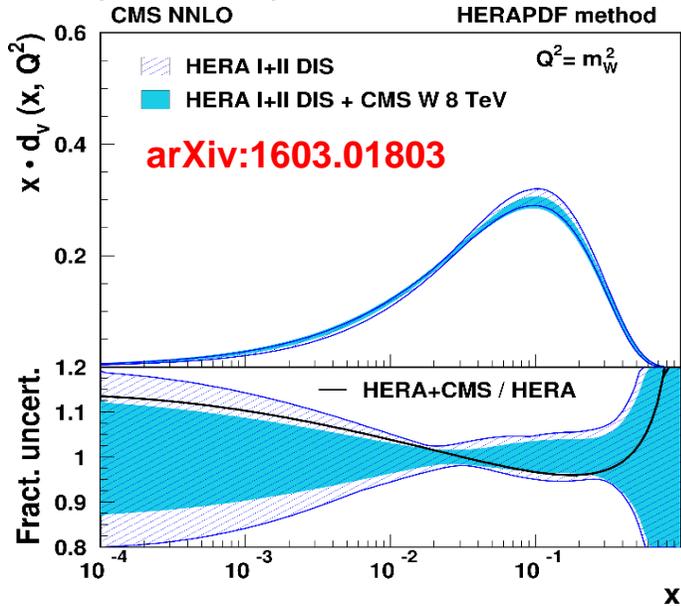
PRD 84, 112002, 2011

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}} = 0.2287 \pm 0.0020 \text{ (stat.)} \pm 0.0025 \text{ (syst.)}$$



A lot of PDF constraints with DY, jets, top etc

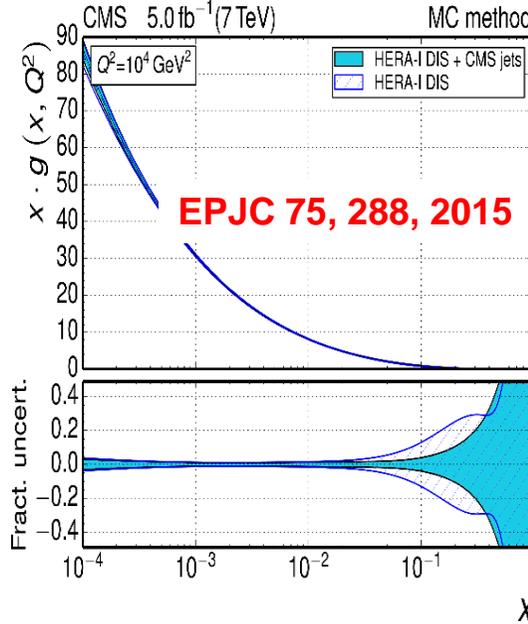
## Inclusive W and charged asymmetry



a significant improvement in the valence quark distributions in the range  $10^{-3} < x < 10^{-1}$

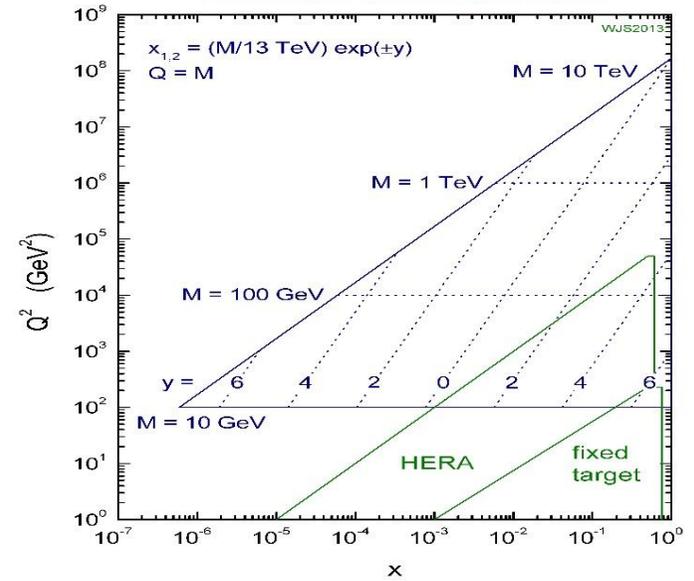
PDF4LHC15 recommendation: MMHT, CT and NNPDF improve significantly agreement due to new data

## Inclusive jets

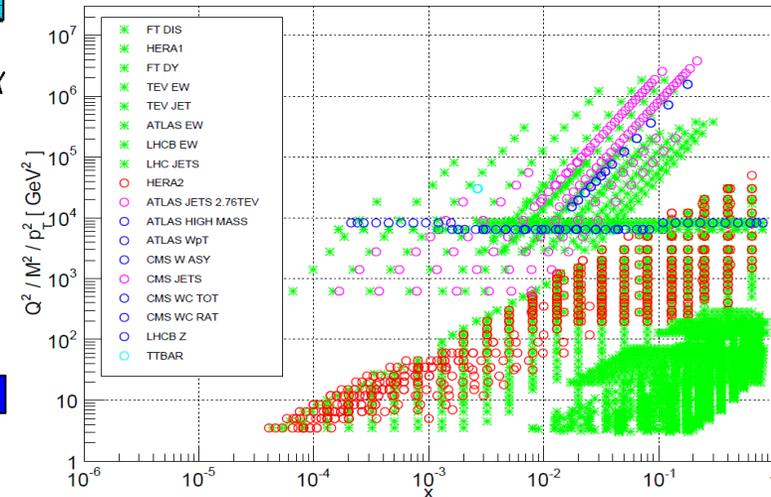


the uncertainty in the gluon distribution is significantly reduced for  $x > 0.01$

## 13 TeV LHC parton kinematics

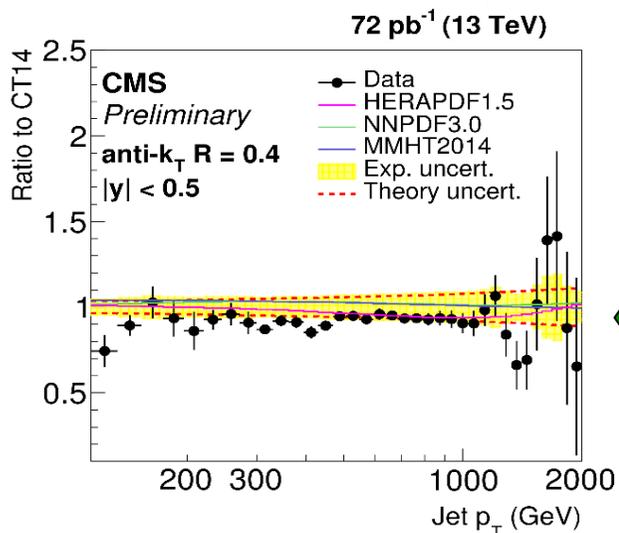
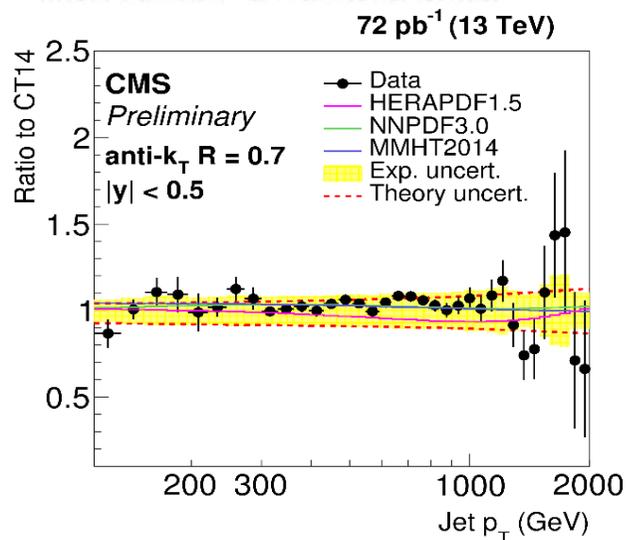
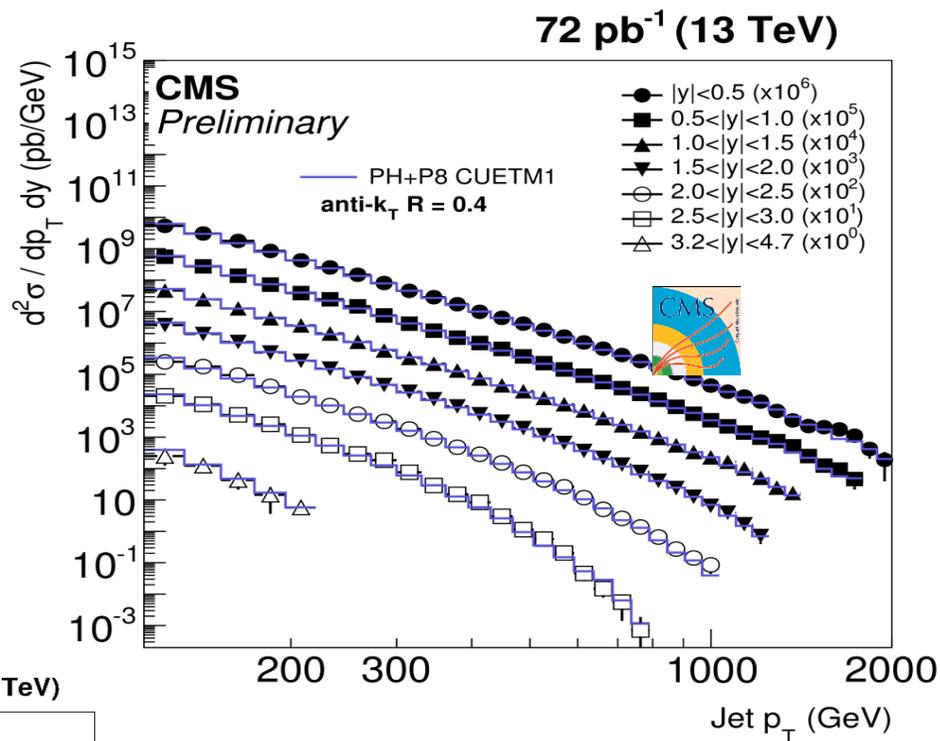
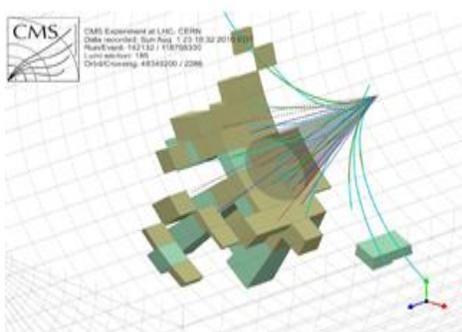


## NNPDF3.0 NLO dataset



Compared to Powheg + Pythia8, NLOJet++ and LO MC

Agreement with NLO is in general better than LO

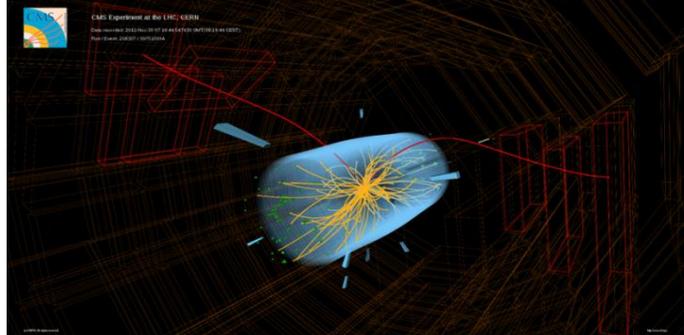


**Different behaviour observed between the two jet radii, indication of soft (out of cone) effects, it confirms earlier studies at 7 TeV**

PRD 90, 072006, 2014



# Rare decays: $B_s/B^0 \rightarrow \mu\mu$ (Run 1)



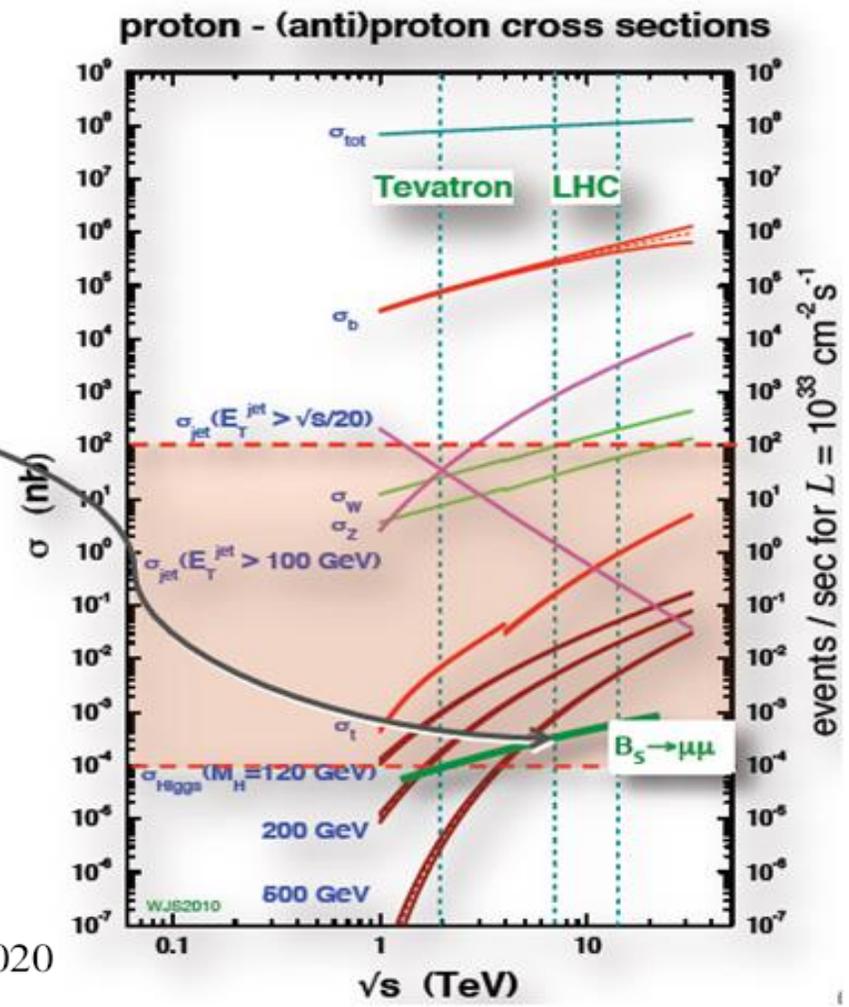
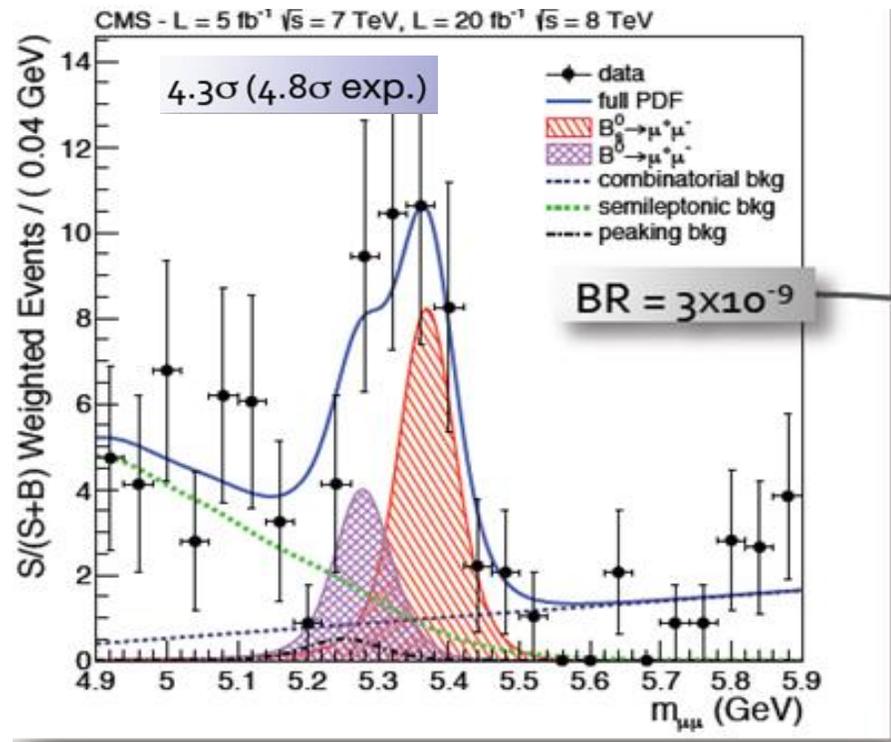
In the SM:

PRL 111 (2013) 101804

$\text{Br}(B_s \rightarrow \mu\mu) : (3.57 \pm 0.30) \times 10^{-9}$

$\text{Br}(B^0 \rightarrow \mu\mu) : (1.07 \pm 0.10) \times 10^{-10}$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{N_S}{N_{\text{obs}}^{B^+}} \frac{f_u}{f_s} \frac{\epsilon_{\text{tot}}^{B^+}}{\epsilon_{\text{tot}}} \mathcal{B}(B^+)$$



$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0_{-0.9}^{+1.0}) \times 10^{-9}$   
 $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.1 \times 10^{-9}$

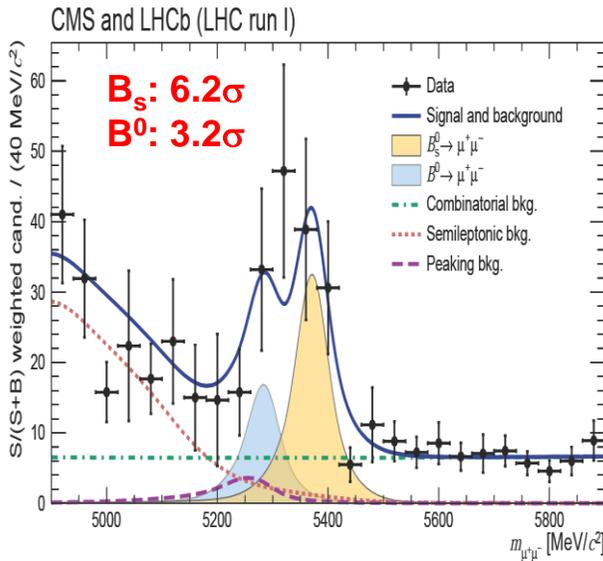
LHCb : ( $\delta \sim 5\%$ )  
 $f_s/f_u = 0.256 \pm 0.020$

## 30 years history

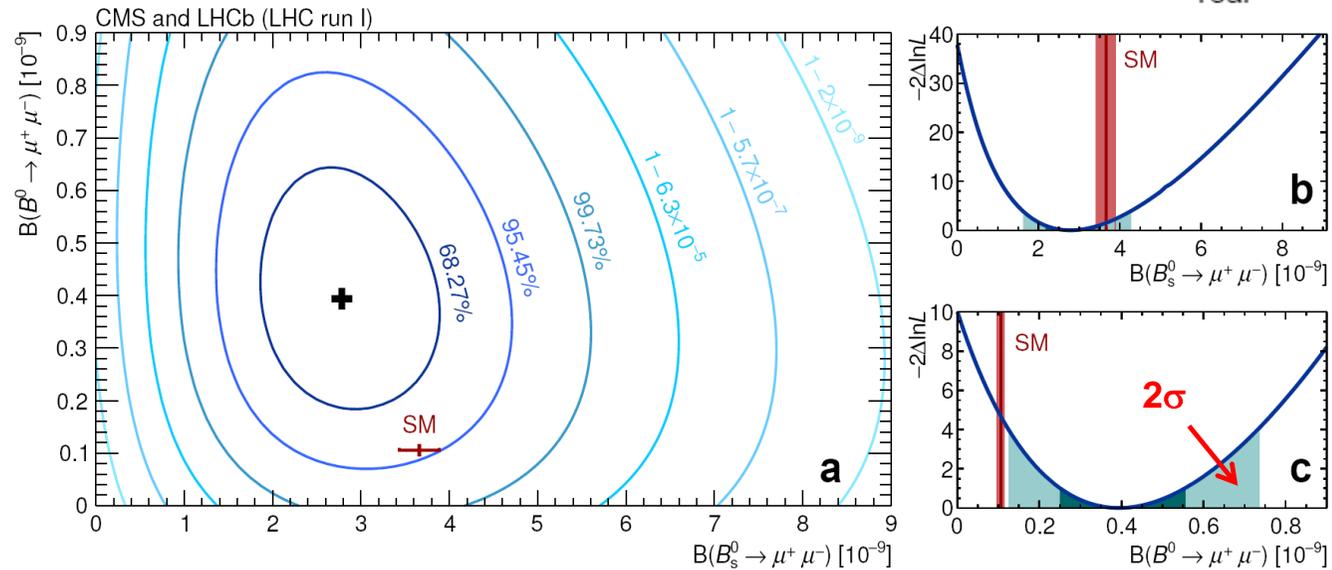
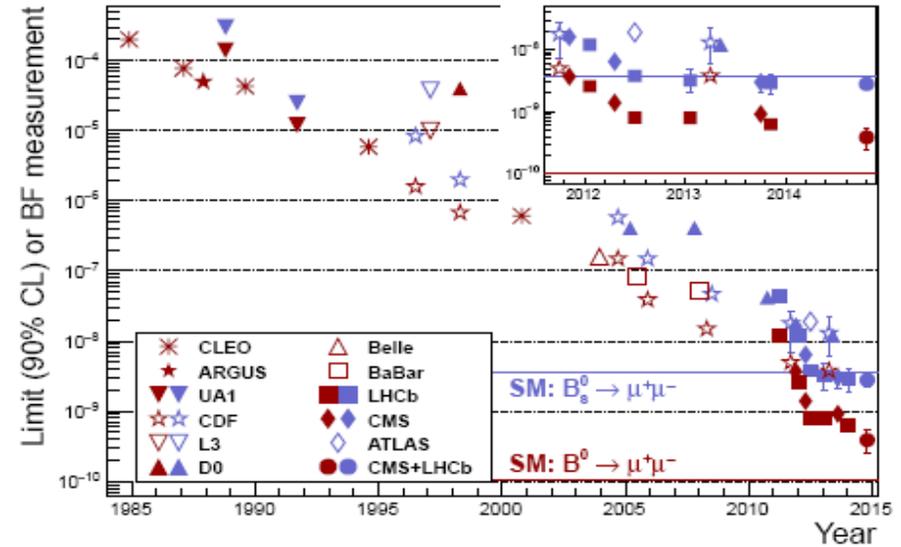
## CMS and LHC-B combined

$$B(B_S \rightarrow \mu\mu) = 2.8_{-0.6}^{+0.7} \times 10^{-9} \quad (6.2\sigma) \quad | \quad \text{SM: } 3.7 \pm 0.2 \times 10^{-9}$$

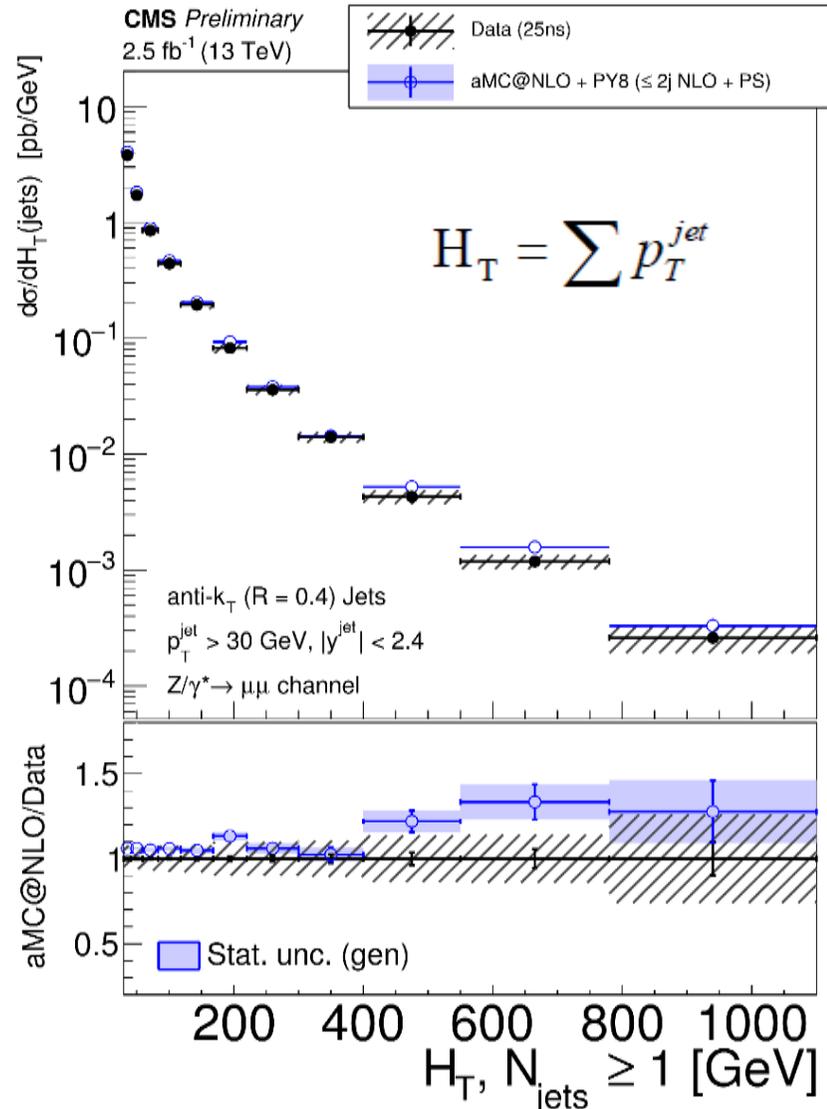
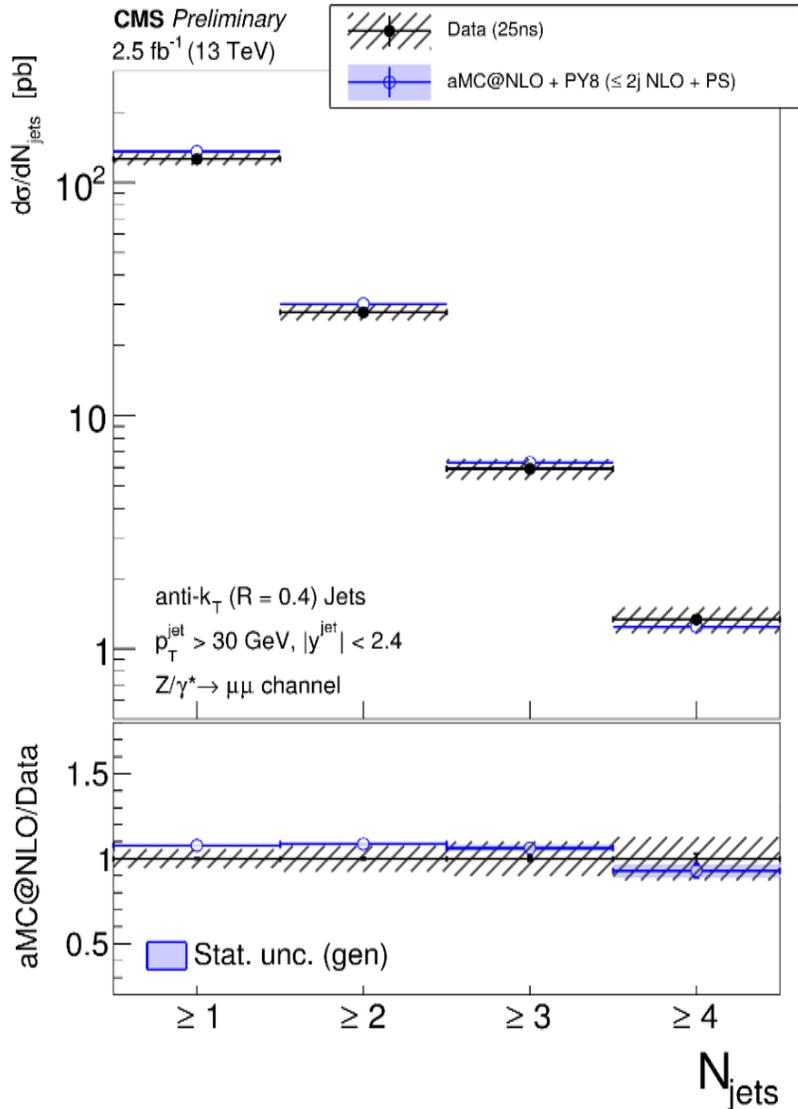
$$B(B \rightarrow \mu\mu) = 3.9_{-1.4}^{+1.6} \times 10^{-10} \quad (3.2\sigma) \quad | \quad \text{SM: } 1.1 \pm 0.1 \times 10^{-10}$$



The measured branching fractions of both decays are compatible with SM predictions.

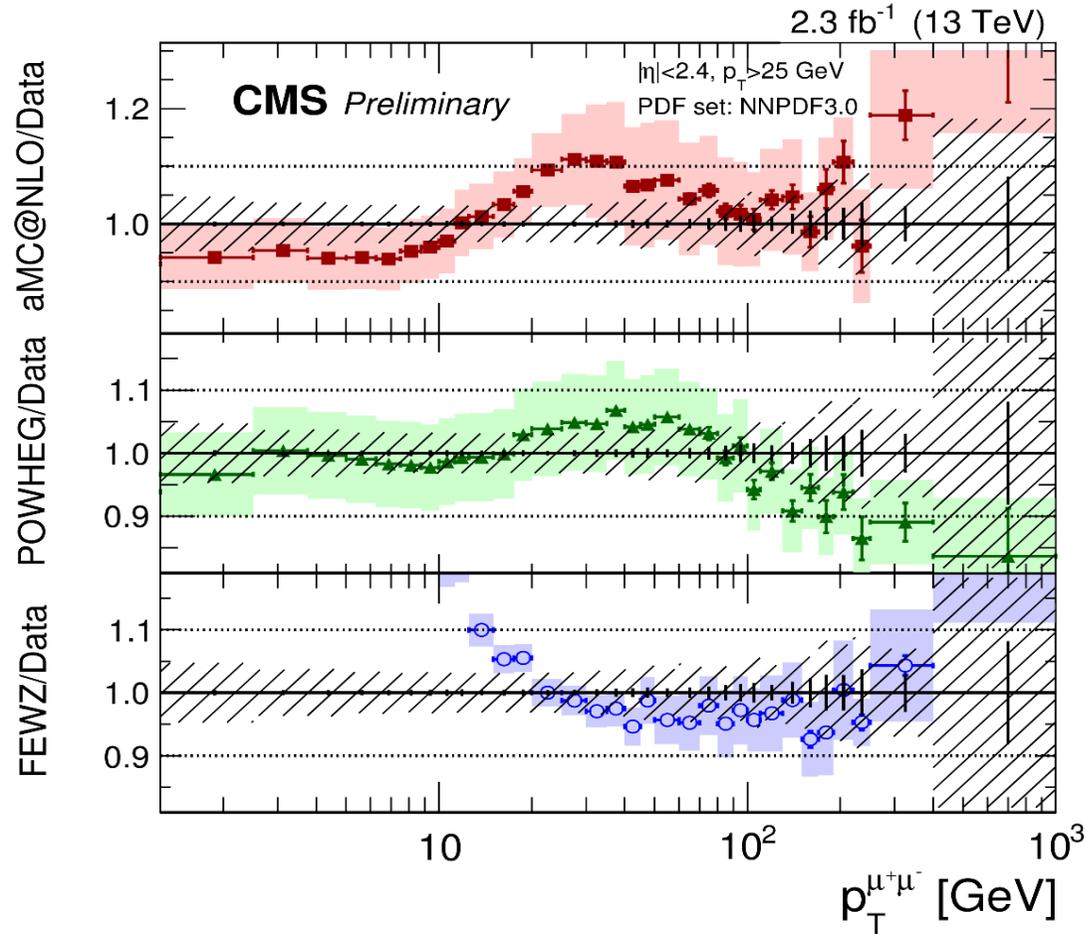


$B^0$  is significant for 3000 fb<sup>-1</sup>

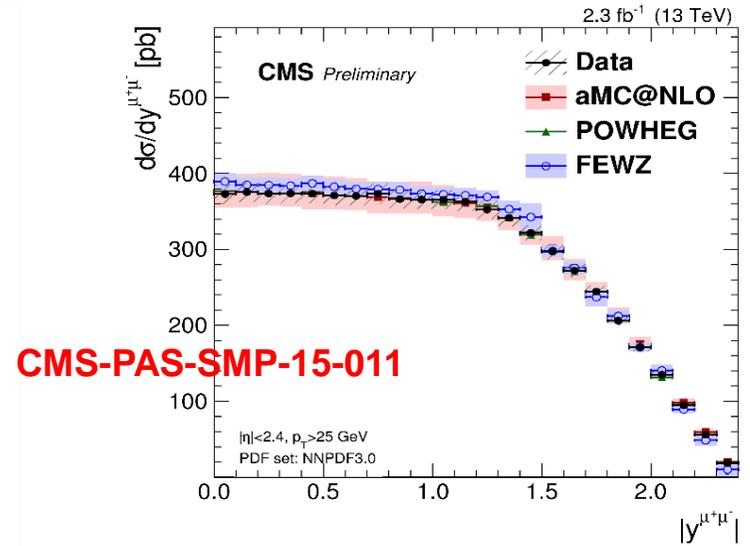


# EWK Processes: Z differential x-section

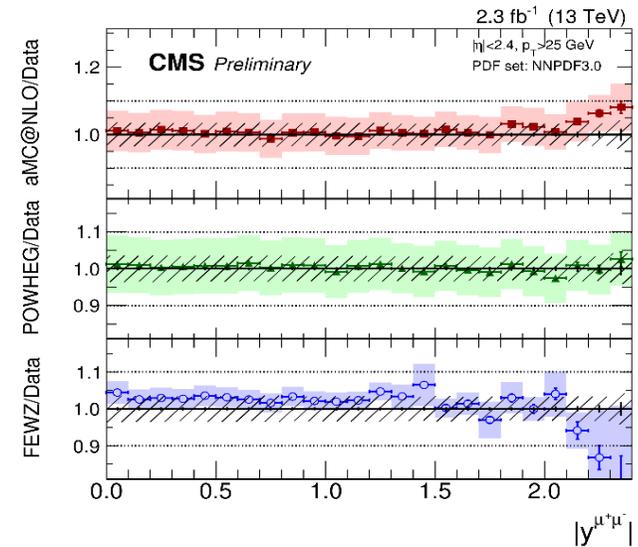
$$\sigma(pp \rightarrow ZX) \times \mathcal{B}(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = 1870 \pm 2 \text{ (stat)} \pm 35 \text{ (syst)} \pm 51 \text{ (lumi)} \text{ pb}$$



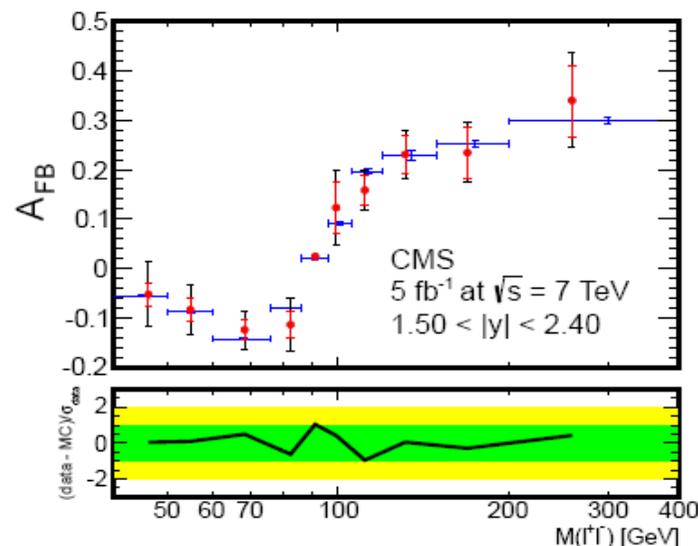
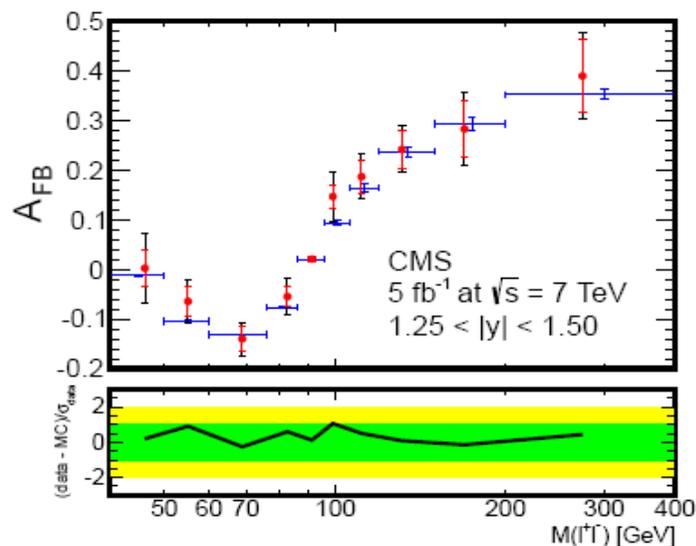
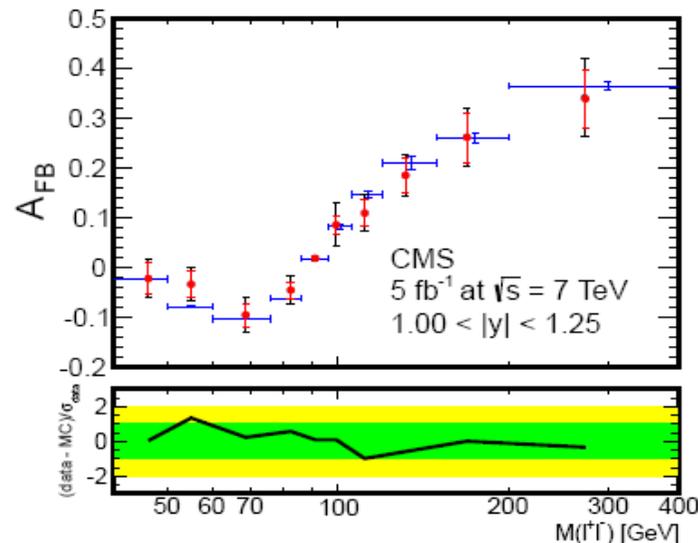
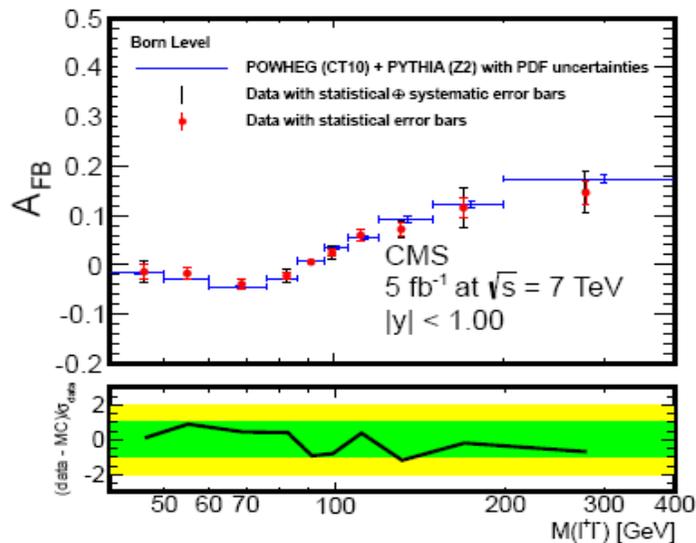
Results consist with SM predictions



CMS-PAS-SMP-15-011



# Асимметрия “вперед-назад” (7 TeV)



arXiv:1207.3973 ; Phys. Lett. B 718 (2013) 752

## Kinematics:

- Oppositely charged electrons
- $|\eta| < 1.444$  or  $1.566 < |\eta| < 2.5$
- HLT ECAL L1-trigger requiring an ECAL cluster with minimum  $E_T$  between 10 to 17 GeV

## Quality requirements:

- Minimum supercluster  $E_T$  of 20 GeV
- No missing Tracker hits before the first one
- Reject when a conversion partner track close to the electron
- Using shower shape variables

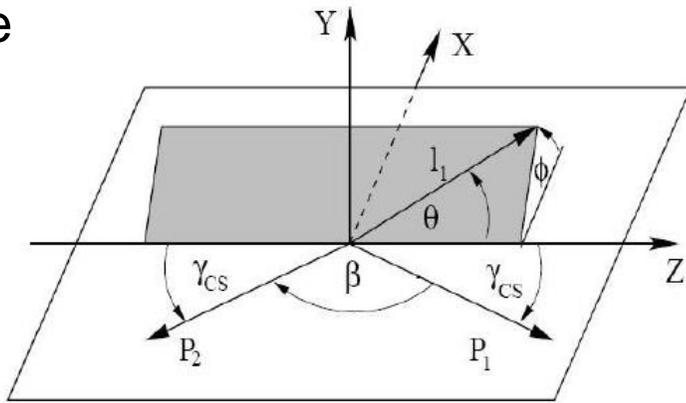
## Isolation:

- Isolation using the Tracker and calorimeters

# Drell-Yan Angular Distributions

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = A(1 + \cos^2\theta) + B\cos\theta$$

$\theta$  - angle between the lepton momenta and a z axis that bisects the angle between the quark momentum and the anti-quark momentum in the Collins-Soper frame



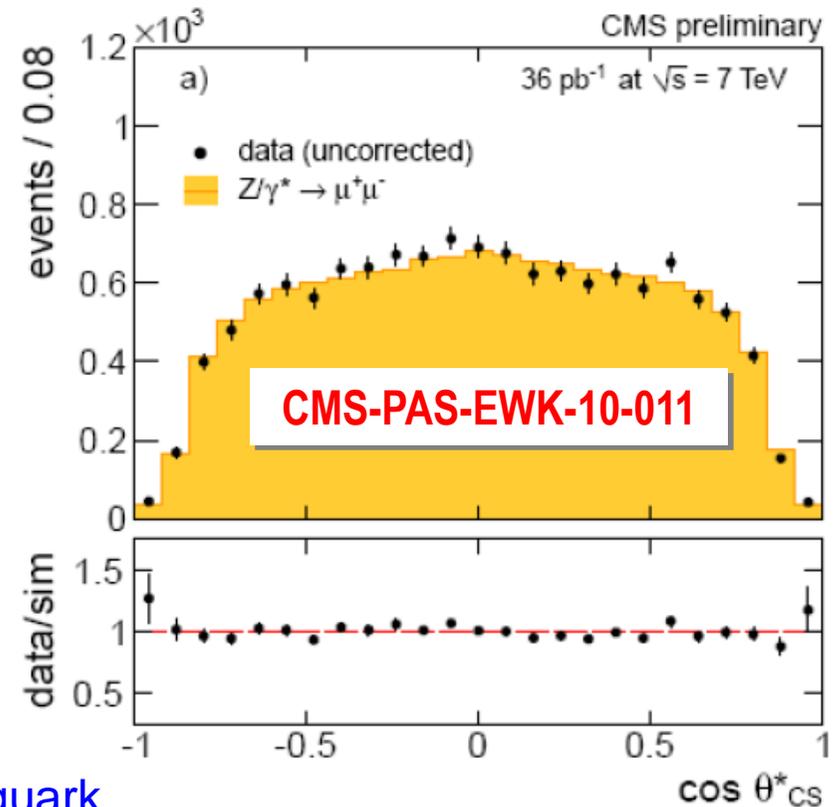
for pp collider the quark direction is unknown



boost direction of dimuon approximates quark direction

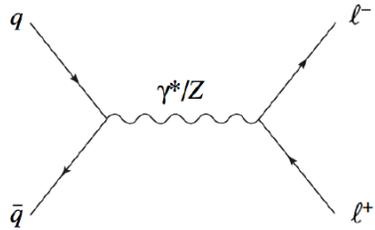


mistag probability (fraction of events with wrong quark direction) – dilution effect is more significant for small values of dilepton rapidity



# Асимметрия “вперед-назад” (1)

arXiv:1601.04768 , Submitted to Eur. Phys. J. C



$$\frac{g}{2\cos\theta_W} \sum \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu$$

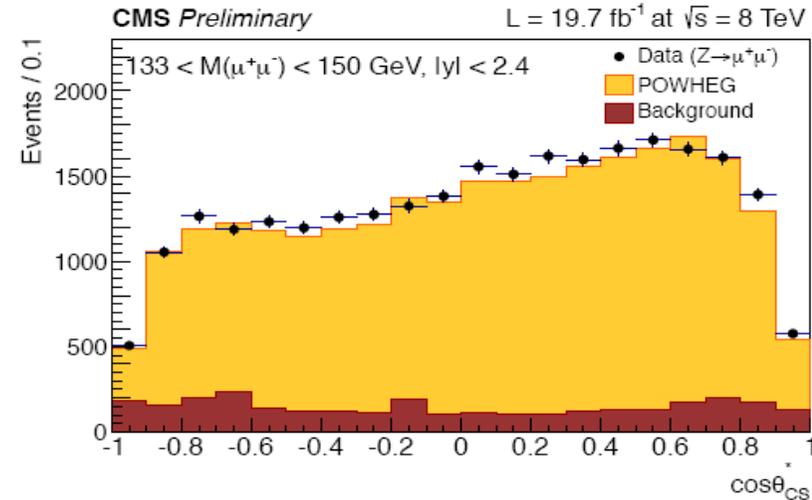
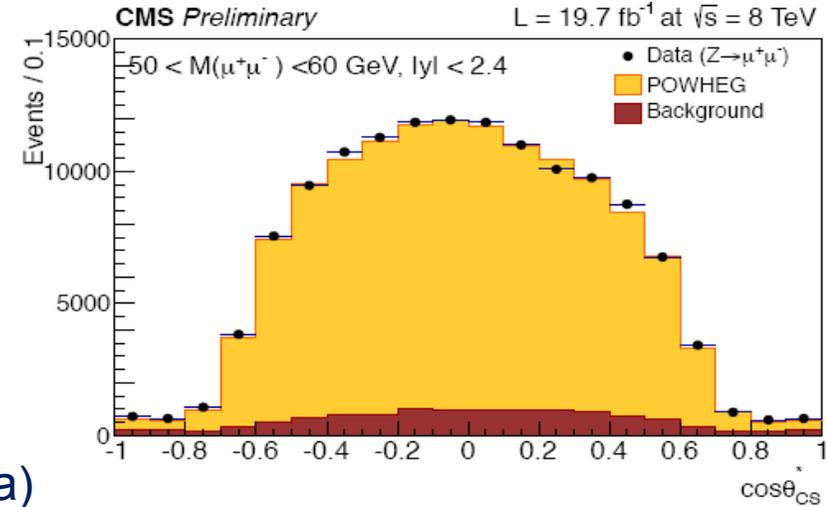
$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \left[ \frac{3}{8} A(1 + \cos^2\theta) + B \cos\theta \right]$$

V-A структура слабых токов приводит к нарушению P-четности и асимметрии по углу вылета лептона относительно фиксированного направления (кварка)

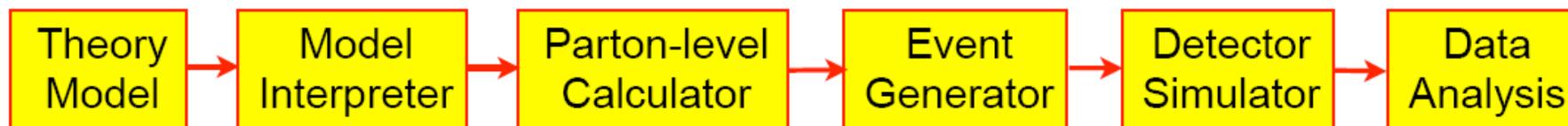
$$A_{FB} \simeq A_{FB}(m_Z^2) + \frac{(s - m_Z^2)}{s} \frac{3\pi\alpha(s)}{\sqrt{2}G_F m_Z^2} \times \left[ \frac{2(x_u + x_c + x_t)}{1 + (1 - \frac{8}{3}\sin^2\theta_W)^2} + \frac{x_d + x_s + x_b}{1 + (1 - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W)^2} \right] \times \frac{1}{1 + (1 - 4\sin^2\theta_W)^2},$$

где бегущая константы связи КХД

$$\alpha(s) = \frac{\alpha}{1 - \Delta\alpha - \frac{\alpha}{3\pi} \frac{38}{9} \log \frac{s}{m_Z^2}}.$$



# From Matrix Element to Likelihood



event data

theory model

measured visible momenta

true visible momenta

$$\mathcal{P}(\mathcal{E}_i | H_\alpha) = \frac{1}{\sigma(H_\alpha)} \times \left[ \prod_{j=1}^{N_{vis}} \int \frac{d^3 p_j}{(2\pi)^3 2E_j} \right] \times T(\{\tilde{p}_j\}, \{p_j\}) \times \left[ \prod_{k=1}^{N_{inv}^{(\alpha)}} \int \frac{d^3 q_k}{(2\pi)^3 2E_k} \right] \sum_{a,b} \frac{f_a(x_1) f_b(x_2)}{2s x_1 x_2} |\mathcal{M}_{H_\alpha, ab}(\{p_j\}, \{q_k\})|^2$$

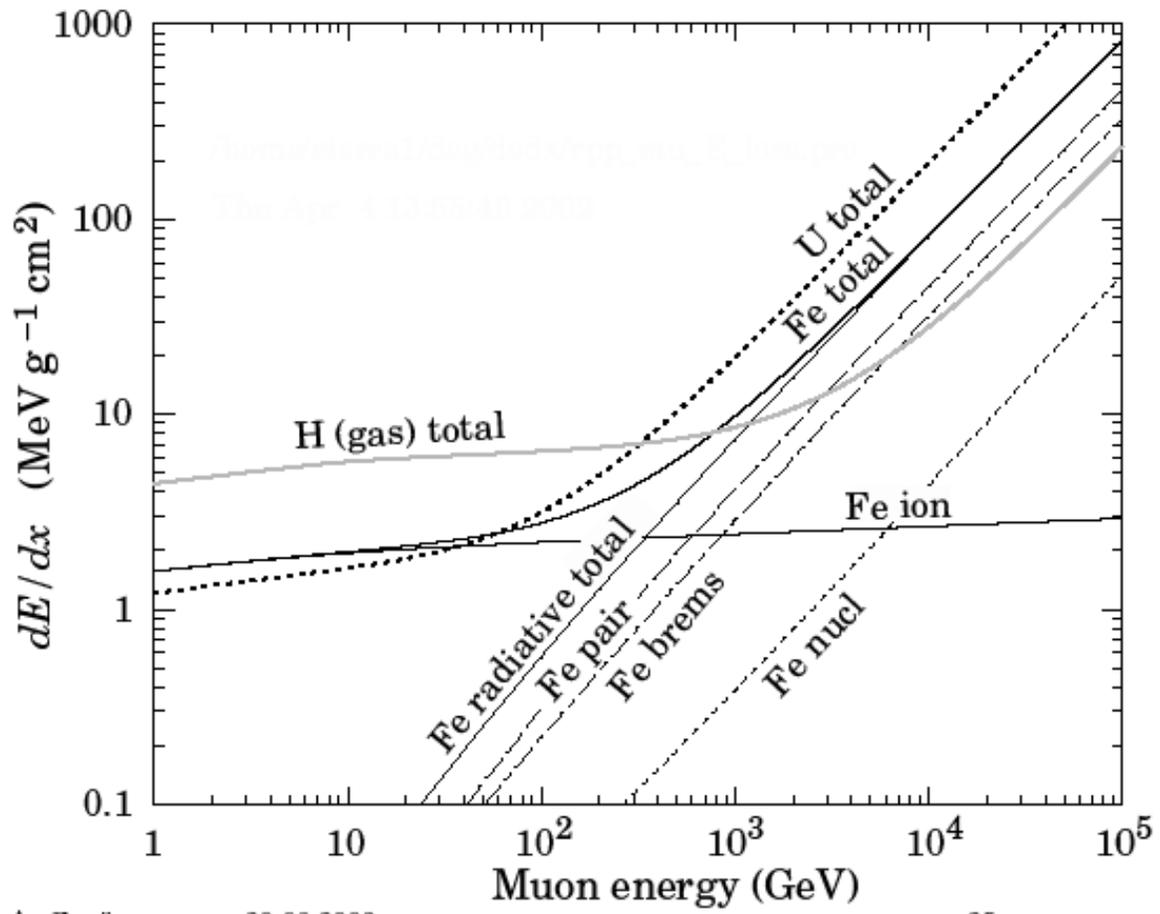
total cross-section

parton distribution functions

invisible momenta



# Средние потери энергии мюона в водороде, железе и уране как функция энергии мюона (PDG)



А. Ланёв

20.08.2003

25



# Online: Система набора данных на линии с ЭВМ



- Много-уровневый триггер - запуск установки
  - Фильтрация фона
  - Уменьшение объема данных
  - Фактор Online подавления -  $10^7$
- Меню триггера
  - Выбор интересующих событий
  - Фильтрация неинтересных событий

В эксперименте CMS поток данных с детектора уменьшается с 1000 TB/sec (1TB= $10^{12}$  Bytes) на входе триггера первого уровня до 100 MB/sec на выходе триггера третьего уровня.

С такой скоростью данные будут записываться на магнитную ленту или, возможно, на диски в течении нескольких лет для



CMS событие	- 1 МБ
триггер L1	- 75 ГБ/с
триггер HTL	- 0.1 ГБ/с
ПОТОК	~

3 ПетаБ/год