

Результаты эксперимента “Компактный мюонный соленоид (CMS)” на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН

С.В. Шматов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

shmatov@cern.ch

X Зимняя Дубненская международная школа современной теоретической физики (DIAS-TH)

“Физика на Большом адронном коллайдере”

Объединенный институт ядерных исследований (Дубна)

05 февраля 2012 года

- Компактный мюонный соленоид
 - ✓ возможности по измерению частиц (detector performance)

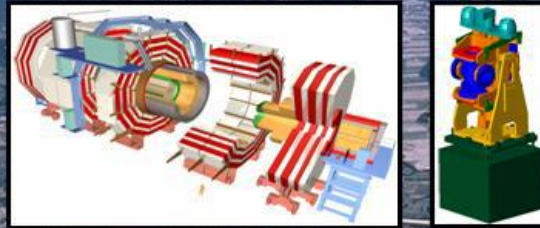
- Как осуществляется обработка и анализ данных
 - ✓ набор данных
 - ✓ обработка и отбор данных
 - ✓ сравнение с теорией (моделирование) \Rightarrow генераторы событий
 - ✓ анализ данных

- Примеры результатов эксперимента CMS
 - ✓ стандартная модель
 - ✓ поиск бозона Хиггса
 - ✓ суперсимметрия
 - ✓ физика за пределами SM \Rightarrow дополнительные измерения, расширенный калибровочный сектор,

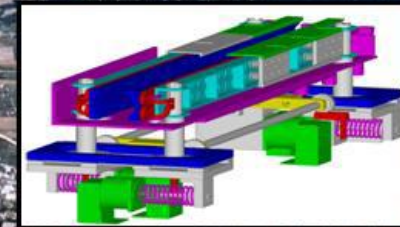
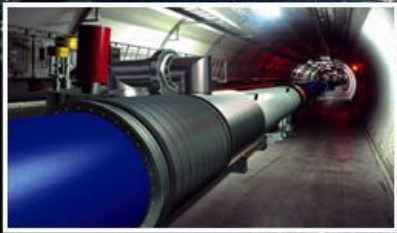
- Ожидания и планы
 - ✓ набор данных
 - ✓ физика

Эксперимент
"Компактный мюонный соленоид"
Compact Muon Solenoid

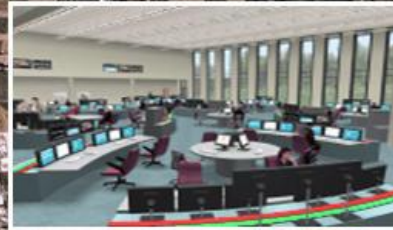
Четыре эксперимента на LHC



Compact Muon Solenoid (CMS)
+ TOTEM (TOTAL Elastic and
diffractive cross section Measurement)



LHC-B



LHCf

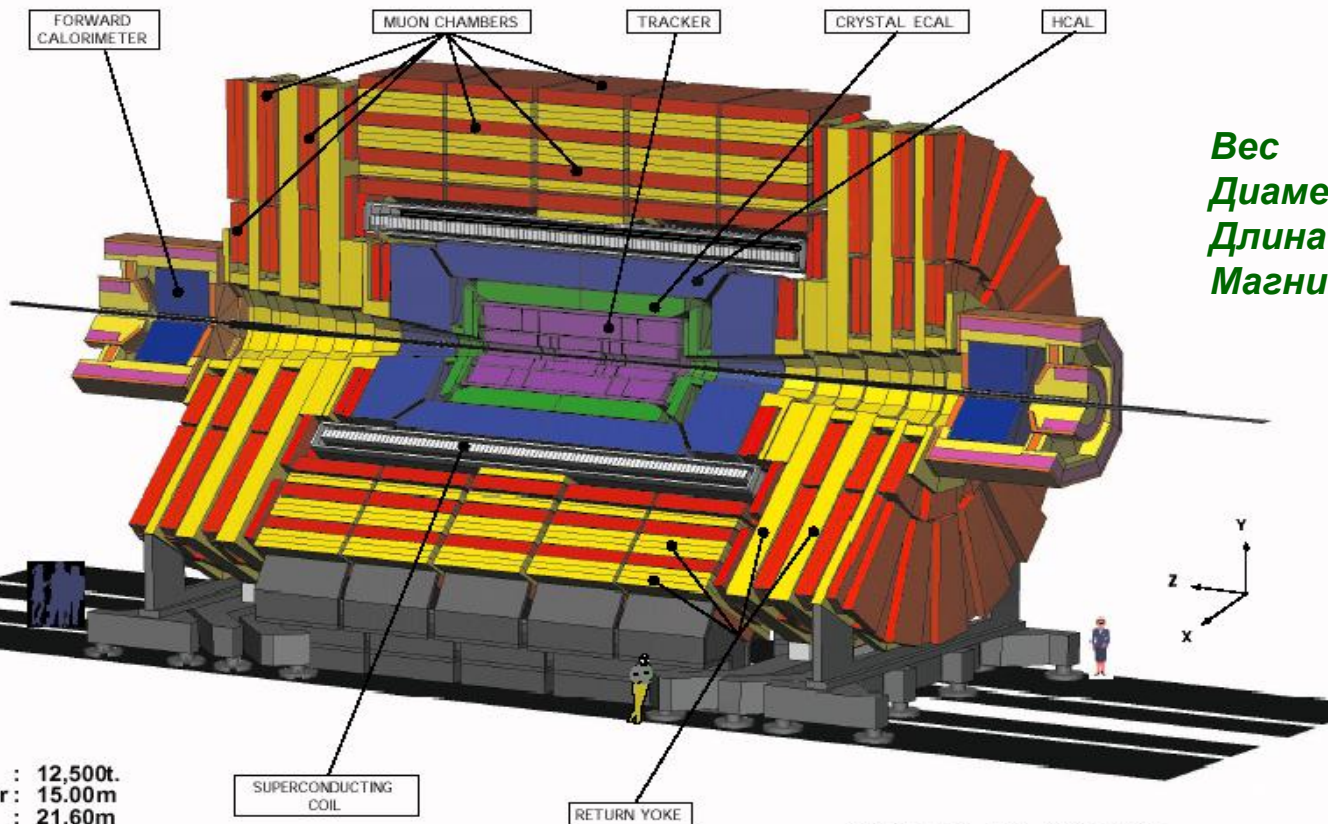


A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)

A Large Ion Collider
Experiment (ALICE)

Эксперимент CMS

CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC



Вес 12 500 t
Диаметр 15.00 m
Длина 21.6 m
Магнитное поле 3.9 Tesla

Total weight : 12,500t.
Overall diameter : 15.00m
Overall length : 21.60m
Magnetic field : 4 Tesla

CMS-PARA-001-11/07/97 JLB.PP

Детекторные системы спроектированы для измерения:
энергии и импульса фотонов, электронов, мюонов, струй, а также значений недостающей (потерянной) энергии до значений нескольких ТэВ

Компактный Мюонный Соленоид - CMS

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД

диаметр 15 м
длина 21.6 м
поле 4 Тесла

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР

сцинтиллирующие кристаллы PbWO_4
76 тыс. каналов
кремниевый стриповый предливневый детектор
18 кв. метров, 144 тыс. каналов

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

пластический сцинтиллятор/латунь
8 тыс. каналов

ВОЗВРАТНОЕ ЯРМО

ТРЕКЕР

Кремниевые микростриповые
и пиксельные детекторы
223 кв. метров
10 млн. каналов

МЮОННАЯ СИСТЕМА: ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

камеры из дрейфовых труб
250 камер
192 тыс. каналов

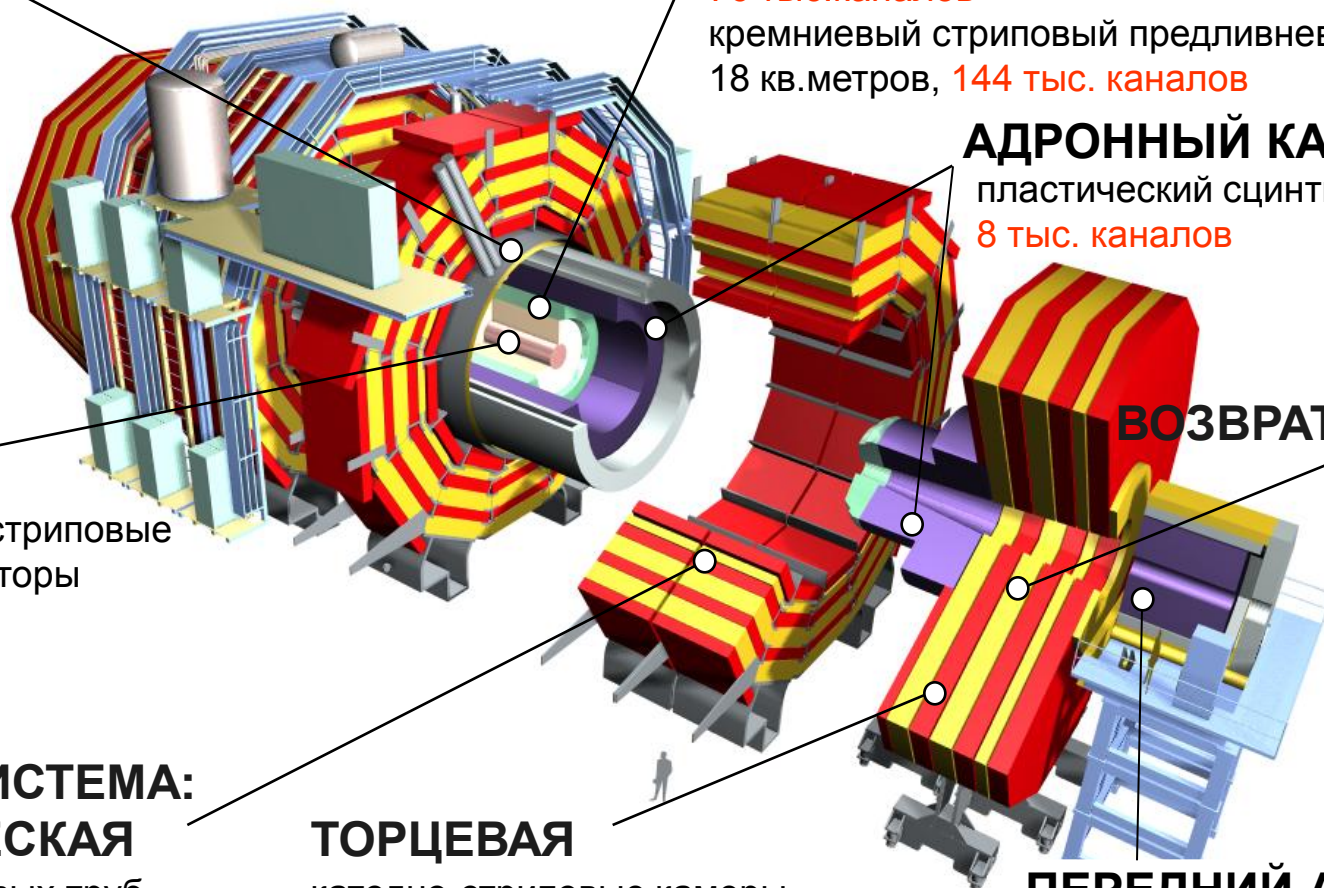
Резистивные планарные камеры для триггера - RPC - 760 камер

ТОРЦЕВАЯ

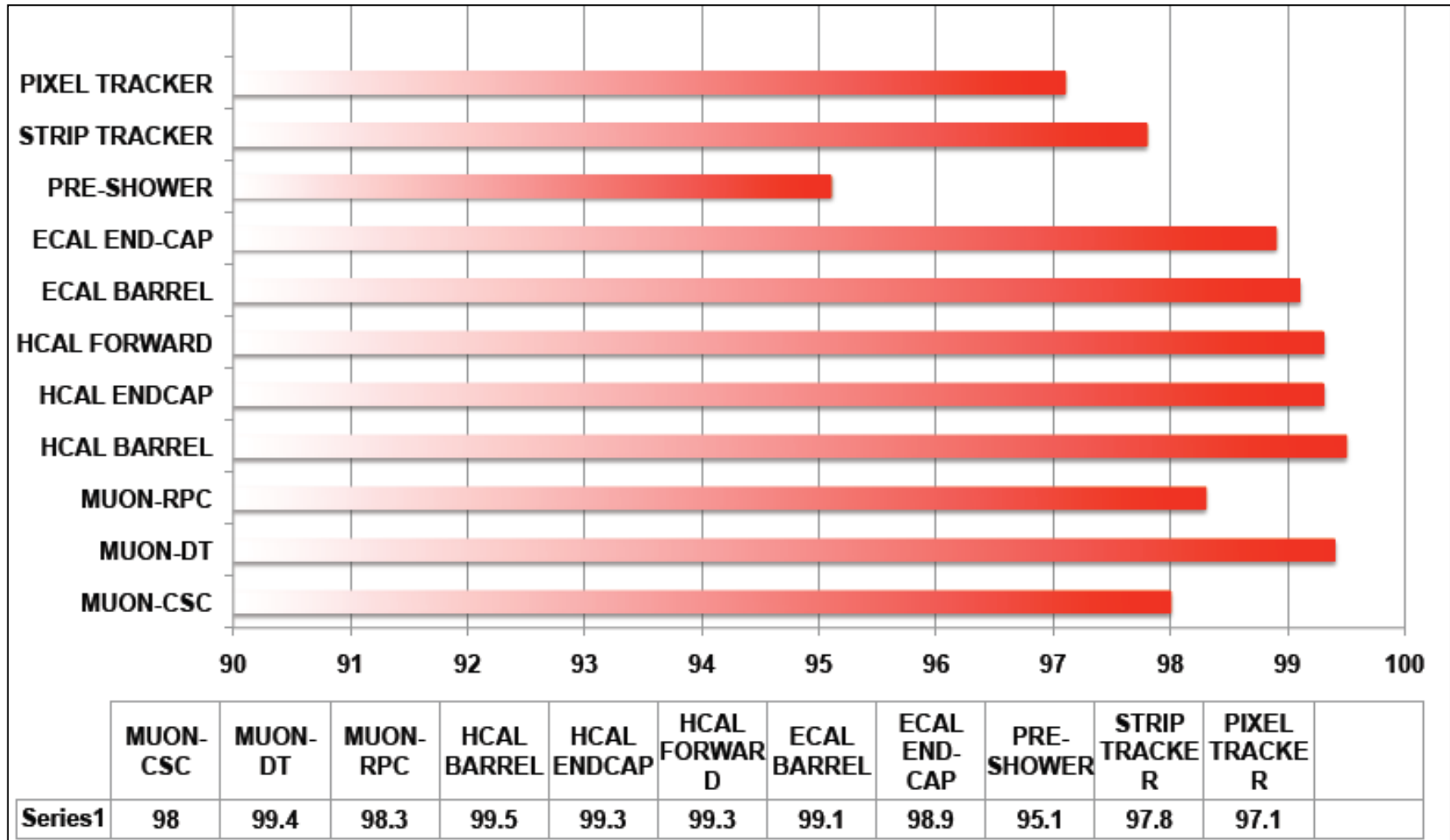
катодно-стриповые камеры
540 камер
310 тыс. каналов

ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

кварцевое волокно/железо
2 тыс. каналов



Эффективность работы детекторных систем в 2011 г.

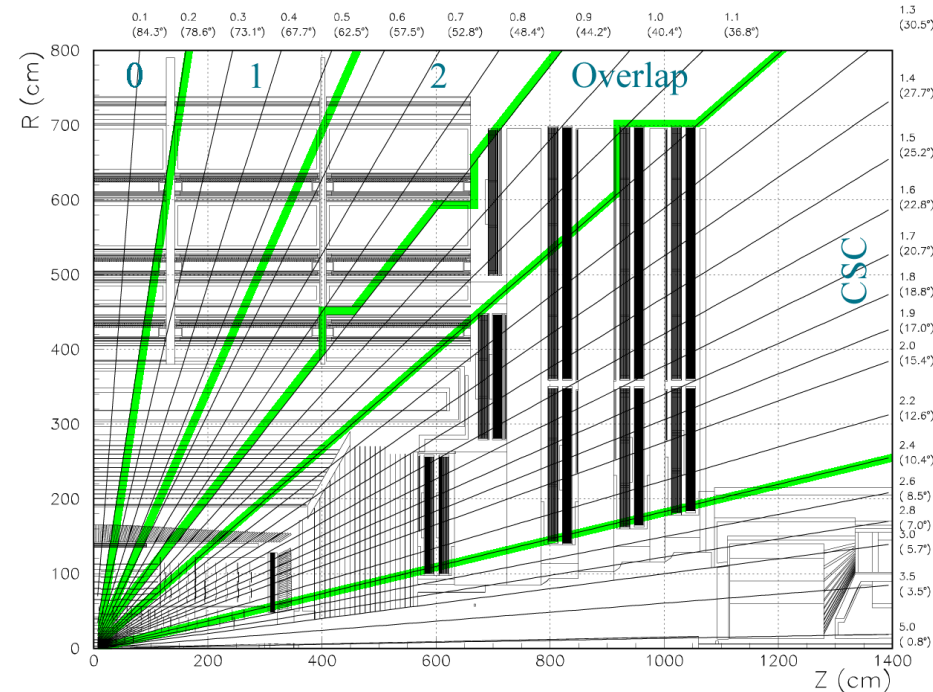
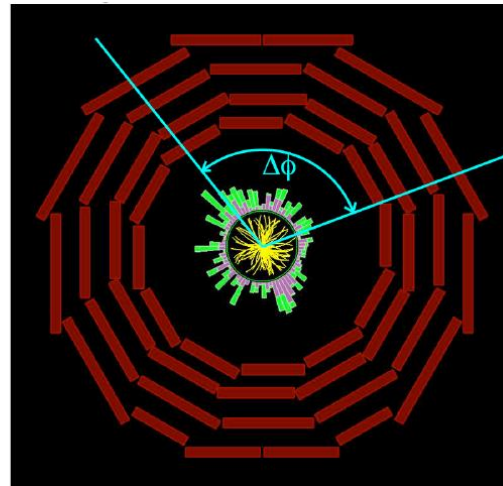
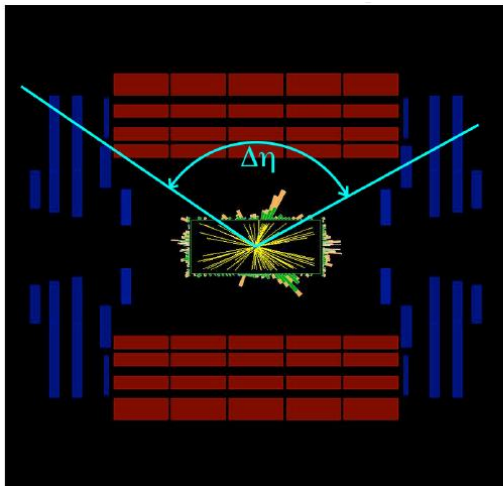
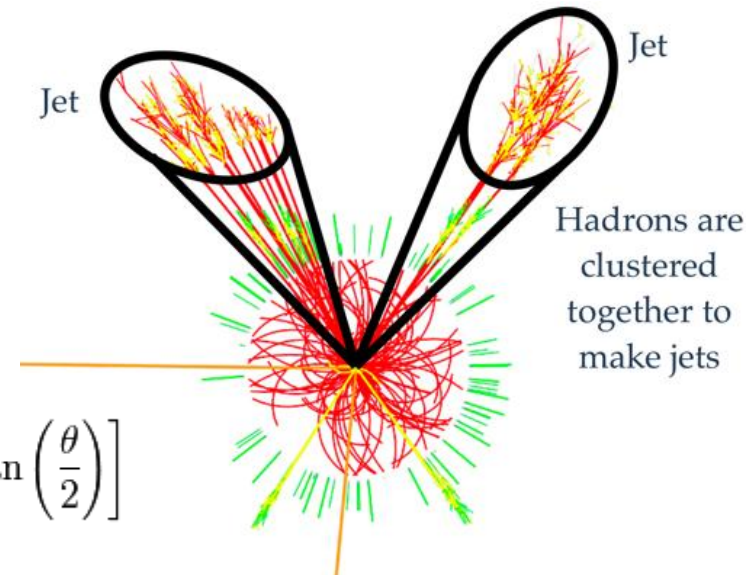


Физические объекты

- ❑ Мюоны (поперечный импульс)
- ❑ Электроны (энергия и поперечный импульс)
- ❑ Фотоны (энергия)
- ❑ Струи (энергия)
- ❑ Потерянная энергия (энергия)

+ азимутальный угол и полярный угол
(или псевдобыстрота)

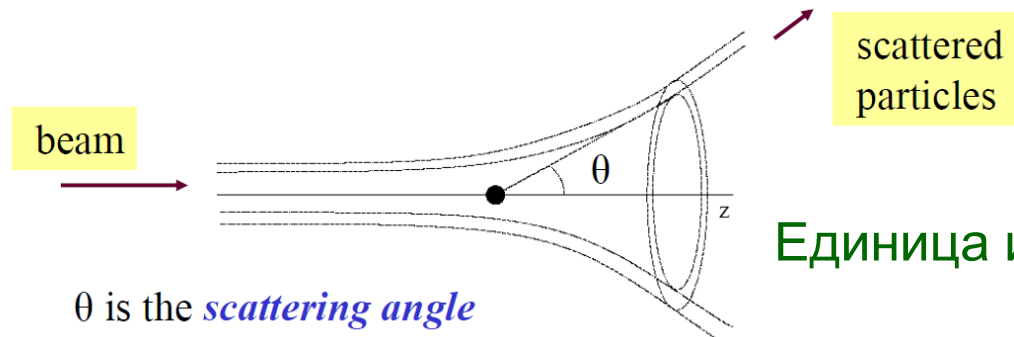
$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$



CMS – установка с 4π-геометрией,
покрывающая 360° по φ и |η| ≤ 5.0 (0.8°)

Некоторые цифры и определения

Дифференциальное сечение



$$d\sigma(\theta) = \frac{N(\theta)d\Omega}{N_0}$$

Единица измерений сечения: 1 барн = 10^{-28} м²

Характеристика пучков коллайдера – светимость (пиковая):

$$\mathcal{L} = f n_1 n_2 / 4\pi \sigma_x \sigma_y$$

f – частота столкновений сгустков пучков, n_1 и n_2 – число частиц в сгустках, σ_x и σ_y – поперечный размер пучка (ширина ρ -ния Гаусса)

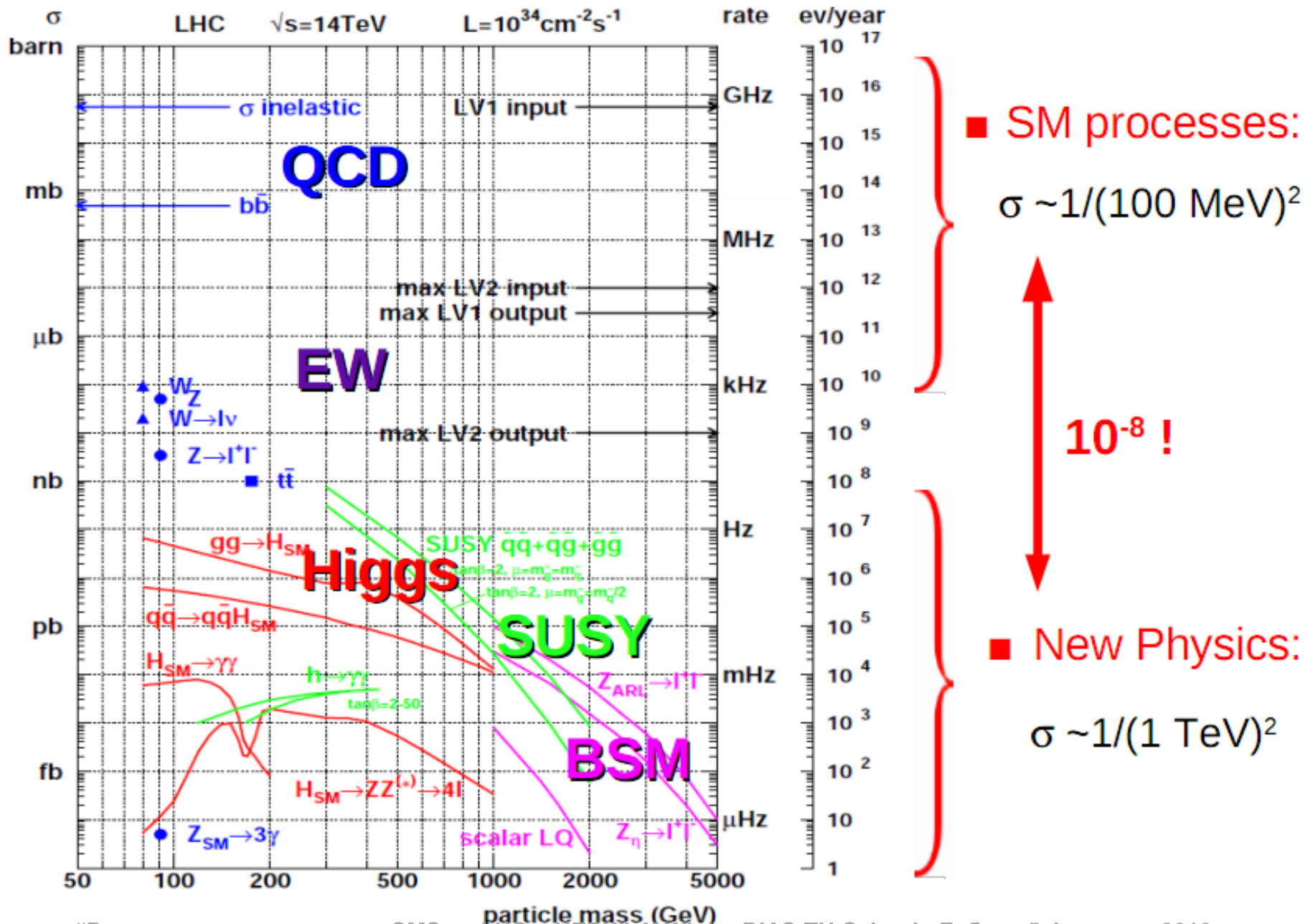
Единица измерений пиковой светимости: $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (светимость LHC = $10^{33}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (проектная - $10^{34}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)

Светимость за определенной временной промежуток – **интегральная светимость**: $L_{int} = L_{peak} * T$ (барн⁻¹)

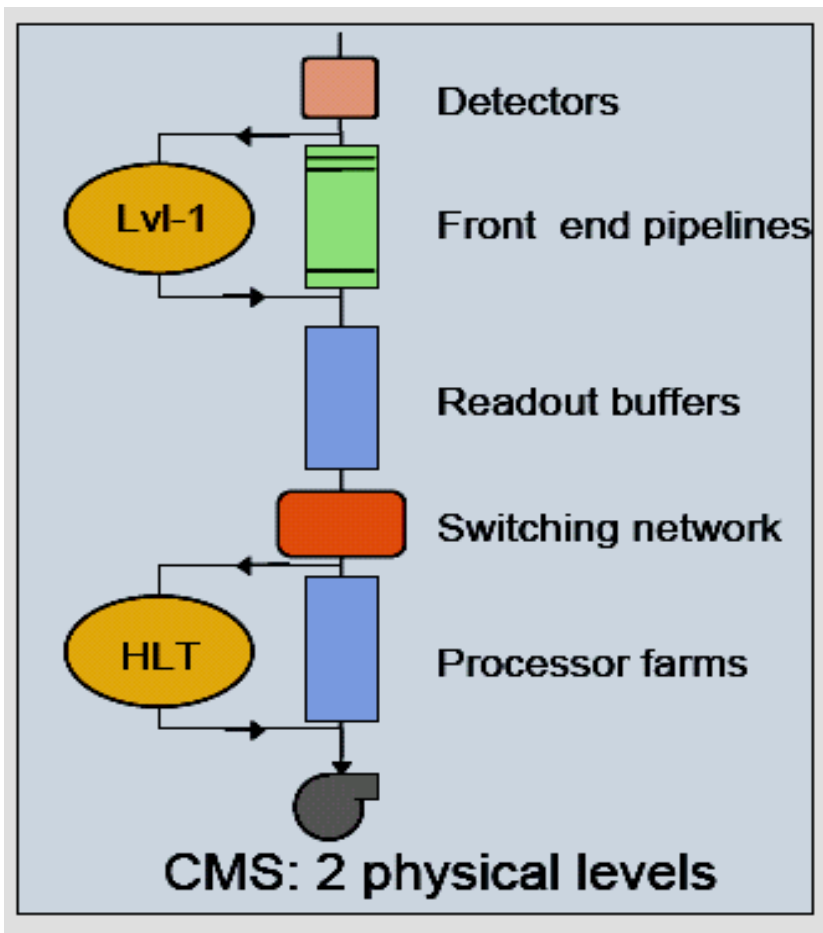
Число взаимодействий при данной светимости: $R = \sigma * L_{int}$

Обработка и анализ данных

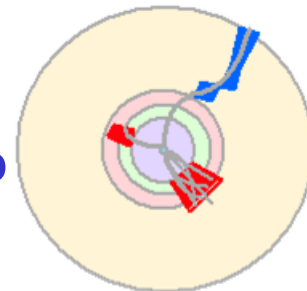
Сечения процессов при энергии LHC



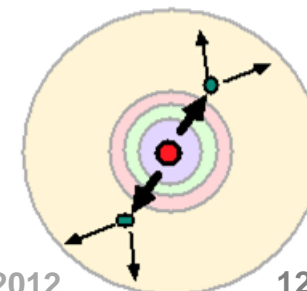
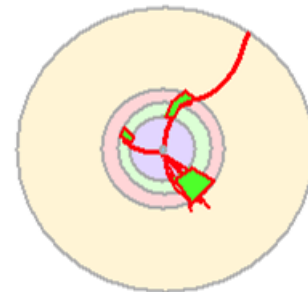
Система триггера (он-лайн отбора событий) CMS



- Уровень-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 и анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий



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

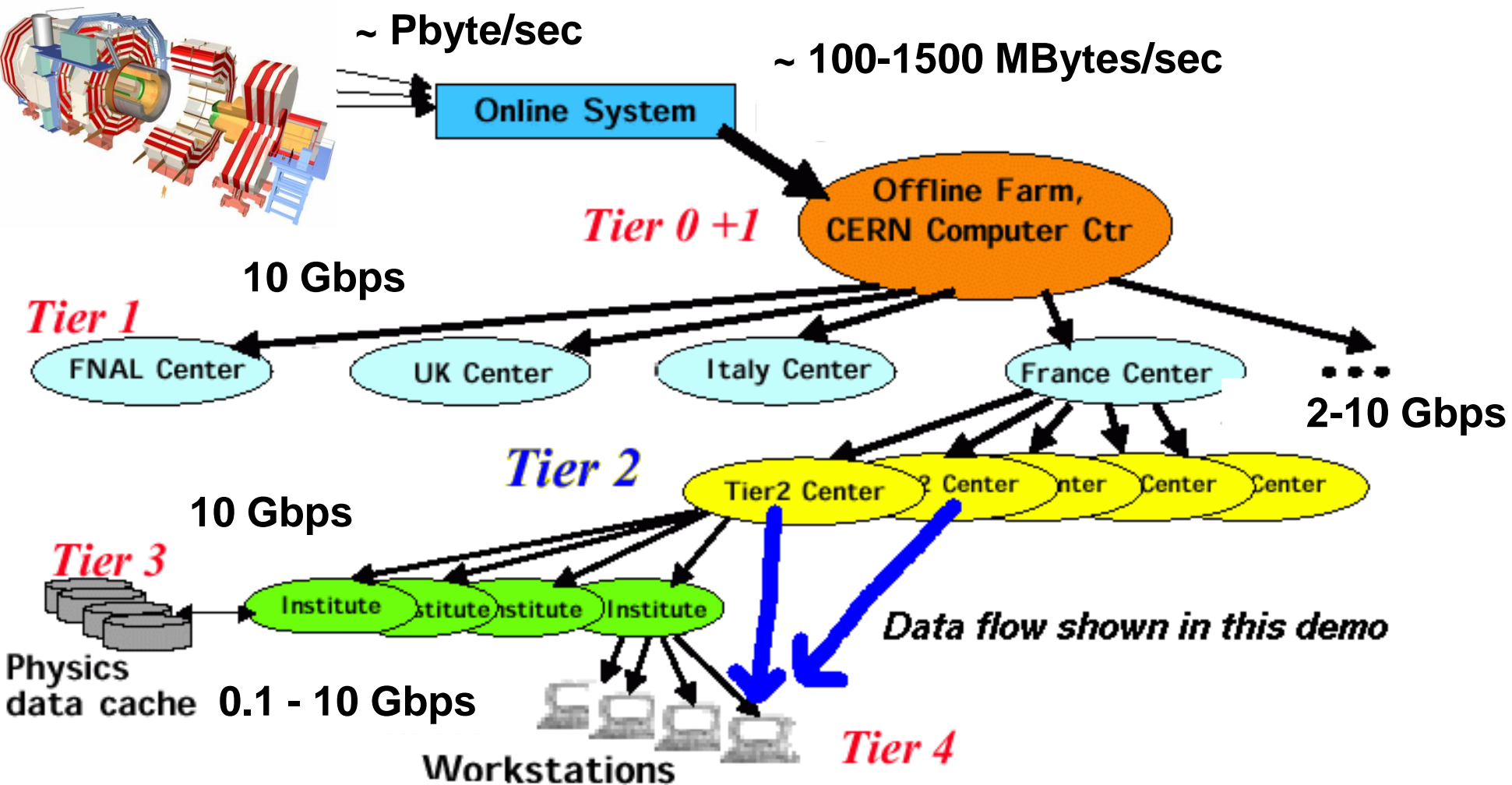
В эксперименте CMS поток данных с детектора уменьшается с 1000 TB/sec ($1\text{TB}=10^{12}$ Bytes) на входе триггера первого уровня до 100 MB/sec на выходе триггера третьего уровня.

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



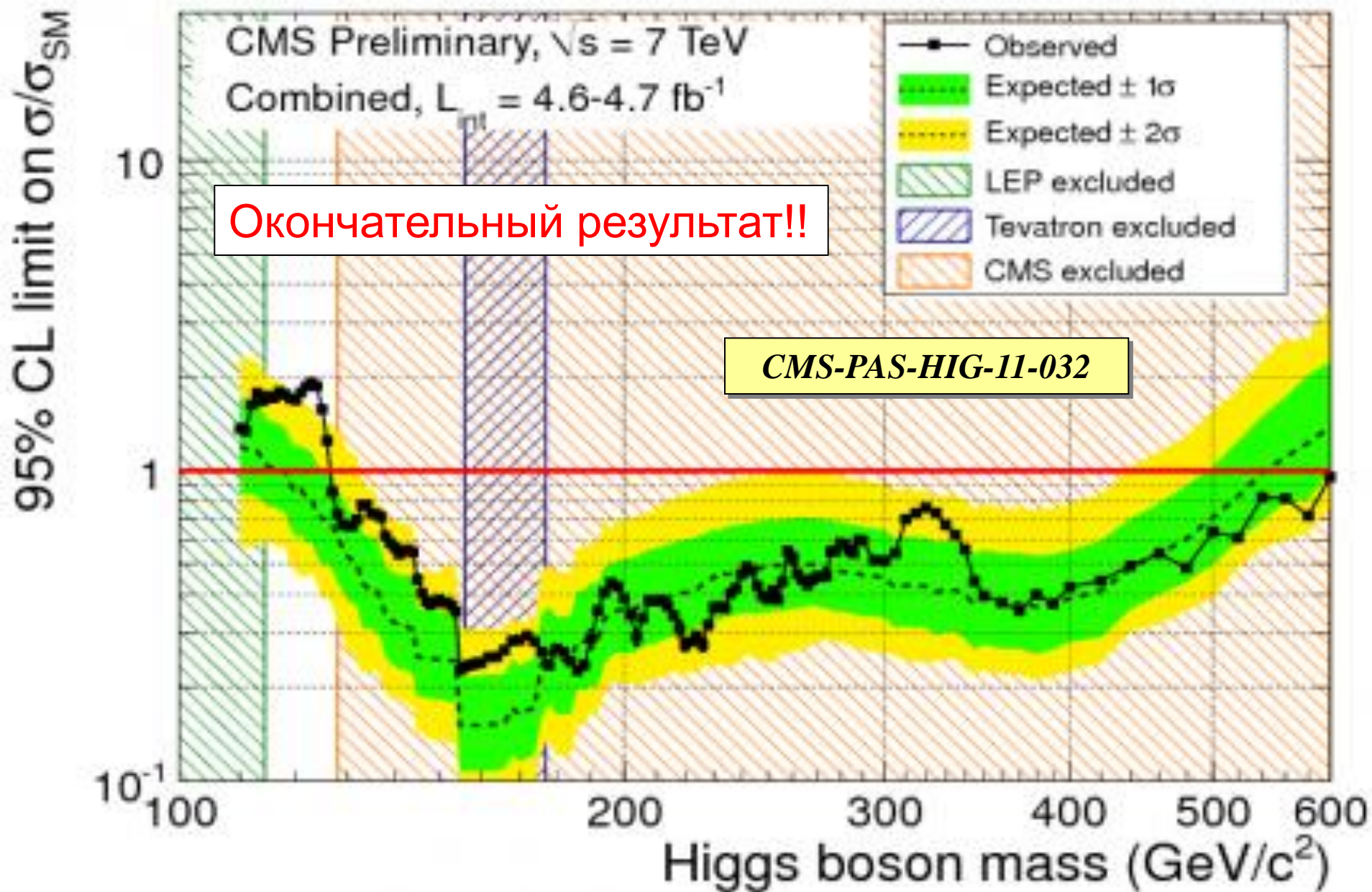
CMS событие	- 1 МБ
триггер L1	- 75 ГБ/с
триггер HLT	- 0.1 ГБ/с
поток	~ 3 ПетаБ/год

Схема потоков событий

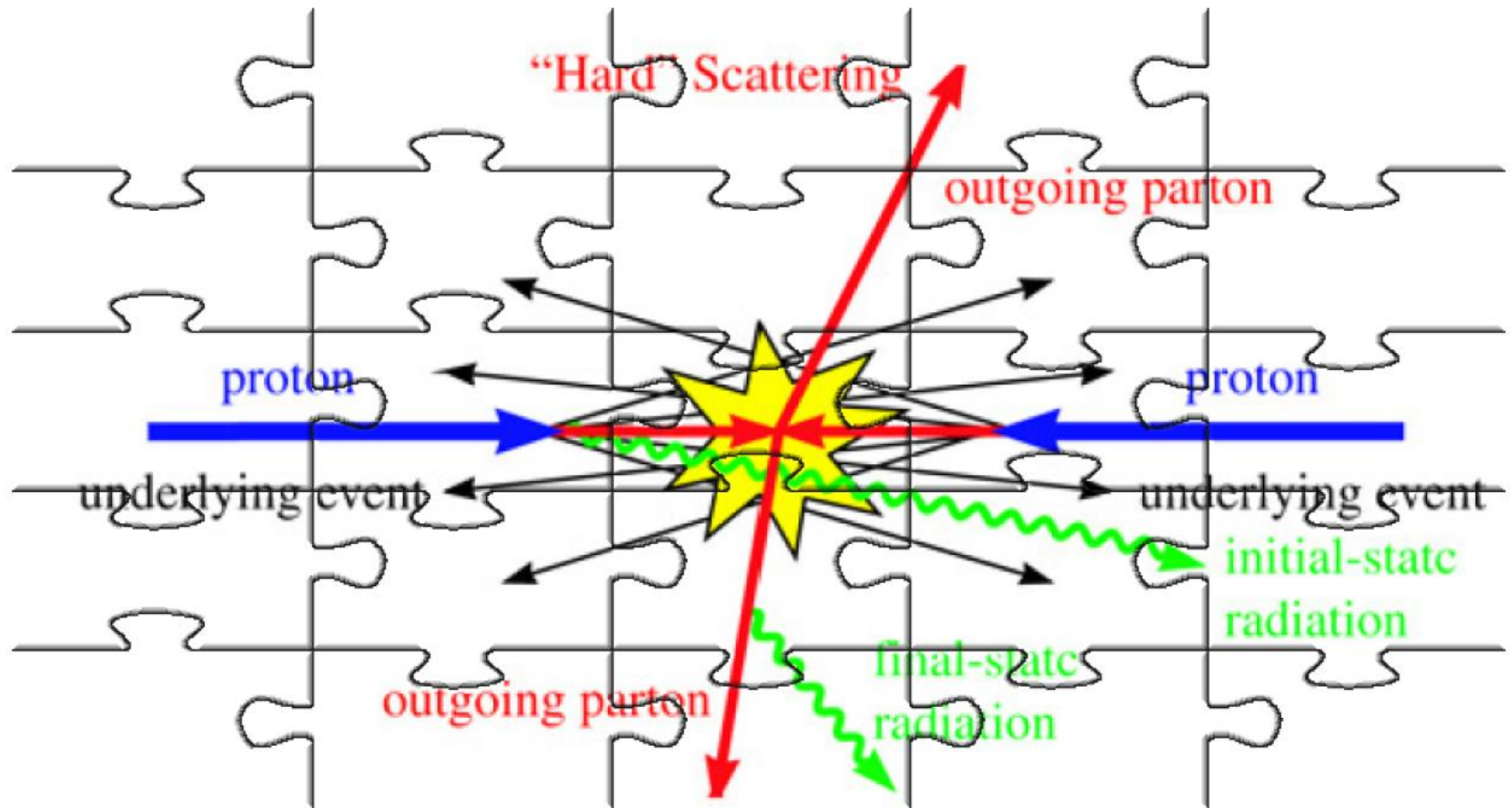


CERN/Outside Resource Ratio $\sim 1:2$
Tier0/(\(\Sigma\) Tier1)/(\(\Sigma\) Tier2) $\sim 1:1:1$

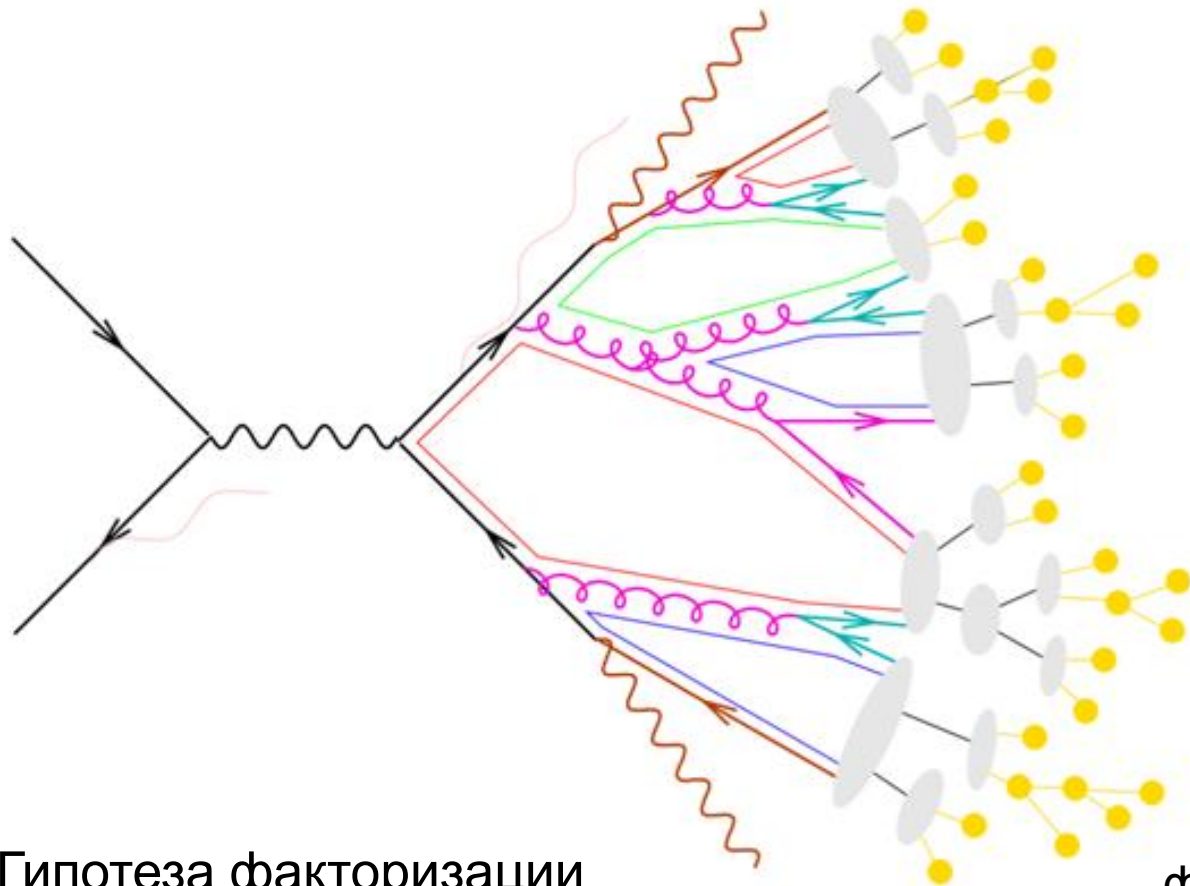
Схема обработки и анализа данных



Мозаика взаимодействия



Процессы в адронных взаимодействиях



жесткое рассеяние

излучение в начальном/
конечном состоянии

распады партонов, типа
 $t \rightarrow Wb$

партонные ливни

непертурбативное
глюонное расщепление

бесцветные кластеры

адроны и адронные
распады

Гипотеза факторизации

функция фрагментации

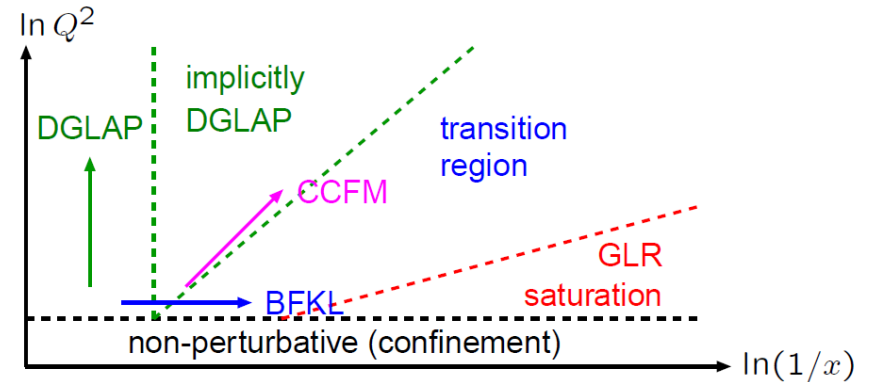
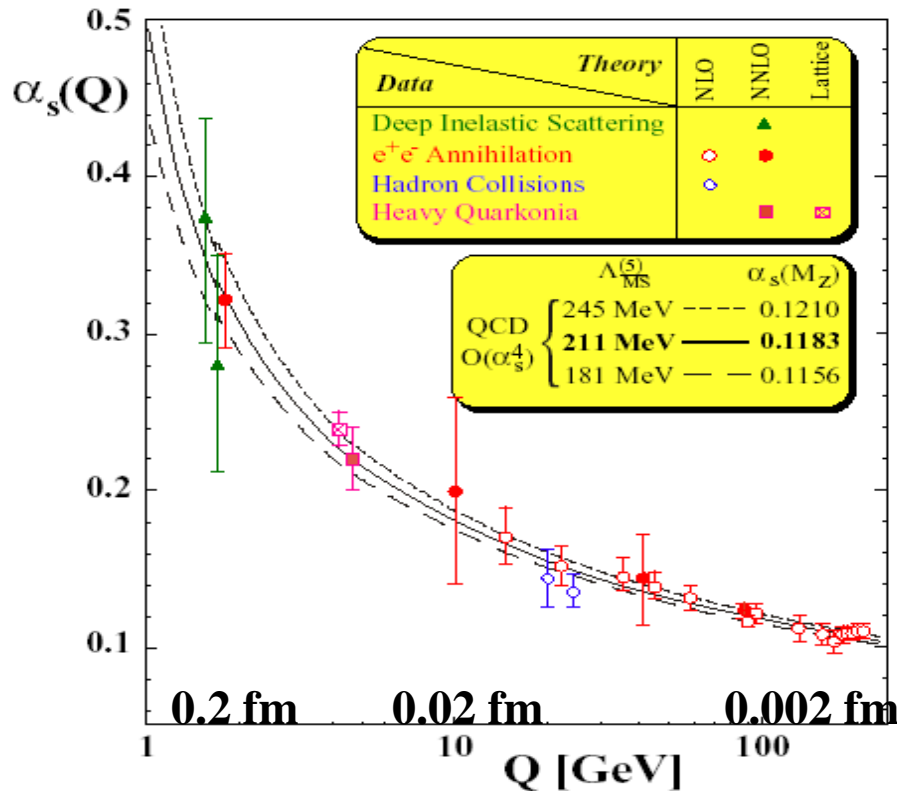
$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} \propto f_{a/A}(\xi_a, Q^2) \otimes f_{b/B}(\xi_b, Q^2) \otimes \frac{d\sigma^{ab \rightarrow cd}}{dt} \otimes D_{h/c}(\xi_c, Q^2)$$

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



DGLAP: Dokshitzer–Gribov–Lipatov–Altarelli–Parisi evolution towards larger Q^2 and (implicitly) towards smaller x

BFKL: Balitsky–Fadin–Kuraev–Lipatov evolution towards smaller x (with small, unordered Q^2)

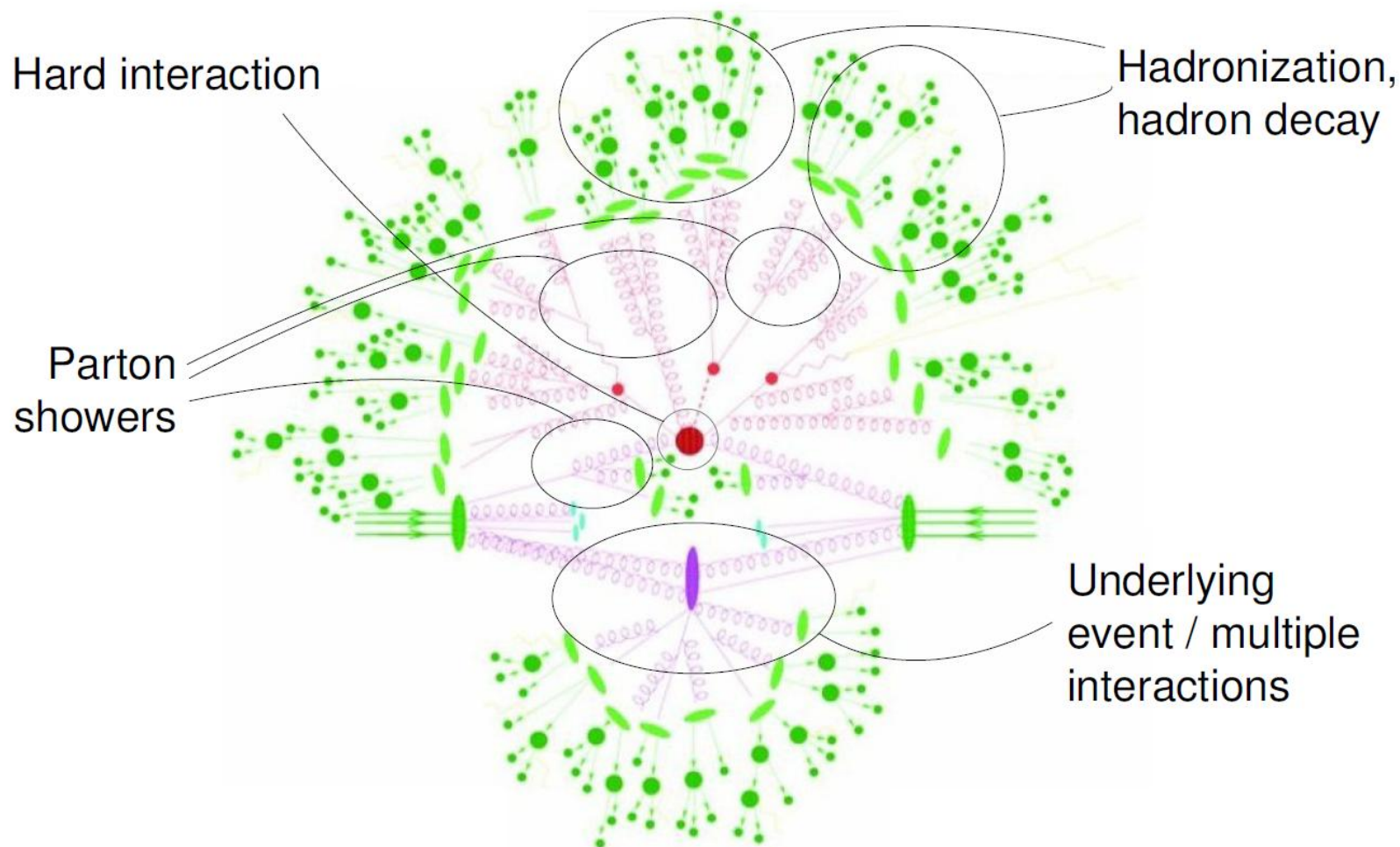
CCFM: Ciafaloni–Catani–Fiorani–Marchesini interpolation of DGLAP and BFKL

GLR: Gribov–Levin–Ryskin nonlinear equation in dense-packing (saturation) region, where partons recombine, not only branch

Что еще?

- ❑ Множественные взаимодействия
- ❑ “Мягкие” взаимодействия ($Q^2 < 1 \text{ ГэВ}^2$)

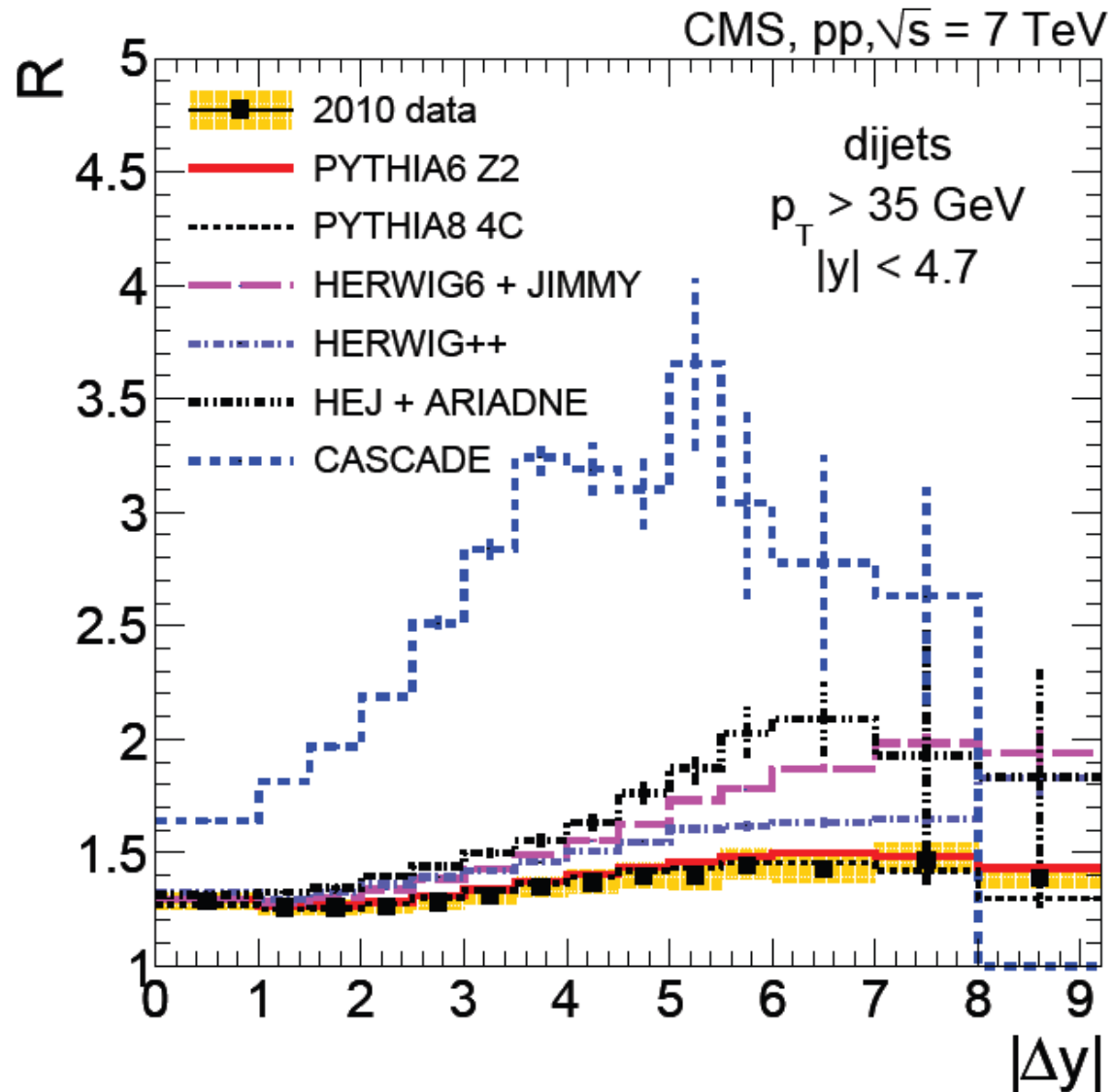
$$\sigma = \sigma_{el} + \sum_i \sigma_i$$



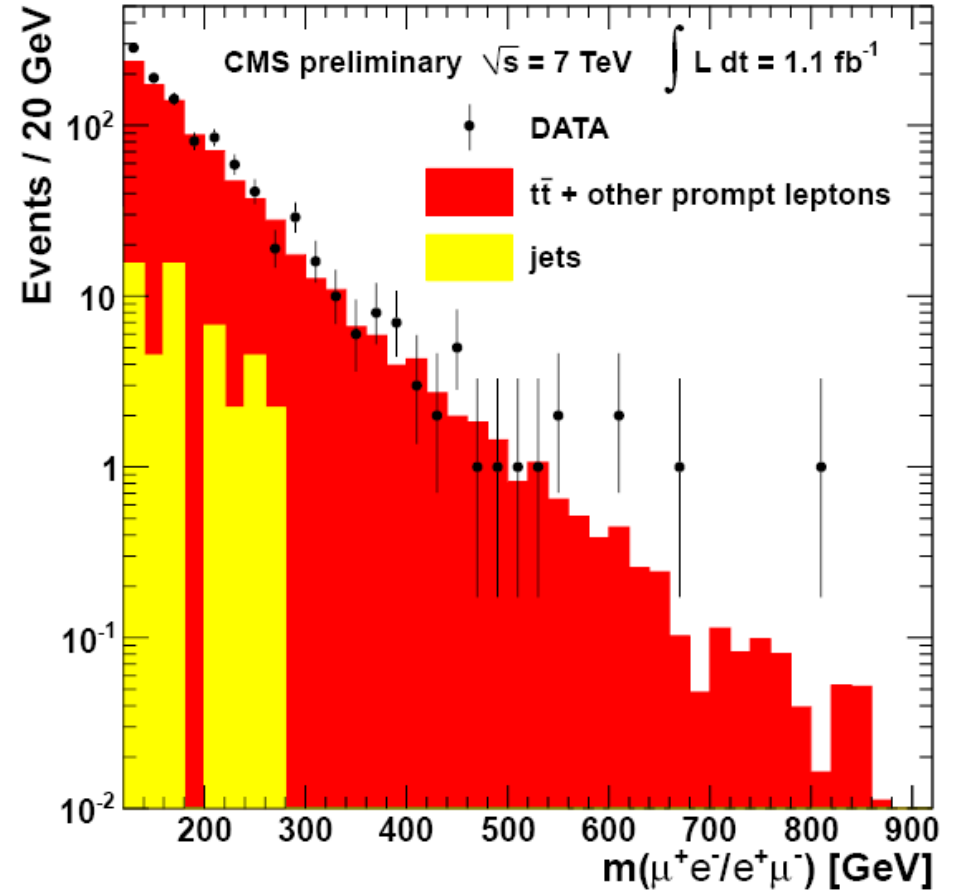
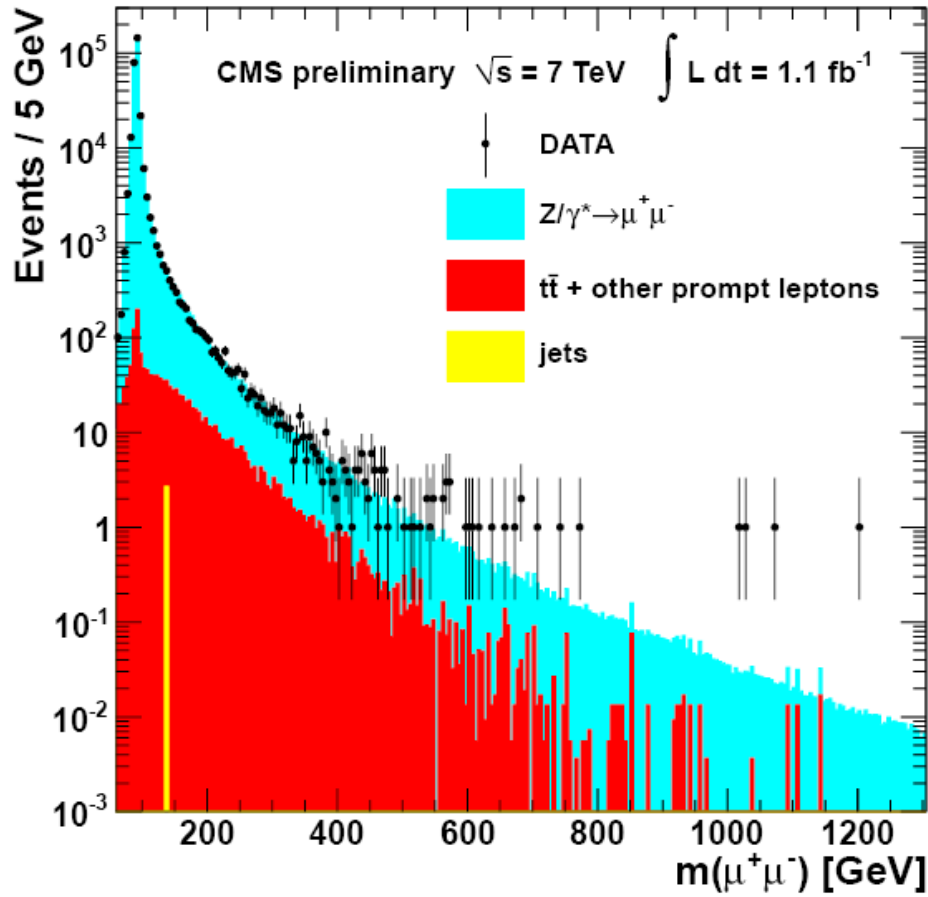
Генераторная мозаика

	General-Purpose	Specialized
Hard Processes	HERWIG PYTHIA ISAJET SHERPA	a lot
Resonance Decays		HDECAY, ...
Parton Showers		Ariadne/LDC, NLLjet
Underlying Event		DPMJET
Hadronization		none (?)
Ordinary Decays		TAUOLA, EvtGen

Точная настройка генераторов (пример)



Извлечение фона из данных (data-driven method)



Неопределенности в анализе

Теория

- ❑ QCD and EW high-order corrections (K factors)
- ❑ Parton Distribution Functions (PDF)
- ❑ Hard process scale (Q^2)
- ❑ Cut efficiency, significance estimators..

Эксперимент

- ❑ **Energy MisCalibration** \Rightarrow performance of e/γ /hadron energy reconstruction.
- ❑ **Misalignment effect** \Rightarrow increase of the mass residuals by around 30%
- ❑ **Drift time** and drift velocities
- ❑ **Magnetic and gravitational field effects** \Rightarrow can cause a scale shift in a mass resolution by 5-10%
- ❑ **Pile-up** \Rightarrow mass residuals increase by around 0.1–0.2 %
- ❑ **Background uncertainties (variations of the bg. shape)** \Rightarrow a drop of about 10-15% in the significance values
- ❑ **Trigger and reconstruction acceptance uncertainties**

Результаты 2010-2011 г.г.

см. детали в

CMS News Archive

<http://cms.web.cern.ch/news/category/382>



CMS Physics Public Page

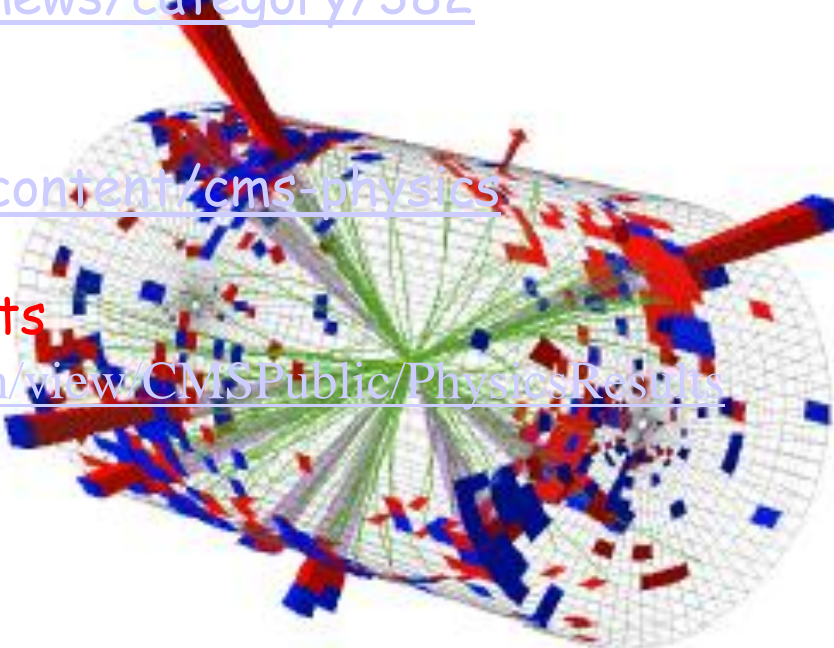
<http://cms.web.cern.ch/content/cms-physics>

CMS Public Physics Results

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

CMS Info Page in JINR

<http://cmsinfo.jinr.ru/>

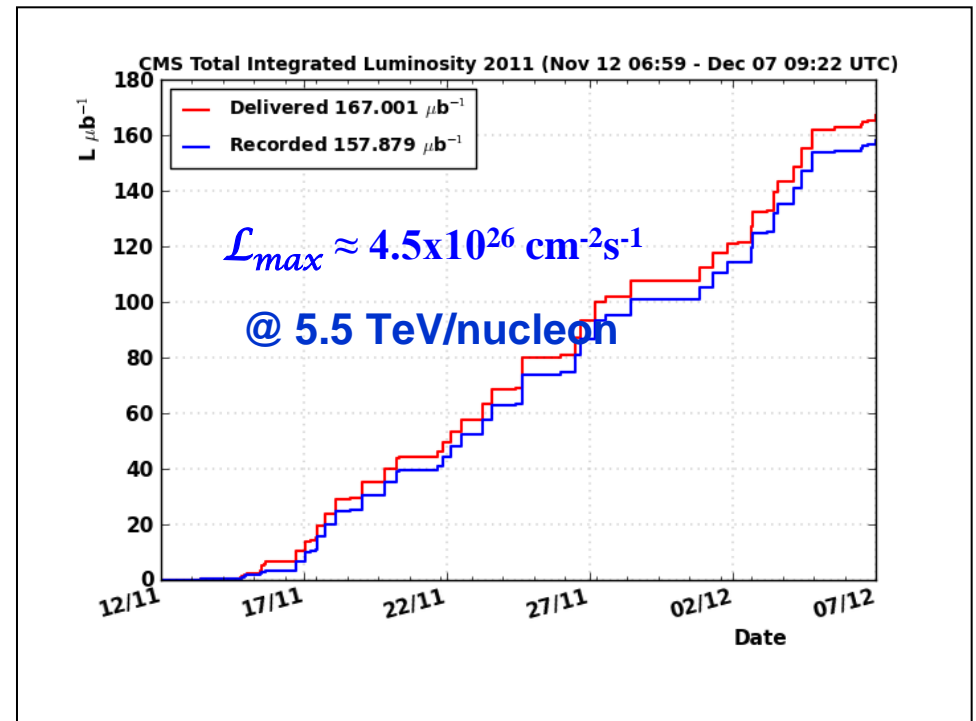
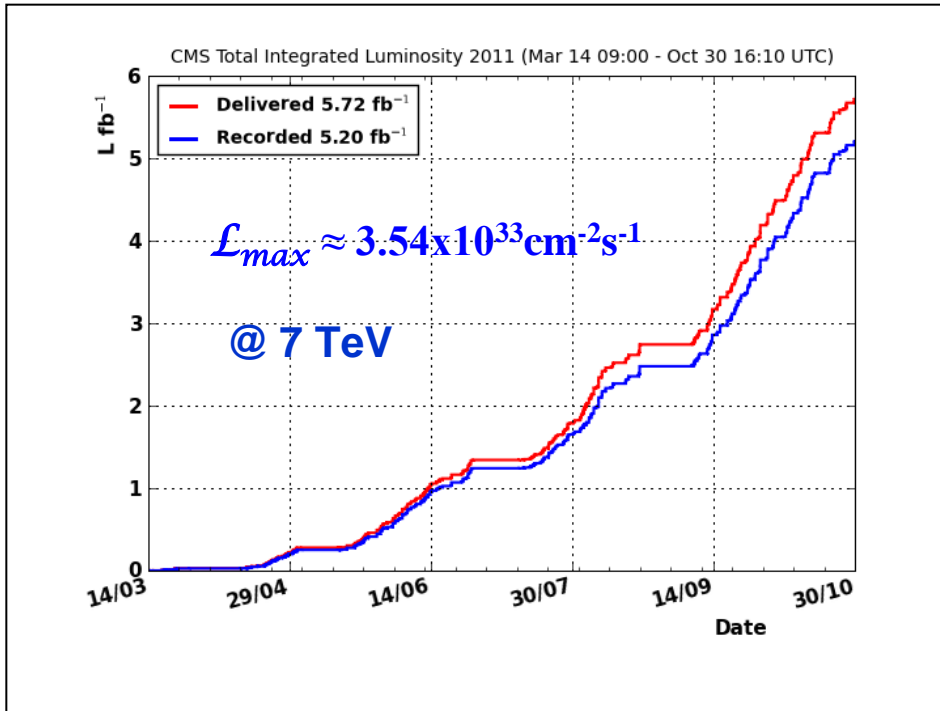


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 23 21:46:28 2011 EDT
Run/Event: 185907 / 347495024
Lumi section: 290
DataCrossing: 73288853 / 31811

Набор данных

В 2010 г. набор данных проходил с 30 марта по 3 ноября для pp-столкновений (~ 40 пбн $^{-1}$) и с 8 ноября по 6 декабря для PbPb-столкновений (~ 7.8 мкбн $^{-1}$).

В 2011 набор данных проходило с 14 марта по 30 октября для pp-столкновений (~ 5.22 фбн $^{-1}$) и с 12 ноября по 07 декабря для PbPb-столкновений (~ 158 мкбн $^{-1}$).



Эффективность набора данных $\sim 91\%$ для pp-столкновений и $\sim 94\%$ для PbPb-столкновений

Физика на CMS

Физические исследования коллаборации CMS охватывают все возможные направления физики высоких энергий и осуществляются в рамках соответствующих групп обработки и анализа данных

Квантовая хромодинамика (QCD Physics)

Физика малых углов (Forward Physics)

Физика B-адронов и кваркониев (B-Physics and Quarkonia)

Электрослабые взаимодействия (Electroweak Physics)

Физика t-кварка (Top Physics)

Бозон Хиггса (Higgs Physics)

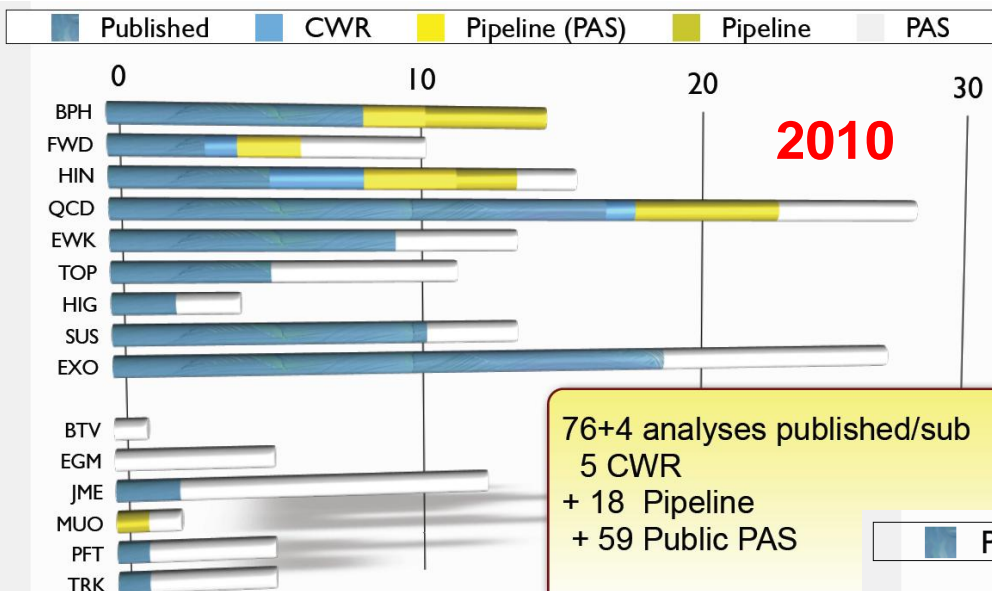
Суперсимметрия (Supersymmetry)

Экзотика (Exotics)

Физика тяжелых ионов (Heavy Ion Physics)

Изучение точности и эффективности регистрации физических объектов (лептонов, фотонов, струй, потоков энергии и т.д.) и создание ПО на основании новых алгоритмов для реконструкции событий происходит в рамках специальных групп (Physics Object Groups) – Tracking, Electron and Photons, Jet and Missing Energy, Muons, Particle Flow, B-tagging and Vertexing

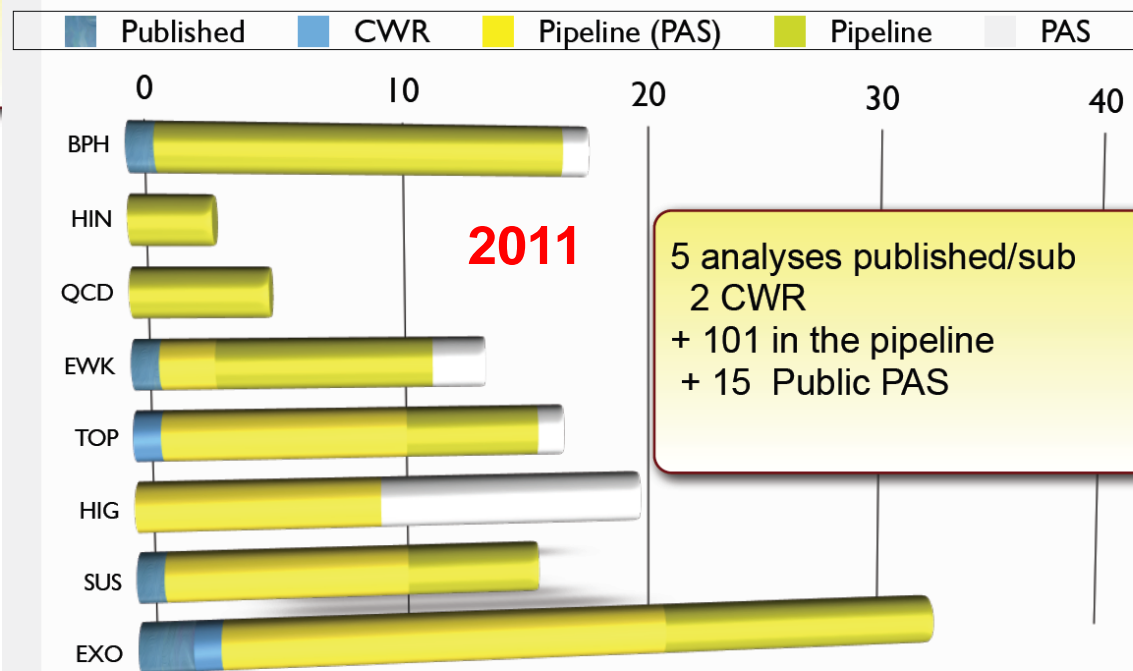
Публикации CMS



76+4 analyses published/sub
5 CWR
+ 18 Pipeline
+ 59 Public PAS

- “открытие” стандартной модели в ее исследовании на новом масштабе энергий
- поиск “новой” физики
 - бозон Хиггса, SUSY, Экзотика

~ 120 работ были приняты или направлены в J. High Energy Phys, Phys. Rev. Lett., Phys. Lett. B, Eur. Phys. J.



5 analyses published/sub
2 CWR
+ 101 in the pipeline
+ 15 Public PAS

Проверка Стандартной модели

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

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

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

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = 1.054 \times 10^{-35}$ GeV s = 6.58×10^{-25} GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-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/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos

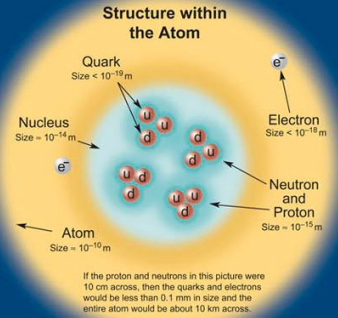
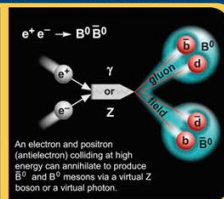
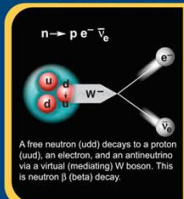
Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_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 , γ , and η_c = $c\bar{c}$ but not K^0 = $d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.



Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

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^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $r = 10^{-18}$ m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at $r = 3 \times 10^{-17}$ m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

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

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	-1
W^+	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
Quarks and gluons cannot be isolated - they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature mesons $q\bar{q}$ and baryons qqq . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), neutron (udd), lambda Λ (uds), and omega Ω^- (sss). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge +1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion $^+ (u\bar{d})$, kaon $K^+ (u\bar{s})$, $B^0 (d\bar{b})$, and $\eta_c (c\bar{c})$. Their charges are +1, -1, 0, 0 respectively.

Visit the award-winning web feature, *The Particle Adventure* at ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
©2008 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see CPEPweb.org

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

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?

Что нового о СМ может сказать LHC?

Энергия столкновения пучков протонов на LHC в 3 раза больше (по проекту в 6), энергии коллайдера предыдущего поколения Тэватрон (1.9 ТэВ в с.ц.м.)

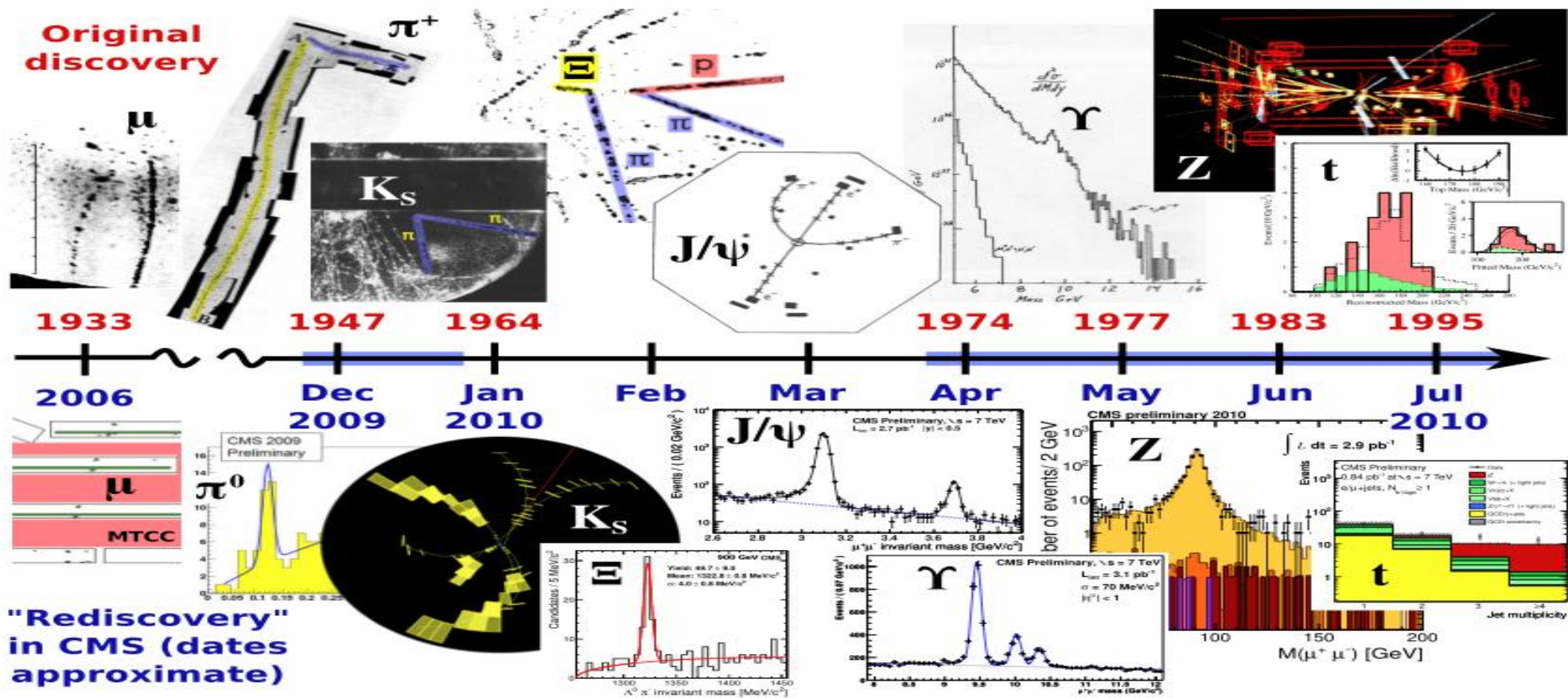
Столкновения протонов при 7 ТэВ позволяют исследовать закономерности рождения элементарных частиц в новой кинематической области

- ✓ по квадрату переданного 4-х импульса (Q^2)
- ✓ по доле переданной энергии (x)

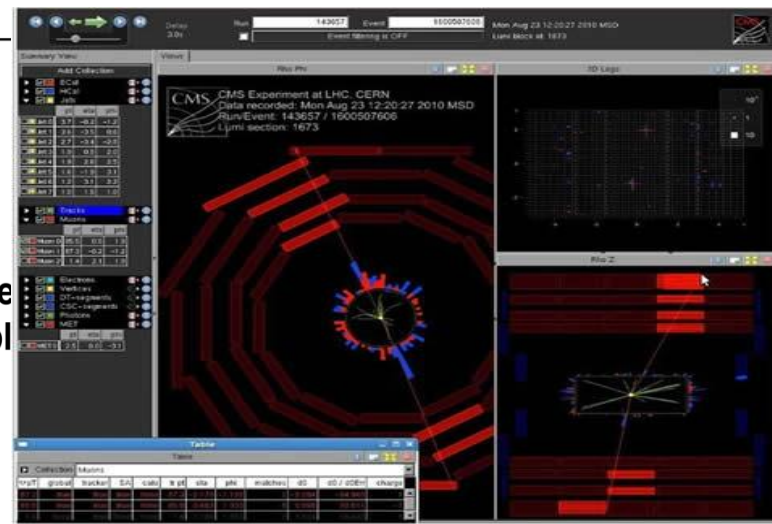
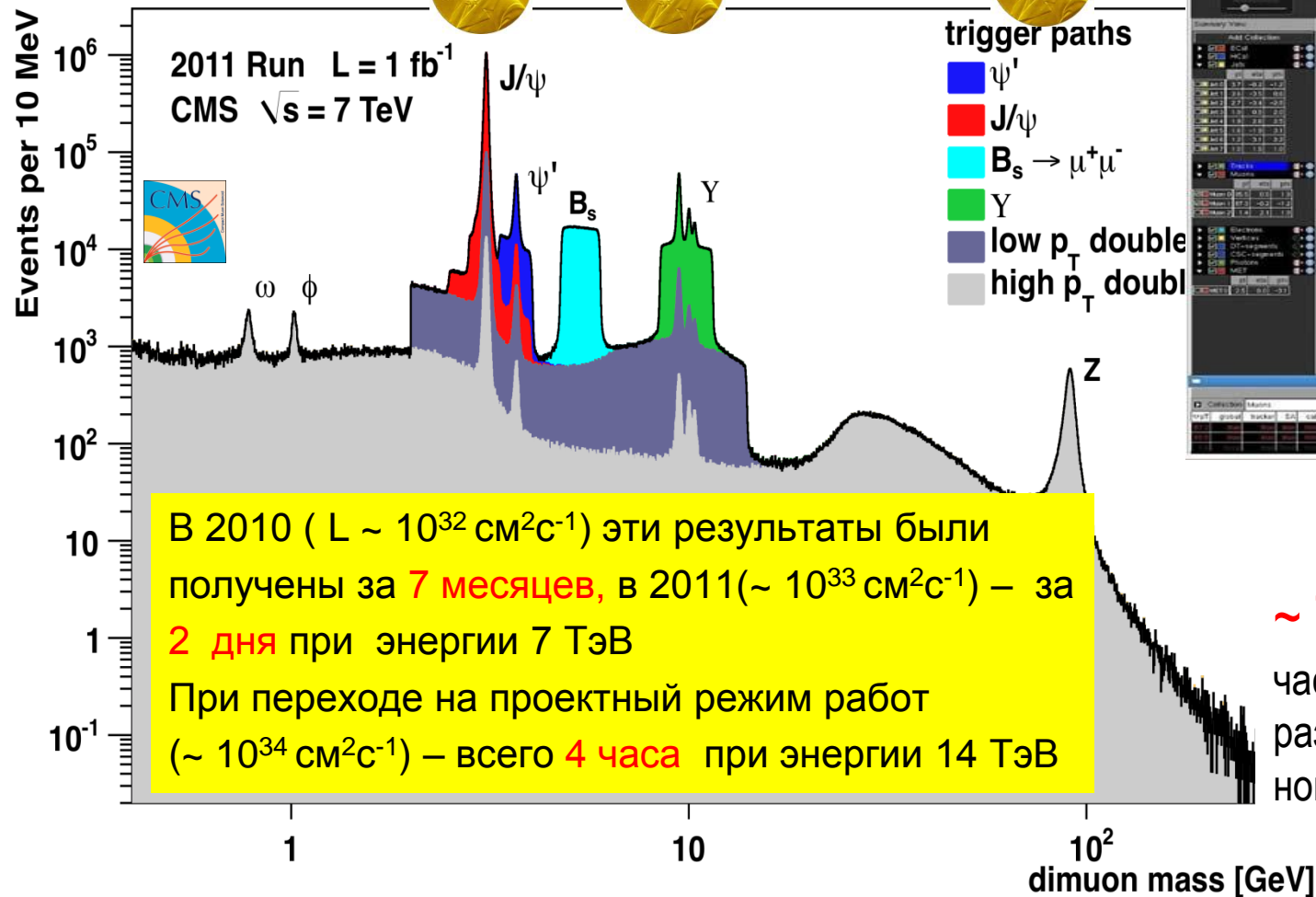
Данные LHC позволяют проверить предсказания Стандартной модели в новом диапазоне этих кинематических переменных и уточнить границы применимости СМ

- ✓ константы связи (вероятности рождения частиц)
- ✓ значения угла Вайнберга
- ✓ вероятности (ширины) распадов резонансов
- ✓ пространственные распределения рожденных частиц, включая разные возможные асимметрии вылета частиц
- ✓ другие параметры СМ

“Открытие” стандартной модели



“Открытие” Стандартной модели в канале $\mu^+\mu^-$



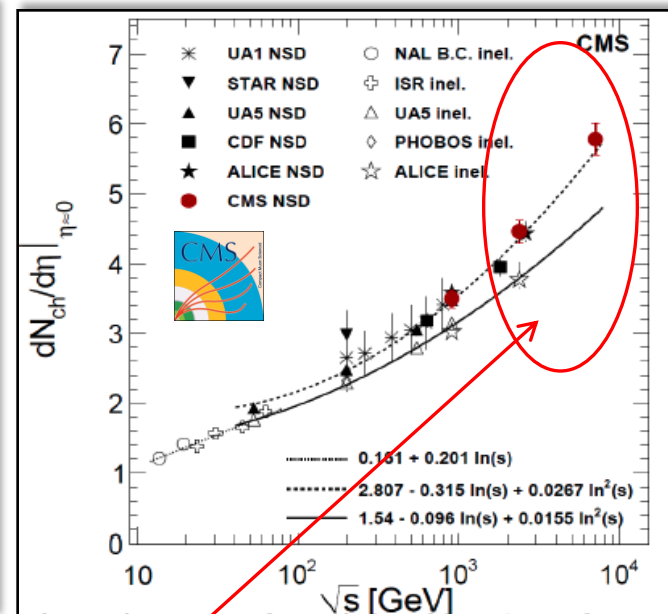
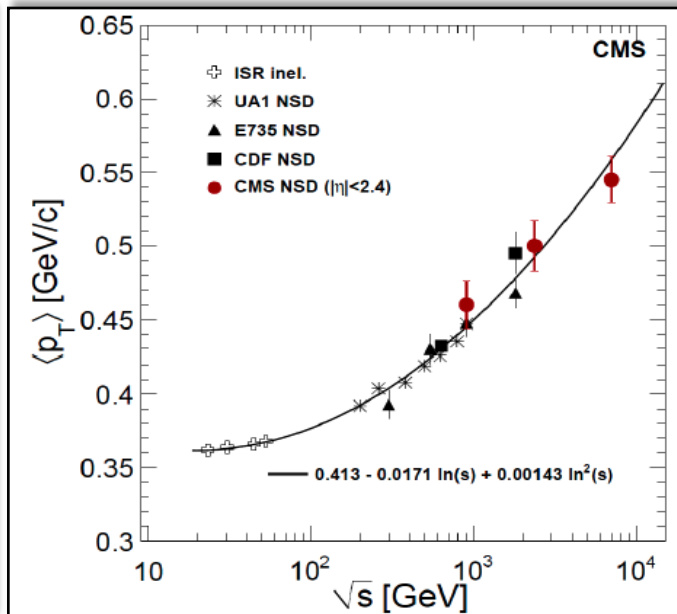
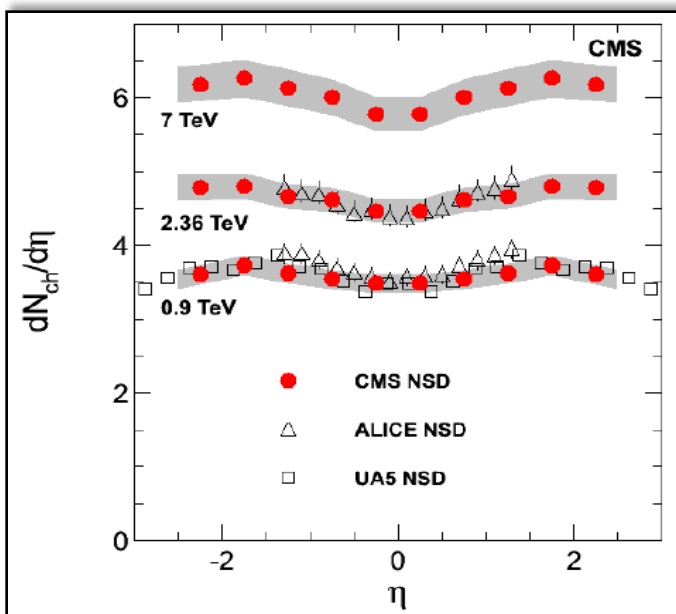
В 2010 ($L \sim 10^{32} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) эти результаты были получены за **7 месяцев**, в 2011 ($\sim 10^{33} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) – за **2 дня** при энергии 7 ТэВ
 При переходе на проектный режим работ ($\sim 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) – всего **4 часа** при энергии 14 ТэВ

~ ТэВ: terra incognita (новые частицы, дополнительные размерности, гравитация и другие новые теории)

В течении первых нескольких месяцев работы ЛНС был зарегистрирован ряд резонансов (от ω -мезона до Z -бозонов), спустя еще несколько месяцев была зафиксирована пара мюонов с инвариантной массой \sim ТэВ – началось исследование новой области по Q^2

Множественность частиц

Первые результаты экспериментов на LHC при 7 ТэВ были опубликованы в июне 2010 г. (arXiv:1005.3299v1, PRL)



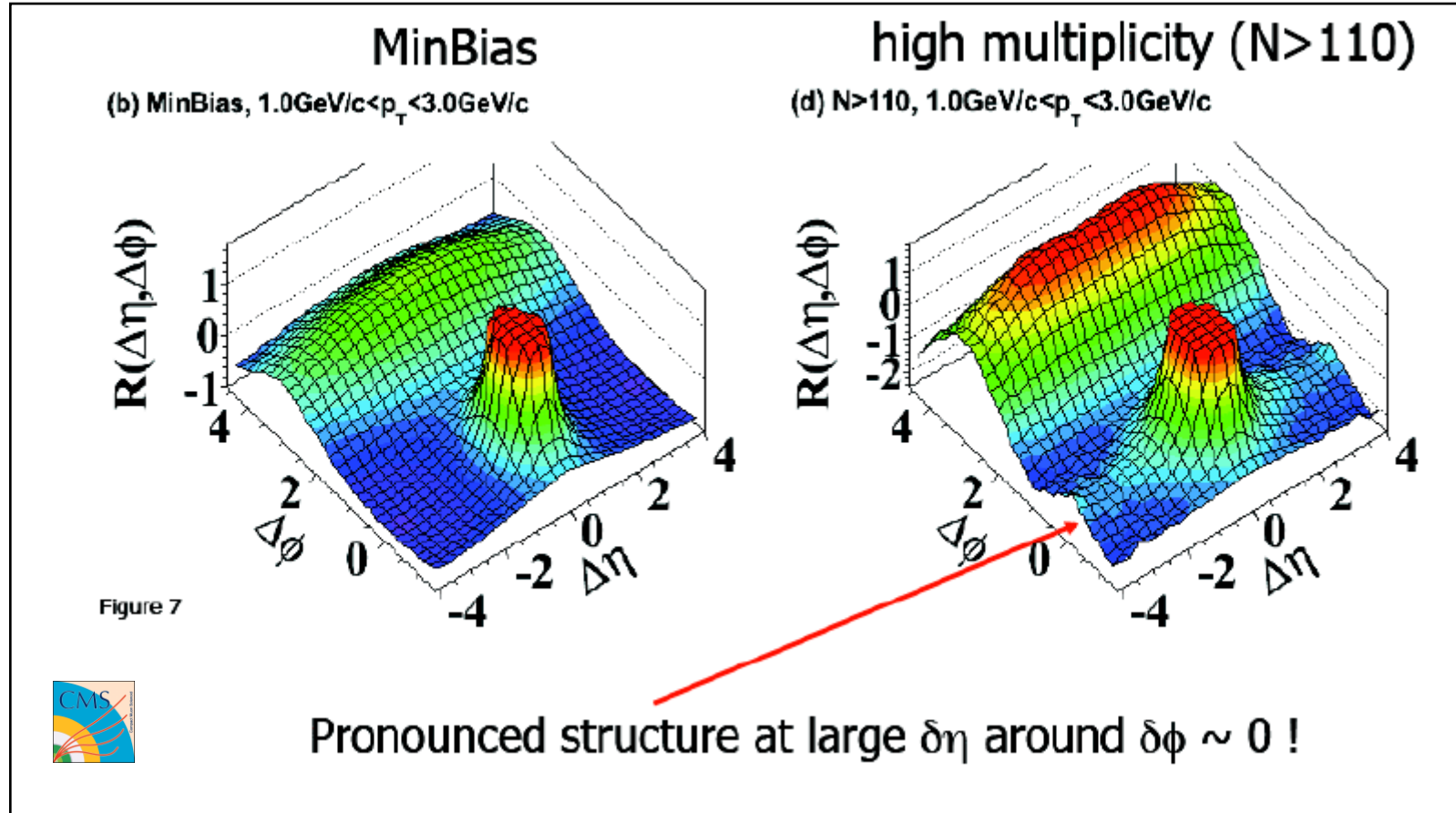
Рост плотность частиц с энергией (от 0.9 до 7 ТэВ) происходит быстрее, чем предсказывался различными моделями.



Была выполнена точная настройка моделей для Монте-Карло моделирования.

Первые неожиданные результаты LHC: “ridge”-эффект в pp-столкновениях

arXiv:1009.4122v1 [hep-ex]

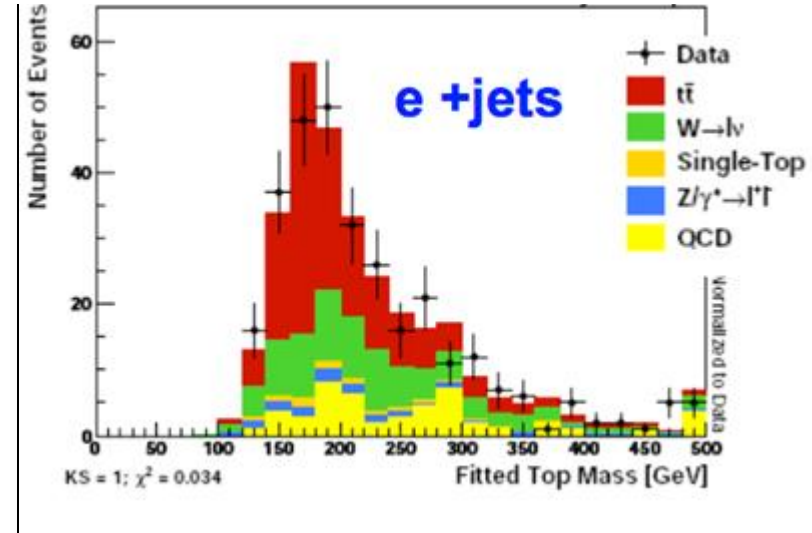
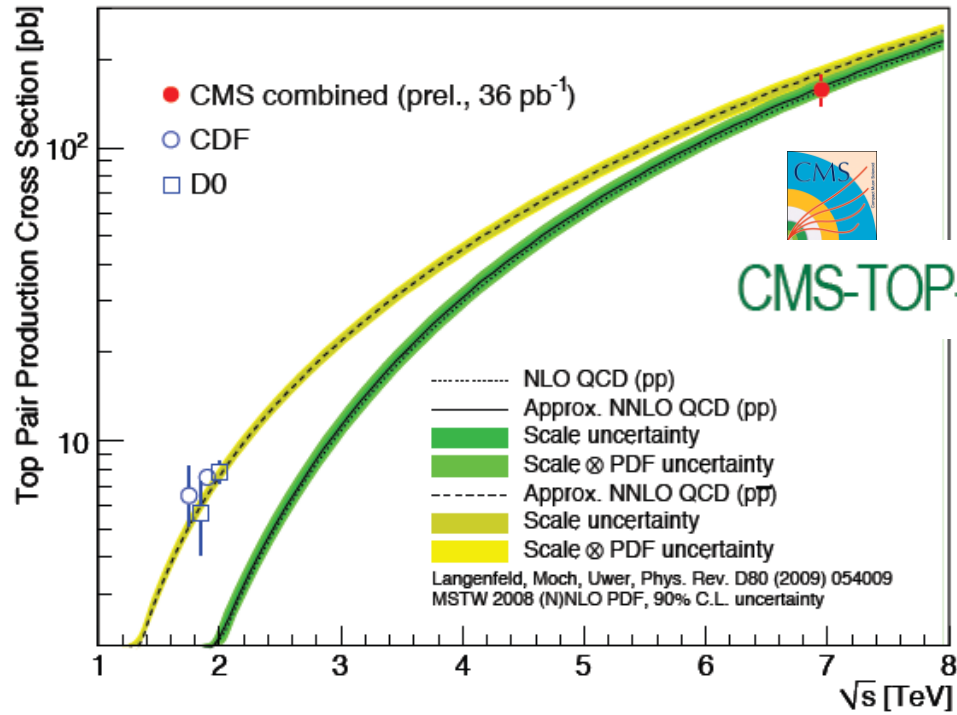


Некоторые пары частиц при больших $\Delta\eta$ оказываются соориентированными по направлению своего движения вдоль одного и того же азимутального угла ϕ , как если бы частицы были некоторым определенным образом ассоциированы вместе, рождаясь в точке столкновения.

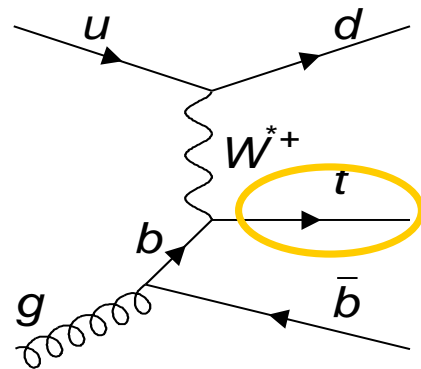
LHC – фабрика топ - кварков

$M_{top} = 158.4 \pm 1.8$ (syst.+stat.) 6 (lumi.) GeV/c^2

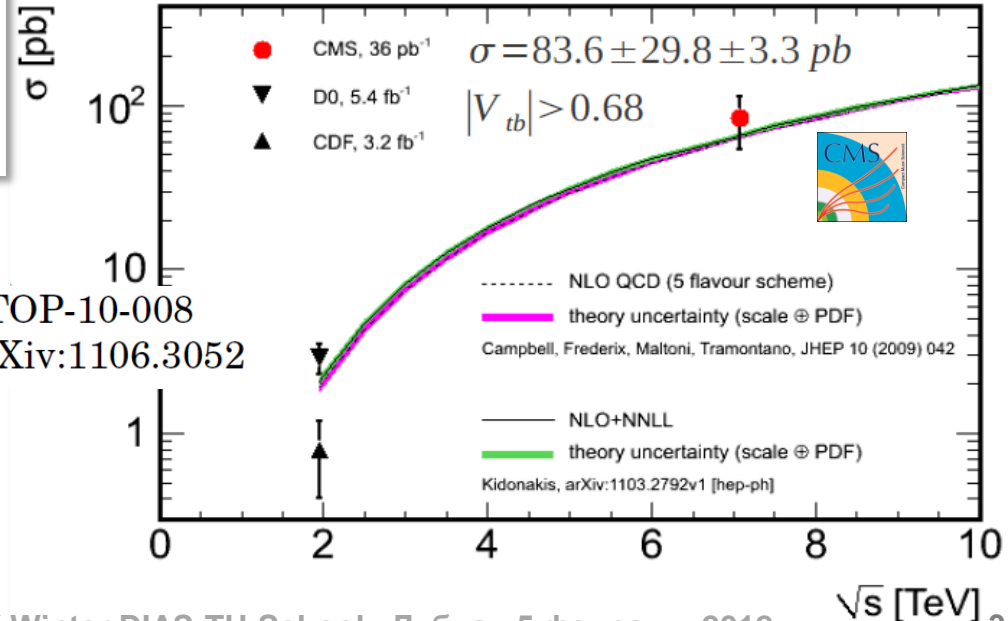
Парное рождение



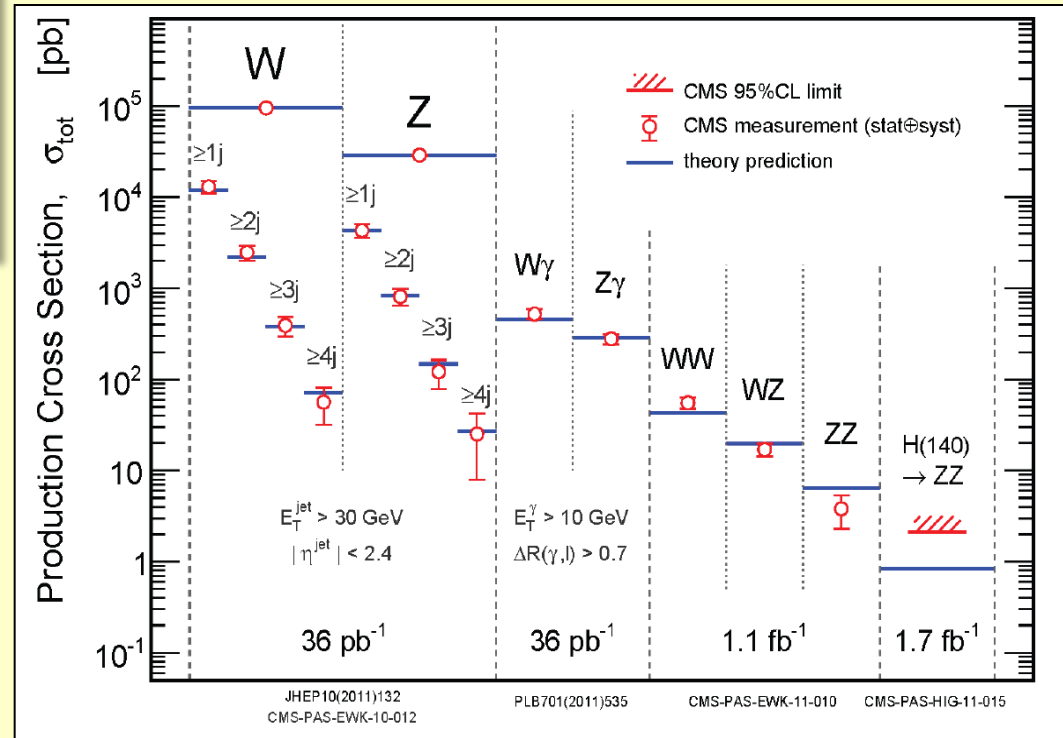
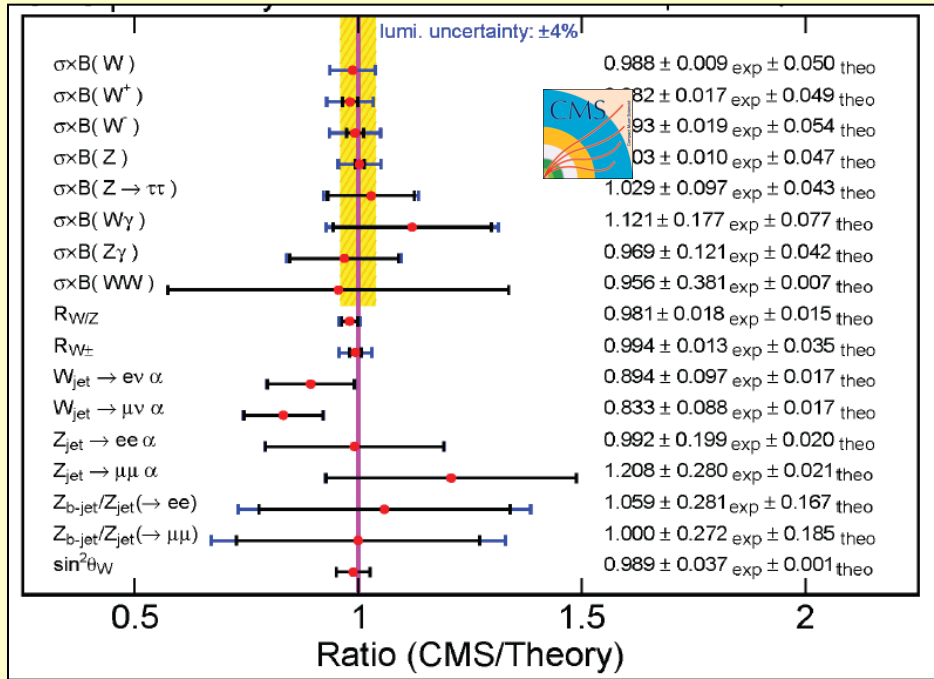
Одиночное рождение



CMS PAS TOP-10-008
Preprint arXiv:1106.3052

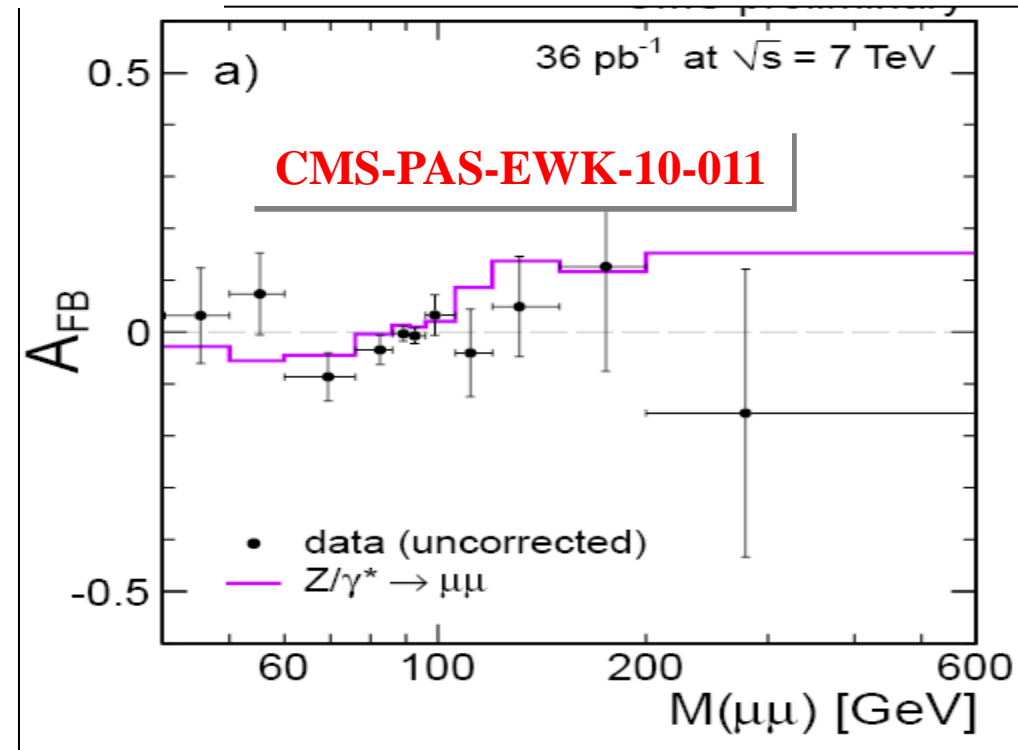
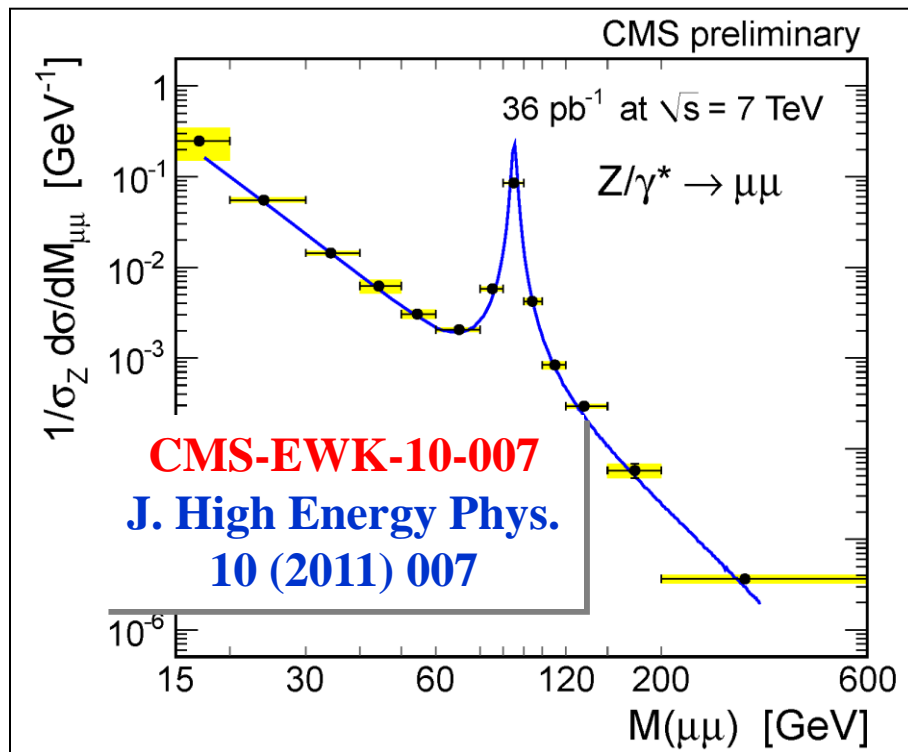
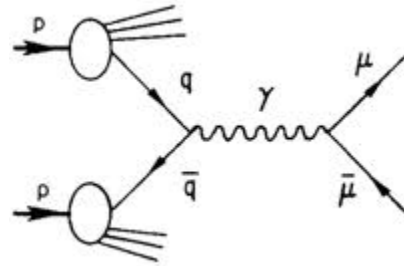
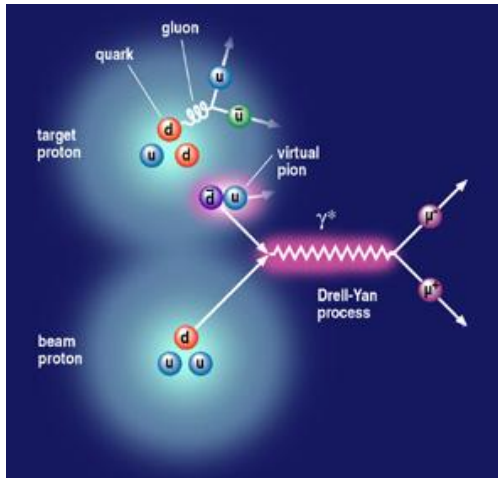


Физика EWK



Измеренные значения – в хорошем согласии с предсказаниями!!

EWK: Процессы Дрелла-Яна

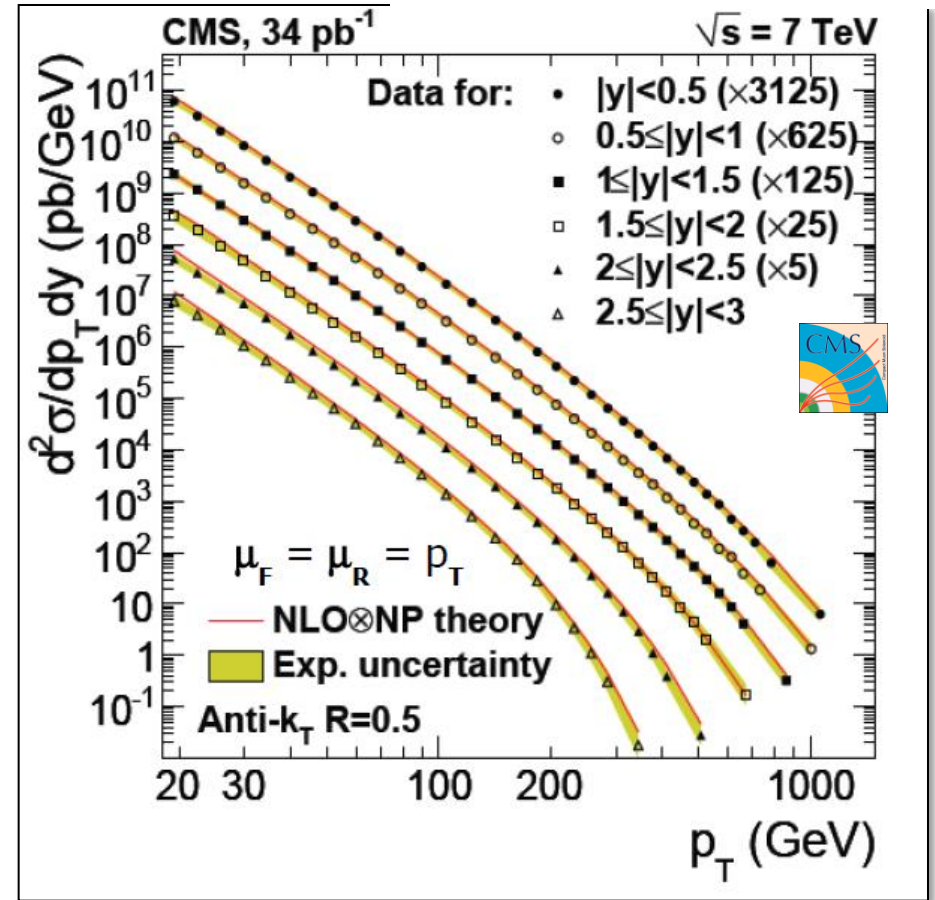
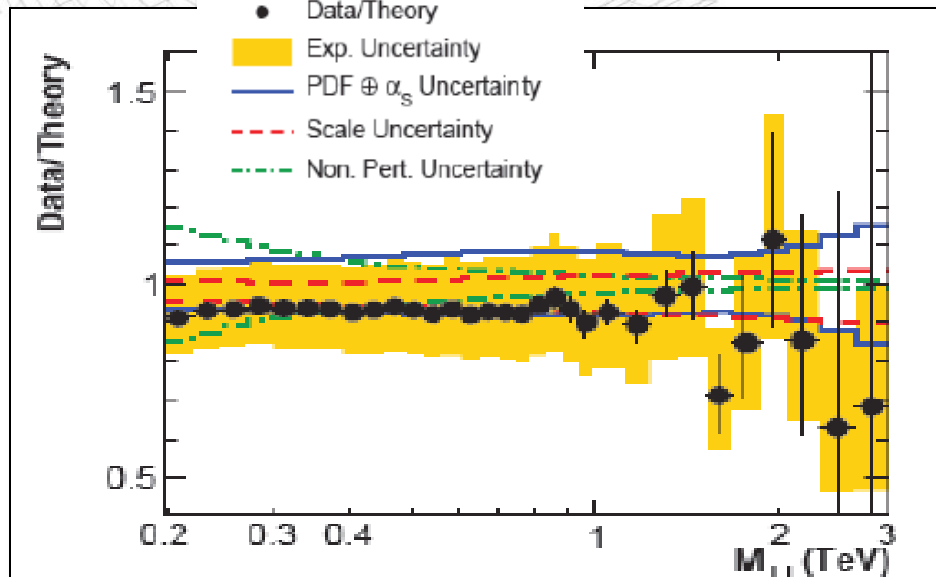
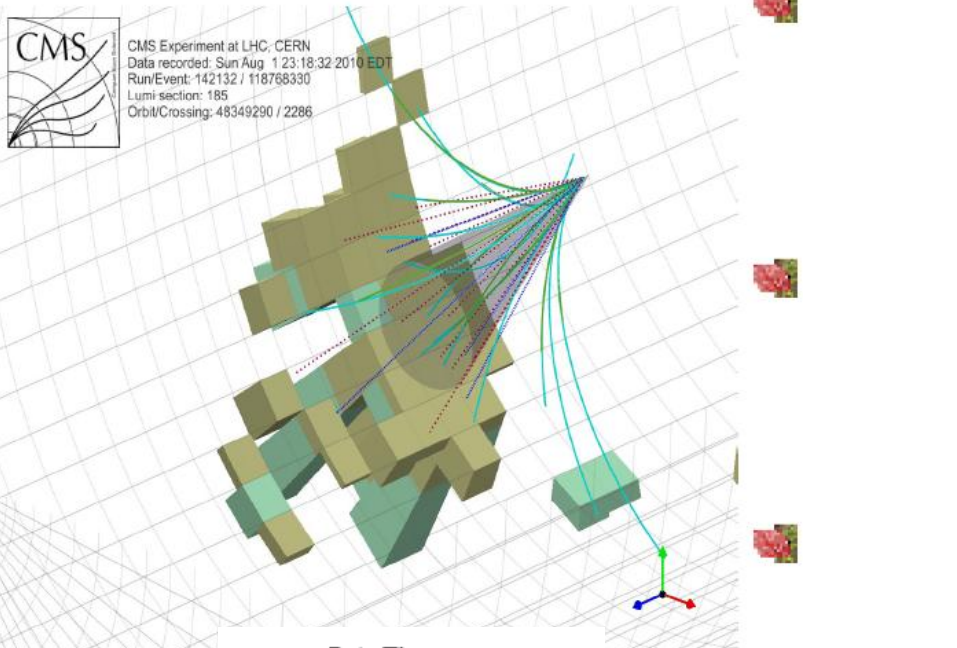


$$A_{FB}^{y_1} = \frac{[\int_{y_1}^{y_{max}} - \int_{-y_{max}}^{-y_1}] [F(y) - B(y)] dy}{[\int_{y_1}^{y_{max}} + \int_{-y_{max}}^{-y_1}] [F(y) + B(y)] dy}$$

$s \theta \frac{d^2\sigma}{dy d\cos\theta}$, $B(y) = \int_{-1}^0 d\cos\theta \frac{d^2\sigma}{dy d\cos\theta}$, y is the Z' rapidity, and y_{max}

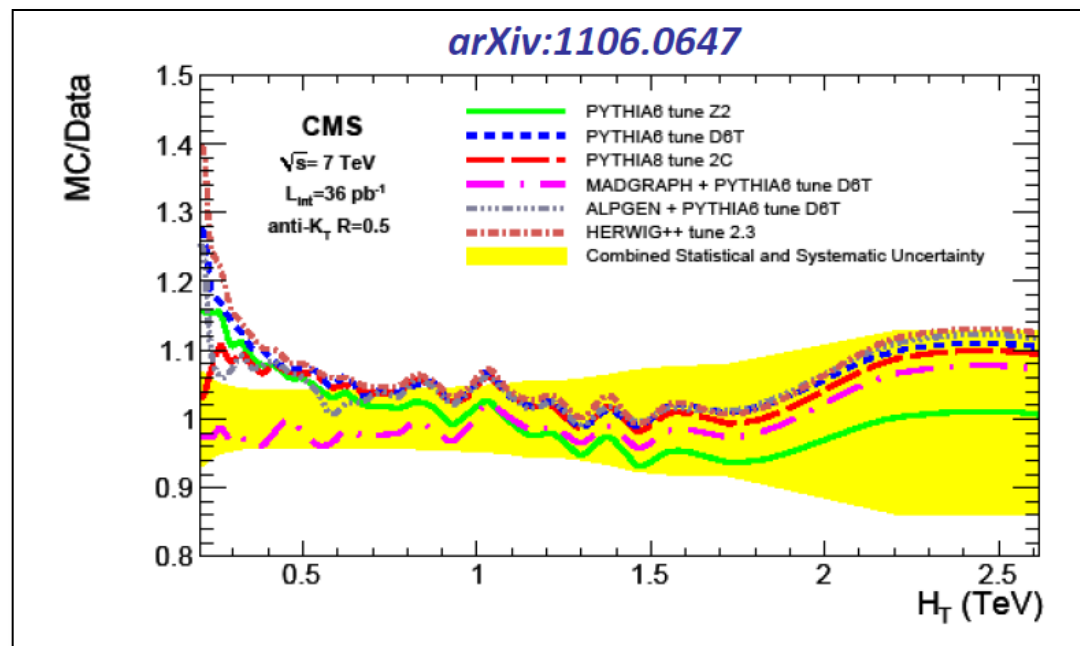
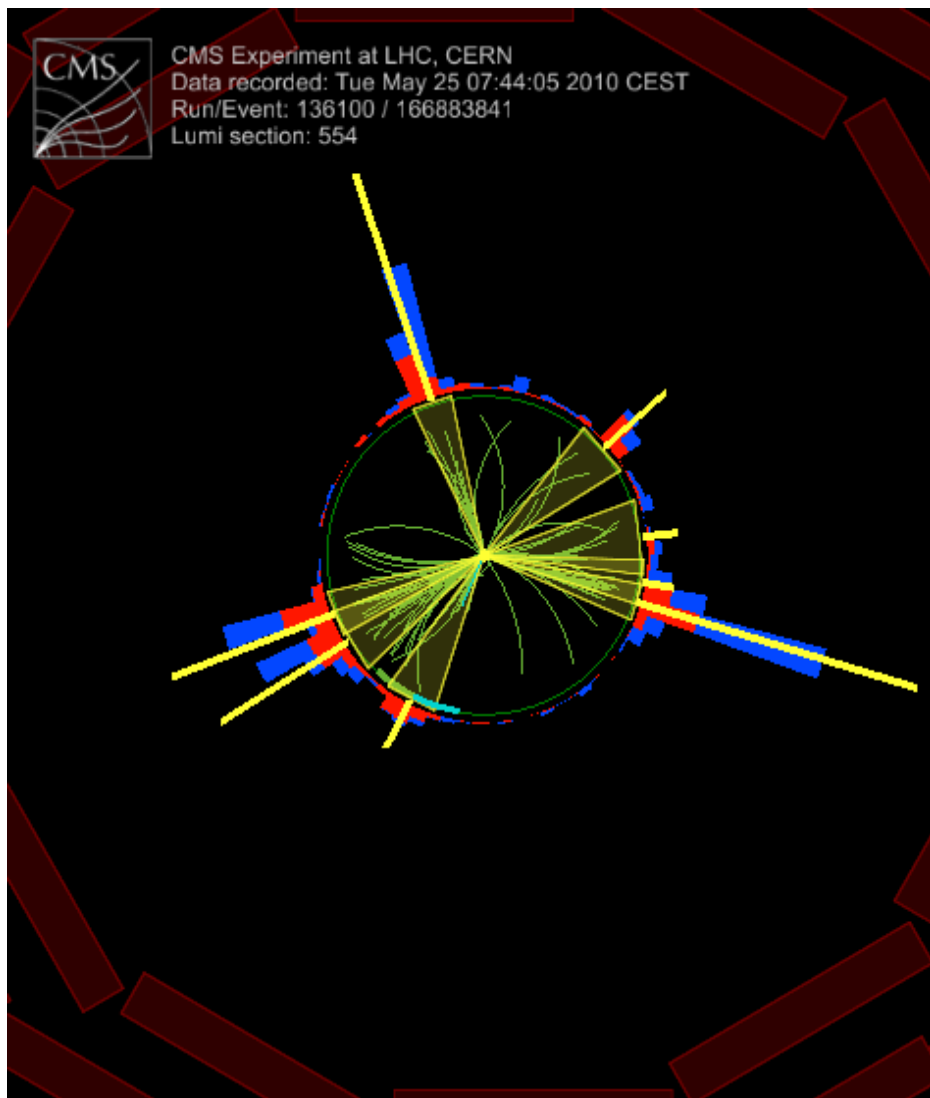
Физика со струями

CMS public result: QCD-10-011
arXiv:1106.0208v1 [hep-ex]



Результаты в хорошем согласии с NLO PQCD вплоть до значений инвариантных масс двух струйц ~3 ТэВ !!!

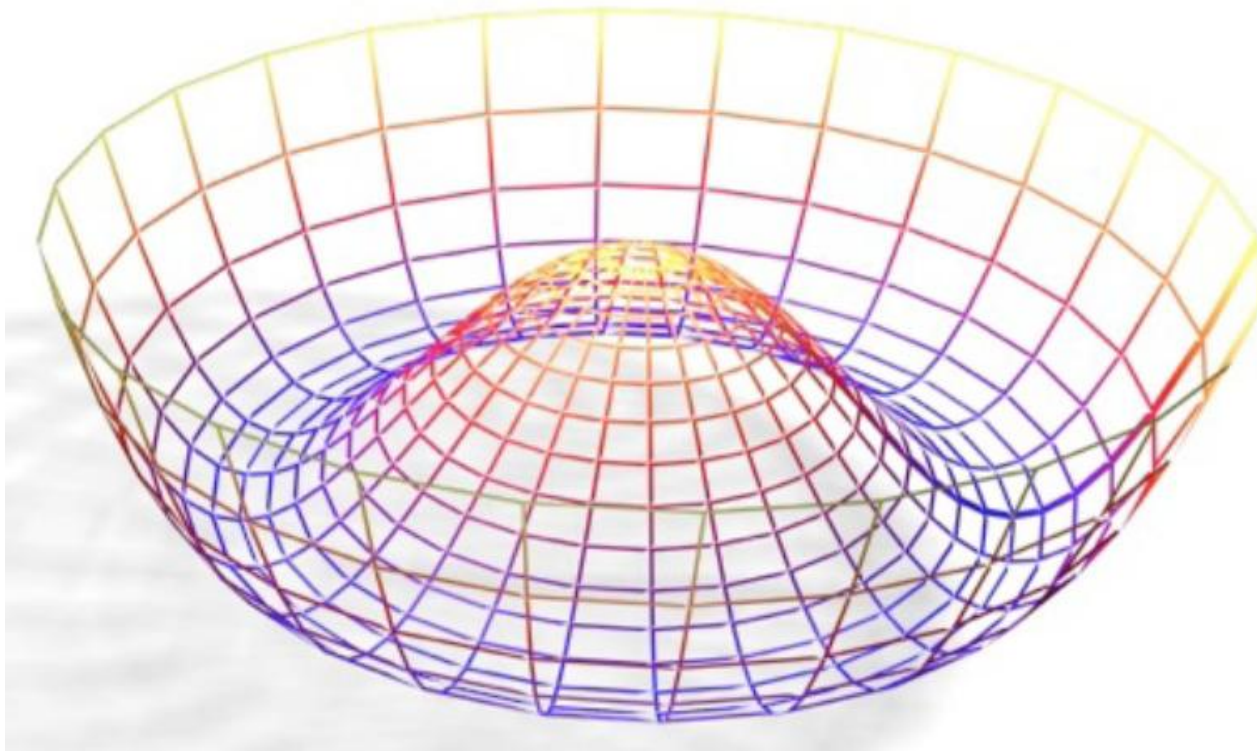
Многоструйные события при 7 ТэВ



$$H_T = \sum p_T^{jet}$$

Результаты в хорошем согласии с предсказаниями СМ для всех значений H_T от 0.5 до ~ 3ТэВ

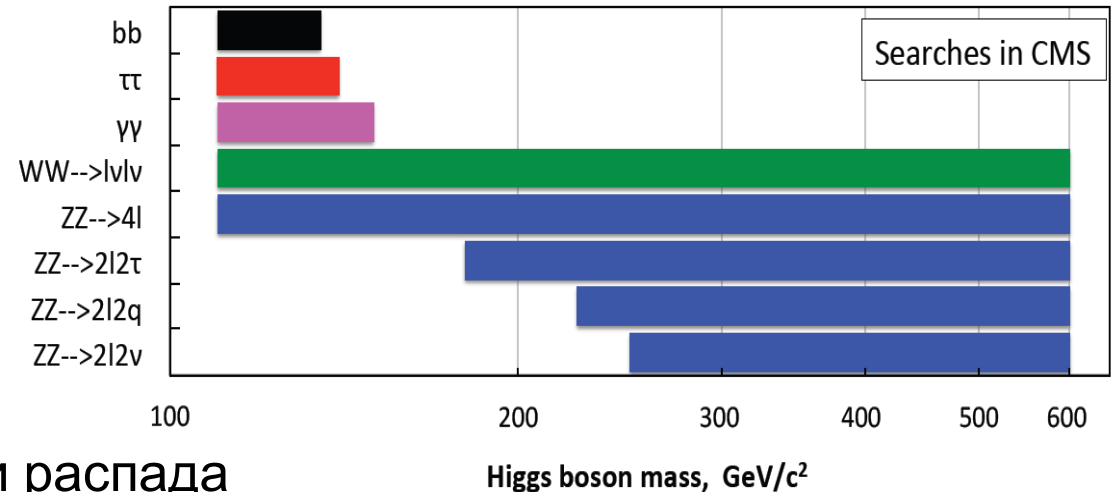
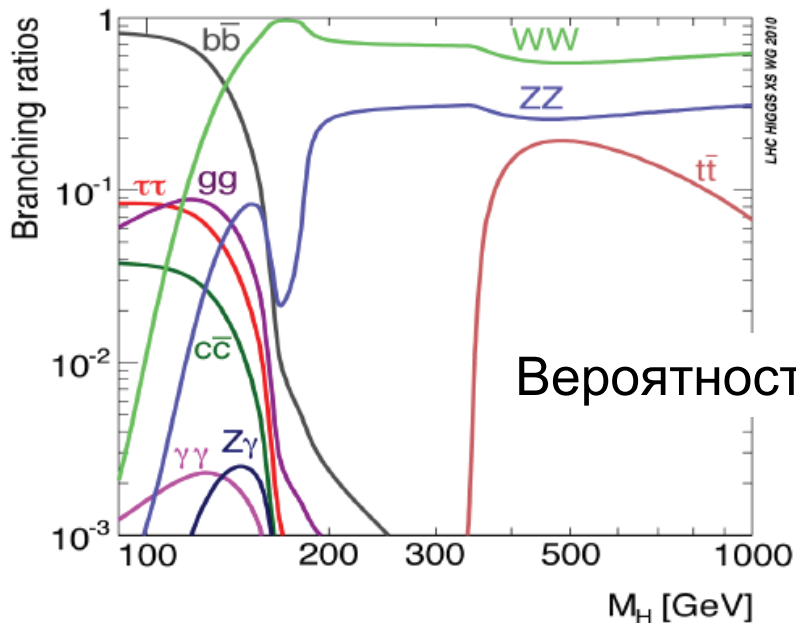
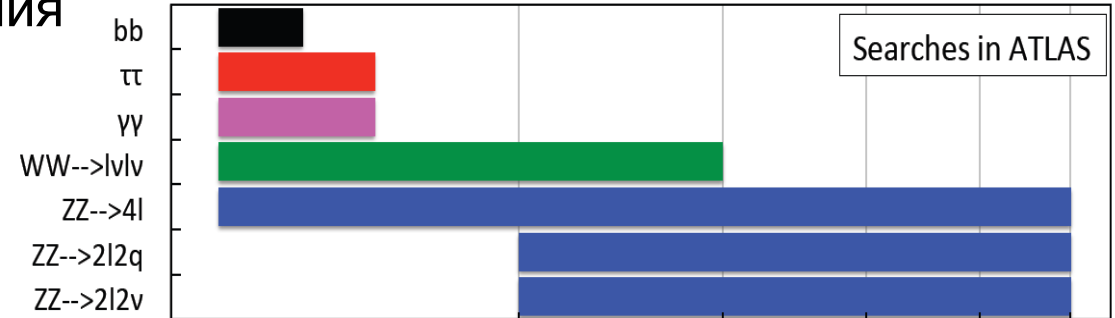
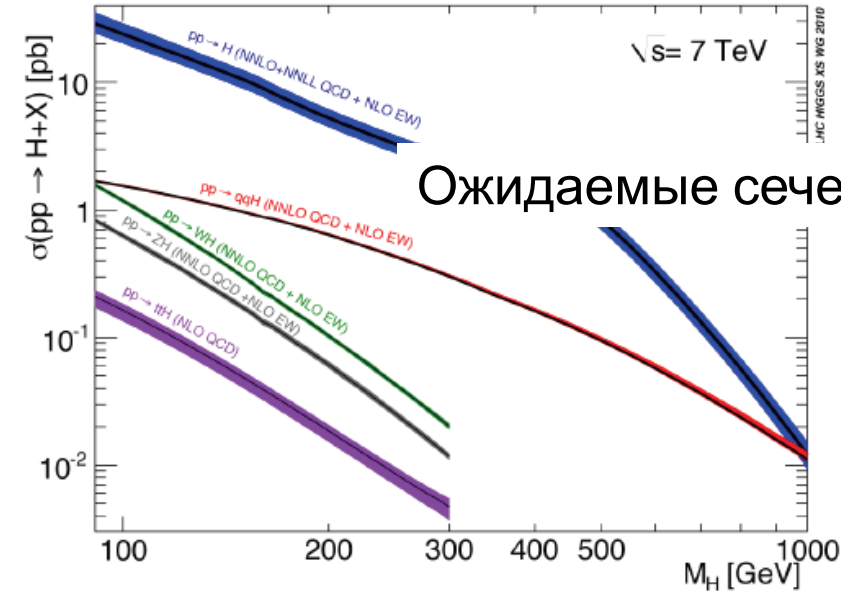
Поиск бозона Хиггса



см. детали лекцию А.В. Корытова на RDMS семинаре
07.12.2011 <http://rdms.jinr.ru/section.aspx?id=22>

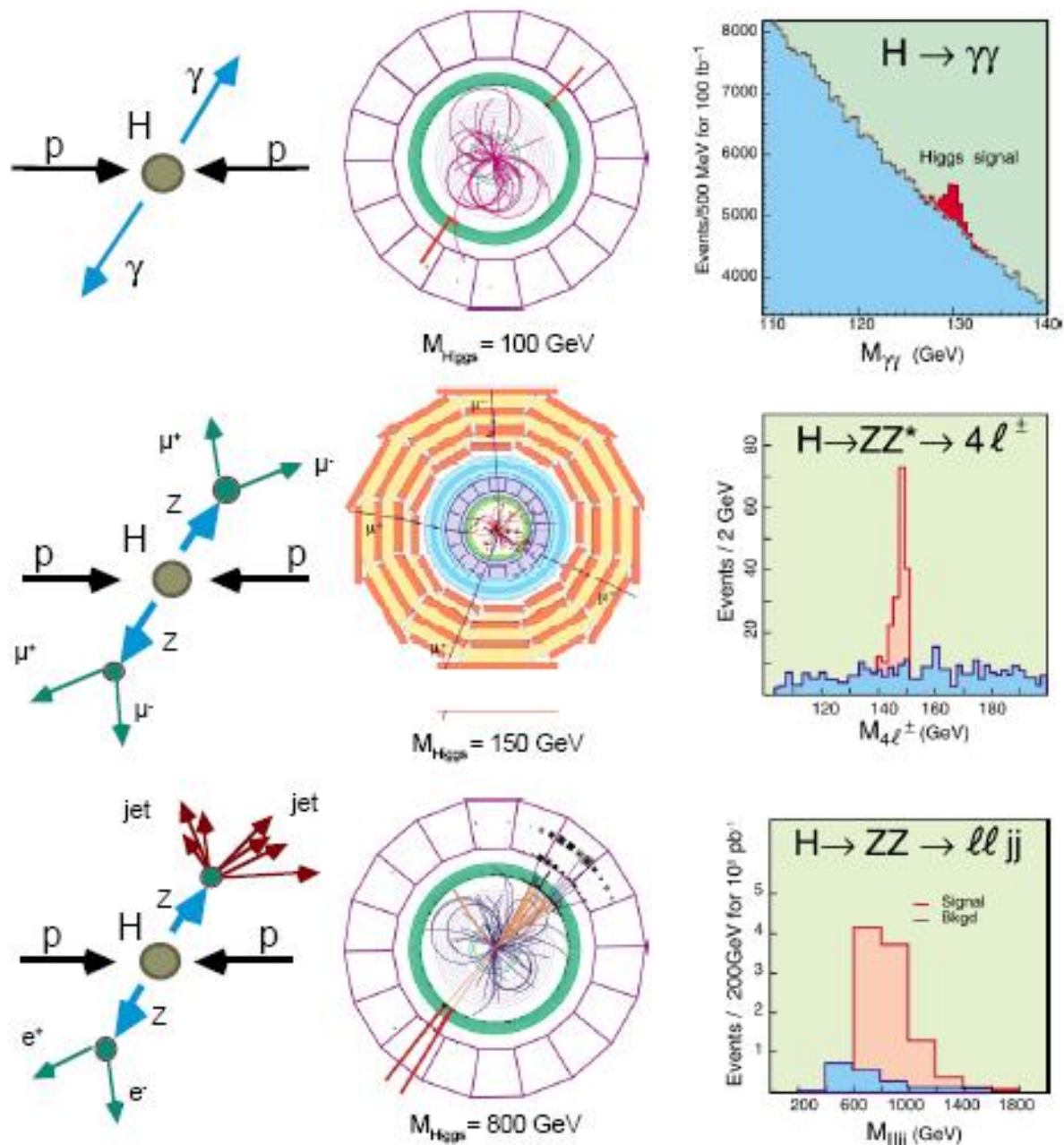
Бозон Хиггса: сечения и распады

В экспериментах ATLAS и CMS бозон Хиггса SM ищется в следующих каналах:



Поиск бозона Хиггса SM в CMS осуществляется в восьми различных ожидаемых каналах распада:
 $H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau, b\bar{b}, WW \rightarrow 2l2\nu, ZZ \rightarrow 4l, ZZ \rightarrow 2l2\nu, ZZ \rightarrow 2l2q, ZZ \rightarrow 2l2\tau$

Ожидаемая картина (моделирование)



Статистический анализ

Событие (результат) называется “**статистически значимым**”, если оно вряд ли произошло случайно

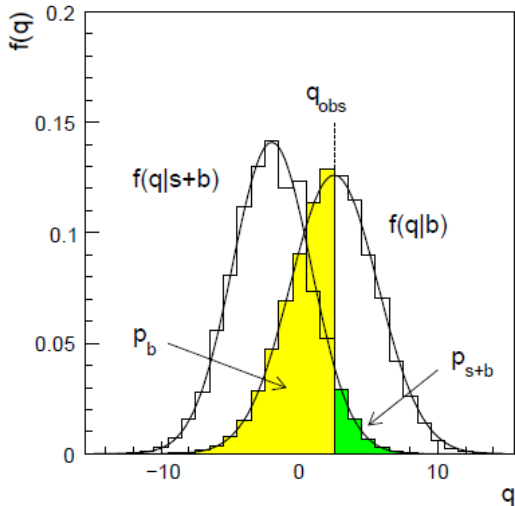
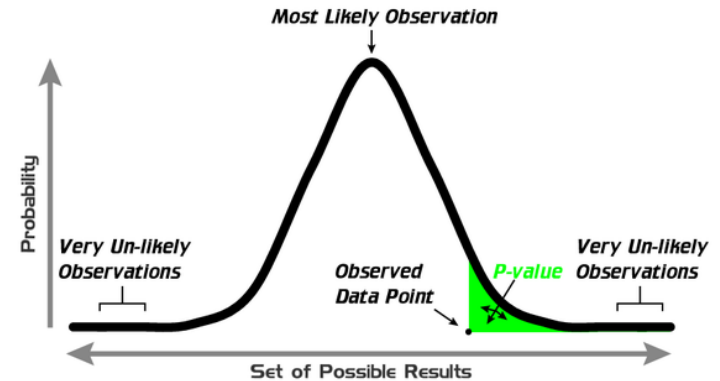
p-value - вероятность получить результат, такой как наблюдается (или выше) в предположении, что **нуль-гипотеза** верна

⇒ в нашем случае вероятность, того, что флуктуация фона достигли (или превысили) наблюдаемое значение

$$p = P(n \geq n_{\text{obs}} \mid b)$$

Нуль-гипотеза – основная проверяемая гипотеза (фон)

⇒ Нулевая гипотеза отвергается, когда значение p-value меньше уровня **стат. значимости** α (по соглашению < 0.05)



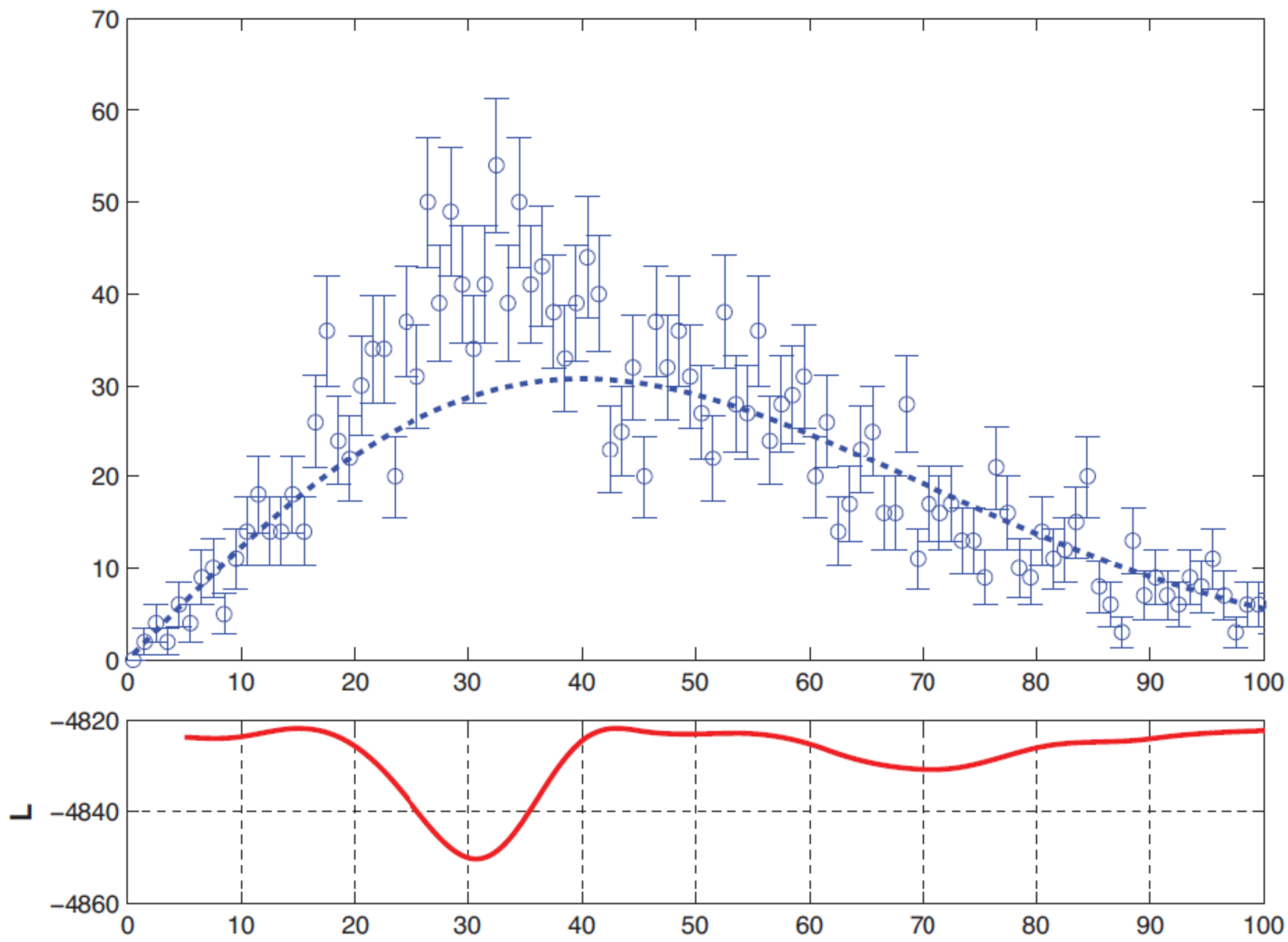
Масштабный фактор (strength factor)

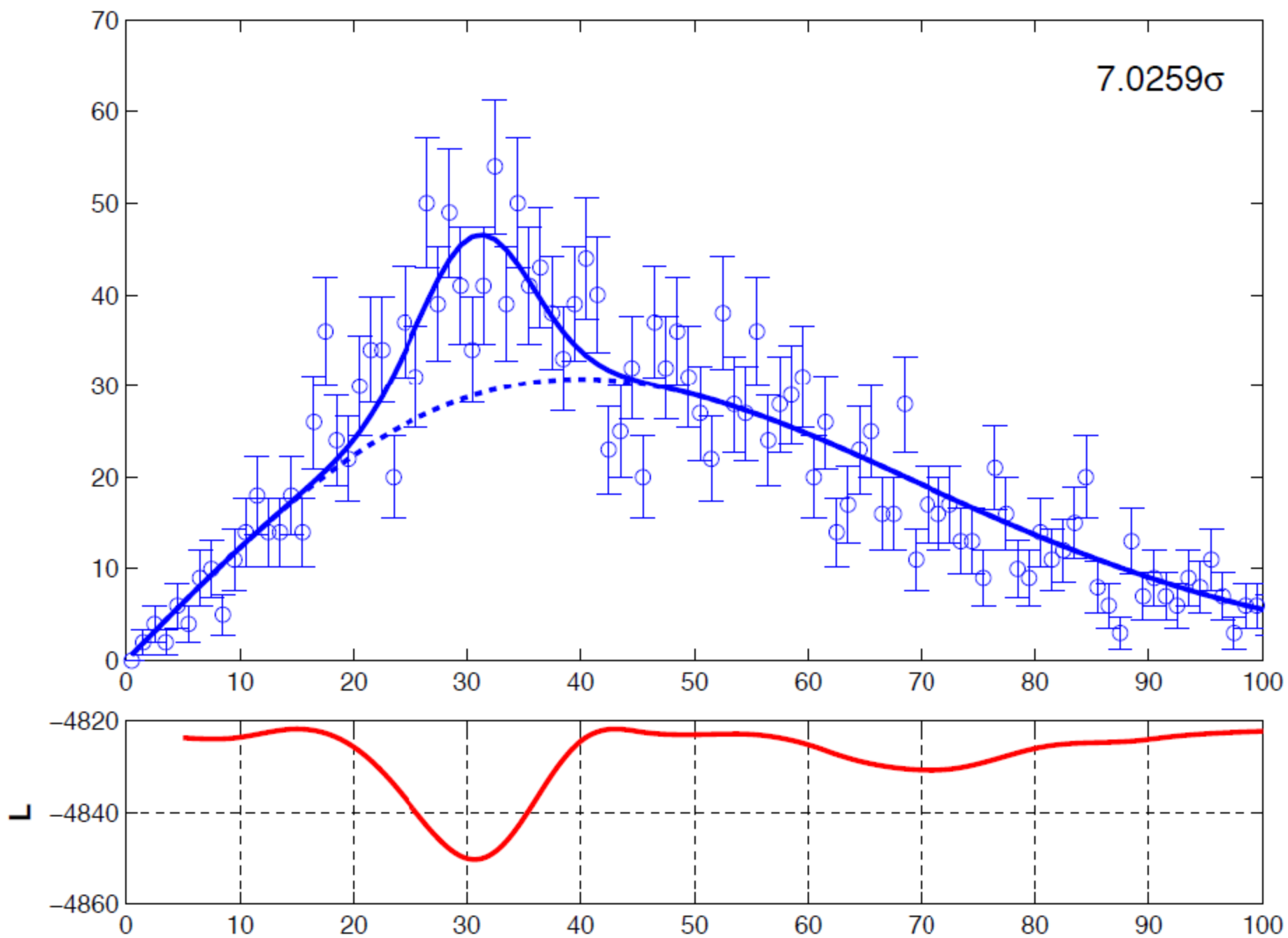
$$\mu = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{SM}}} < \mu^{95\%} \text{ at } 95\% \text{ C.L., e.g. } \mu^{95\%} = 1 \Rightarrow \text{exclusion}$$

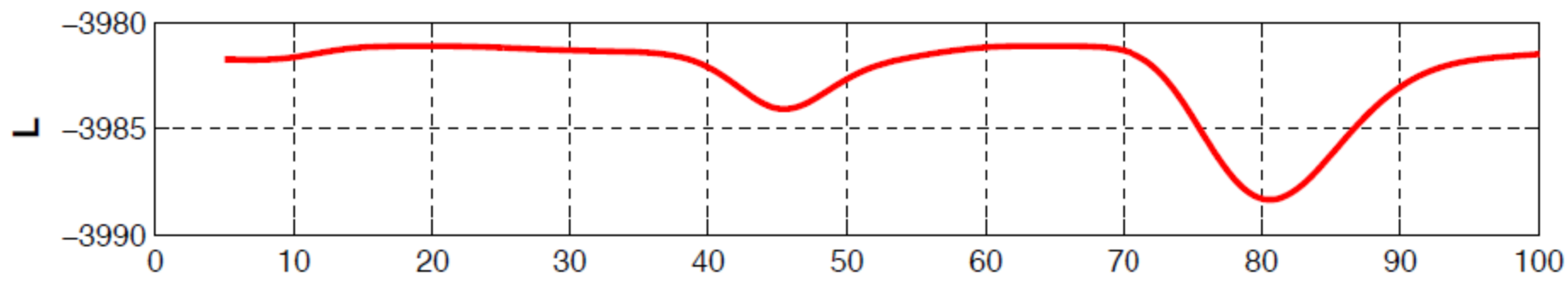
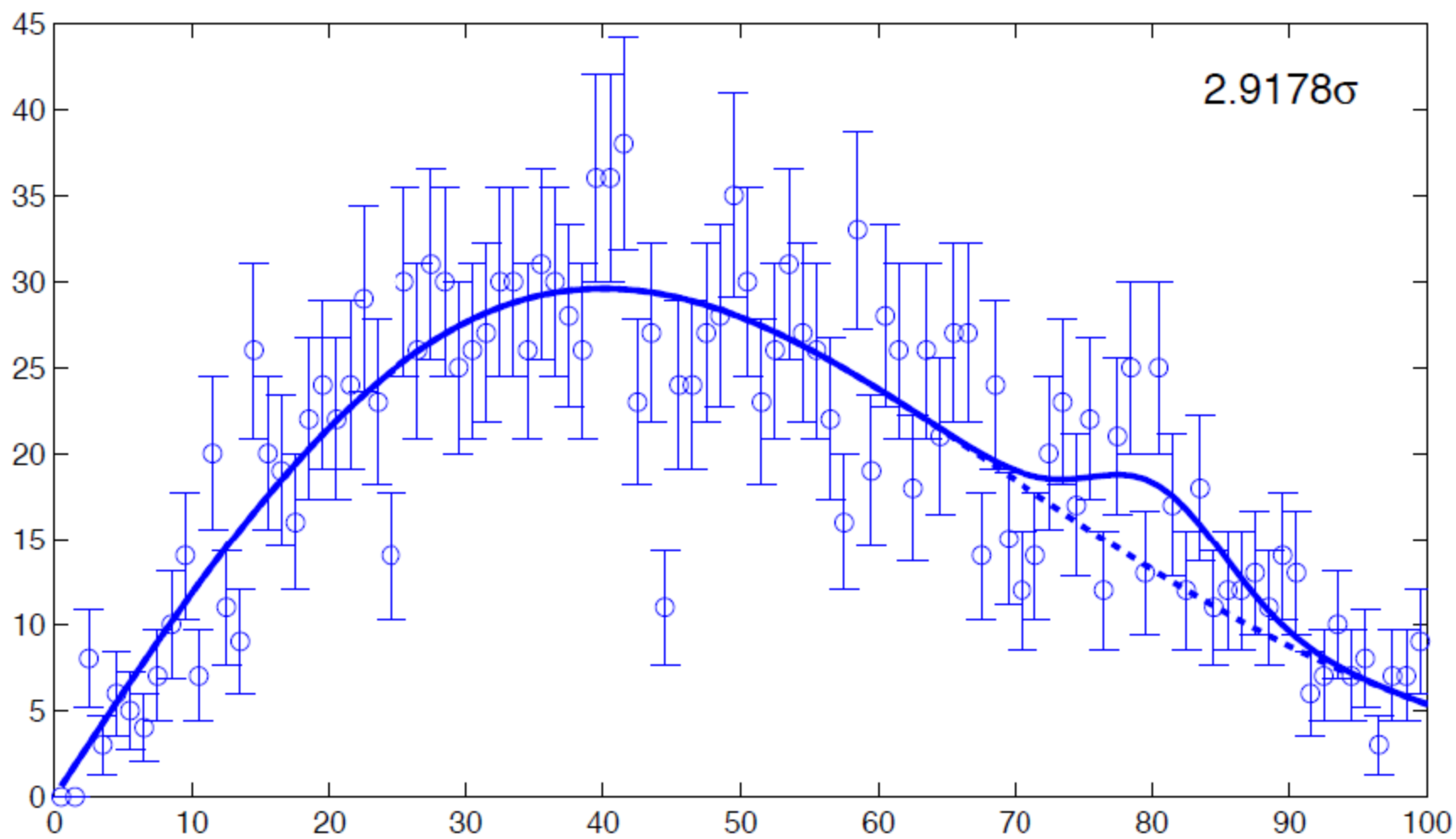
σ_{SM} – сечение бозона Хиггса в СМ, σ - гипотетическое сечение бозона Хиггса

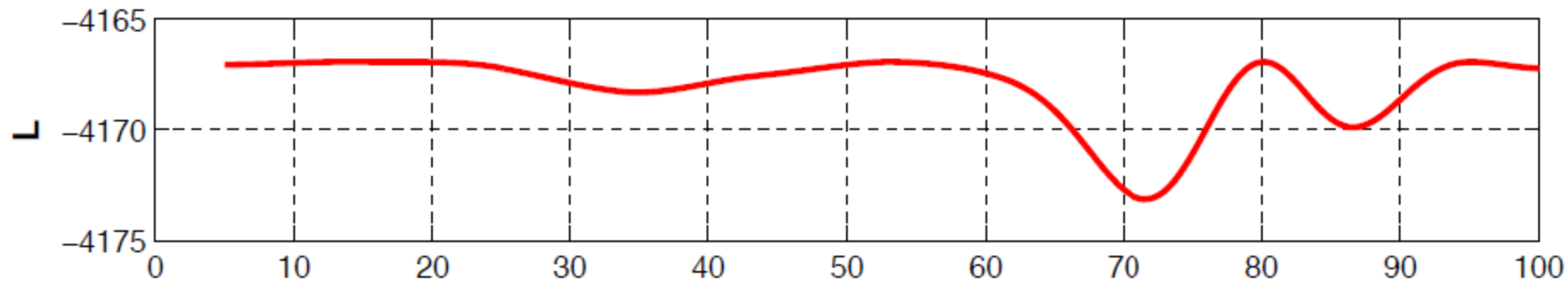
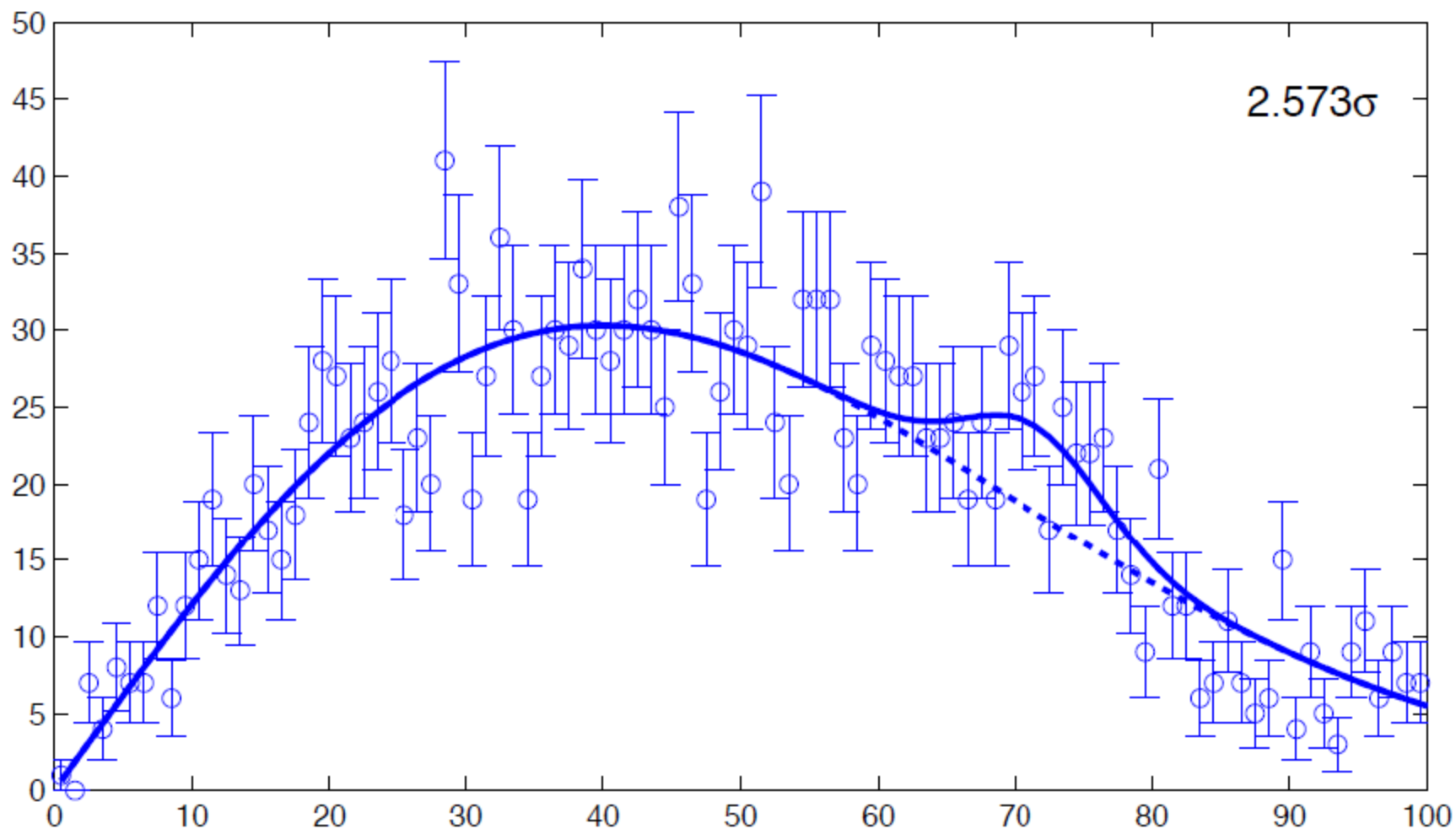
$$\text{CL}_S(\mu^{95\%}) = \frac{\text{CL}_{S+B}}{\text{CL}_B} = \frac{P(q_\mu > q_\mu^{\text{obs}} \mid B + \mu^{95\%} \times S)}{P(q_\mu > q_\mu^{\text{obs}} \mid B)} = 0.05$$

$$q_\mu = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\text{data} \mid \mu, \hat{\theta}_\mu)}{\mathcal{L}(\text{data} \mid \hat{\mu}, \hat{\theta})}$$









Look Elsewhere Effect



What is the chance that the top card in a deck is Queen of Hearts?

Local p-value

@ A.Korytov



What is the chance that the top card in at least one of N decks is Queen of Hearts?

Global p-value

The fact that the two answers are not the same is known under a fancy name **Look-Elsewhere Effect**. The ratio of the two probabilities = **trials factor**.

- Large fluctuation more likely when we test many mass points
– run background-only toy MC to account for correlations
- Trial factor ~ 17.6 in this example (10K toys)

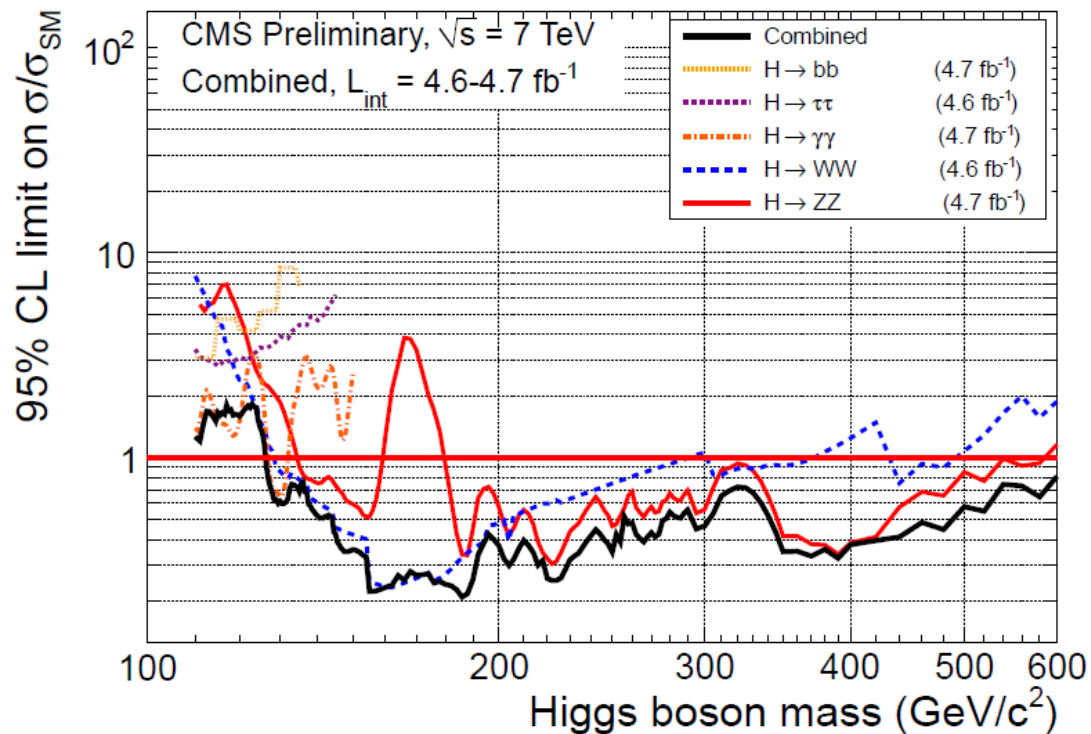
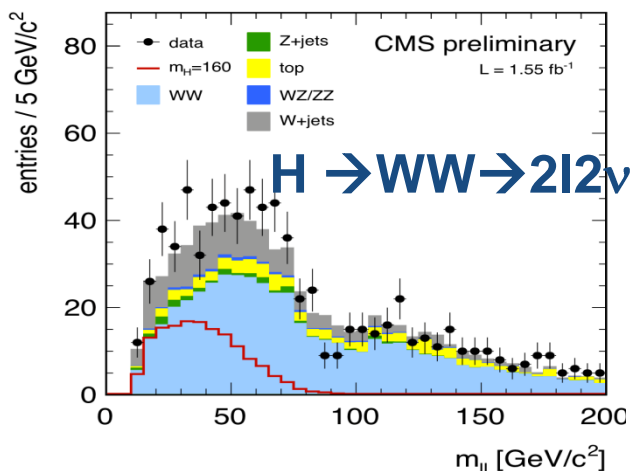
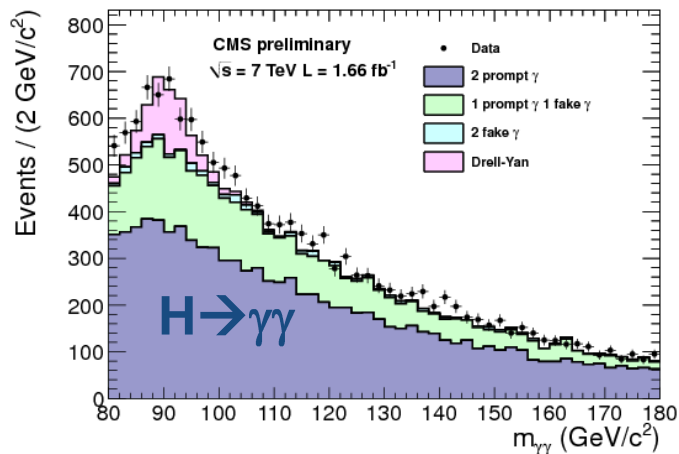
$$p_{\text{local}} = 0.010 (\sim 2\sigma) \quad \Rightarrow \quad p_{\text{LEE}} = 0.173 (\sim 0.4\sigma)$$

Используемые каналы

Table 1: Summary information on the analyses included in the combination ($\ell = e, \mu$).

Channel	m_H range (GeV/ c^2)	Lumi (fb $^{-1}$)	sub- channels	m_H reso- lution
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110 – 150	4.7	4	1–3%
$H \rightarrow \tau\tau$	110 – 145	4.6	9	20%
$H \rightarrow bb$	110 – 135	4.7	5	10%
$H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	110 – 600	4.6	5	20%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$	110 – 600	4.7	3	1–2%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\ell 2\tau$	190 – 600	4.7	8	10–15%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\ell 2\nu$	250 – 600	4.6	2	7%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\ell 2q$	$\left\{ \begin{array}{l} 130 – 164 \\ 200 – 600 \end{array} \right.$	4.6	6	3%

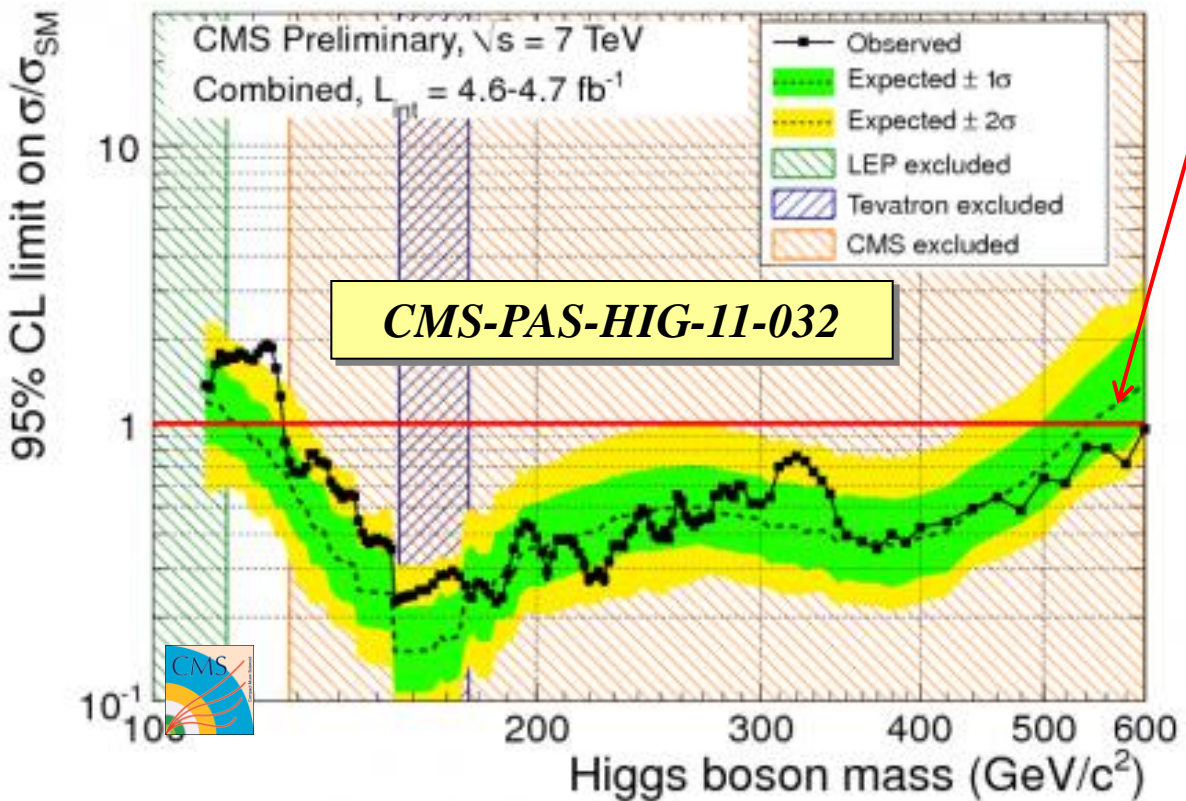
Пределы на массу Бозон Хиггса: вклад различных каналов



масса “исключена с 95 % уровнем статистической достоверности”, если, по крайней мере, в 95 % случаев в серии повторяющихся экспериментов ожидаемое число событий рождения бозона Хиггса СМ с данной массой оказывается больше, чем число событий, наблюдаемых в экспериментальных данных.

“Охота на Хиггса” в 2011 г

В настоящее время эксперимент CMS исключает существование бозона Хиггса в диапазоне масс: **127-600 ГэВ при 95% C.L. (128-525 ГэВ при 99% C.L.)**



ожидаемый предел в случае отсутствия бозона Хиггса

зеленые и желтые области соответствуют 68% и 95% стандартным отклонениям от ожидаемого предела

Публичные результаты совместного анализ данных экспериментов ATLAS и CMS используют меньшую статистику (до 2.3 фбн-1) и поэтому исключают меньший диапазон возможных масс (141-476 ГэВ)

Статистический анализ избытка событий

Для оценки превышения событий используют **тестовую статистику** (или **статистику критерия**):

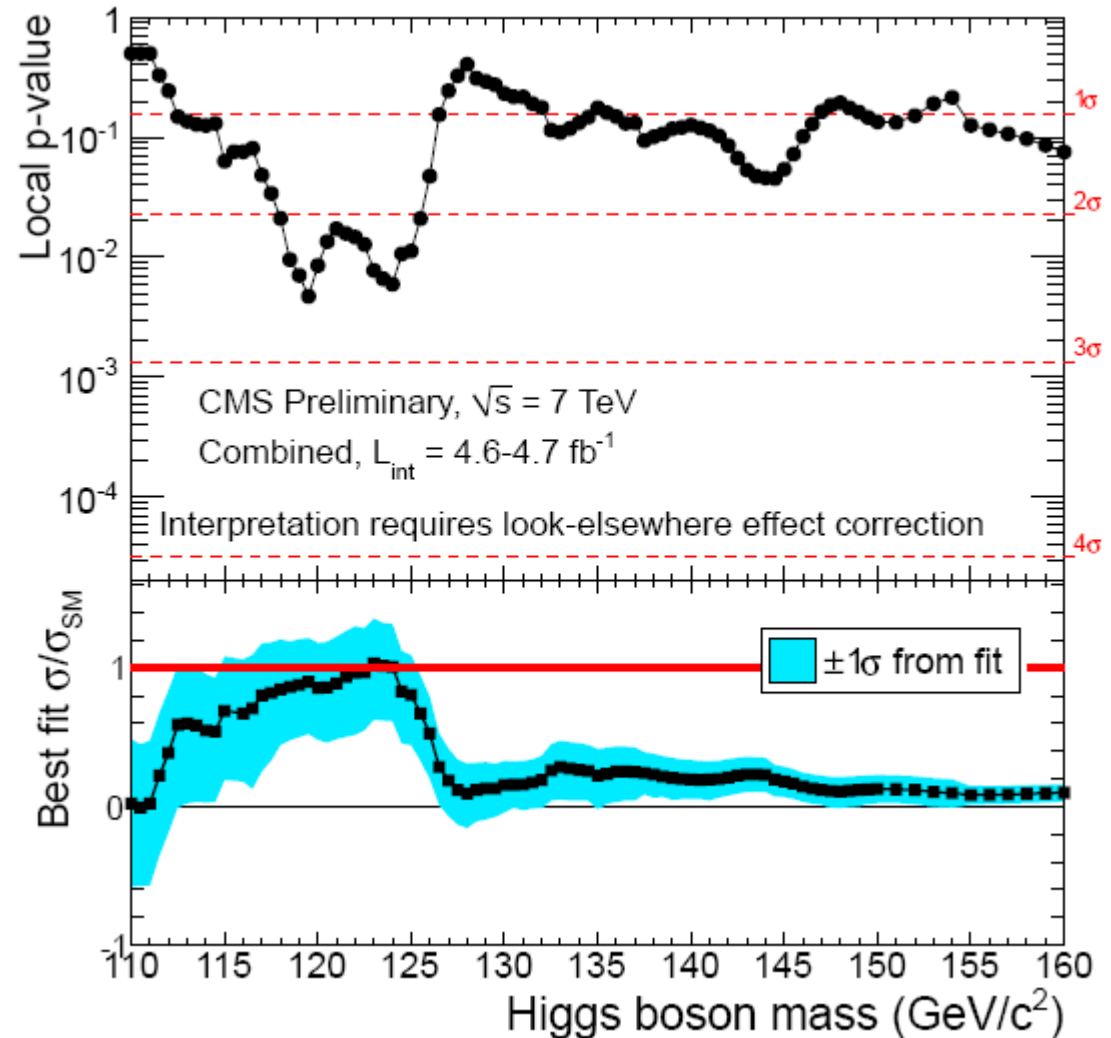
$$q_0 = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\text{data} | 0, \hat{\theta}_0)}{\mathcal{L}(\text{data} | \hat{\mu}, \hat{\theta})} \quad \text{and } \hat{\mu} \geq 0.$$

Уровень значимости теста (критерия):

$$Z = \sqrt{q_0^{\text{obs}}},$$

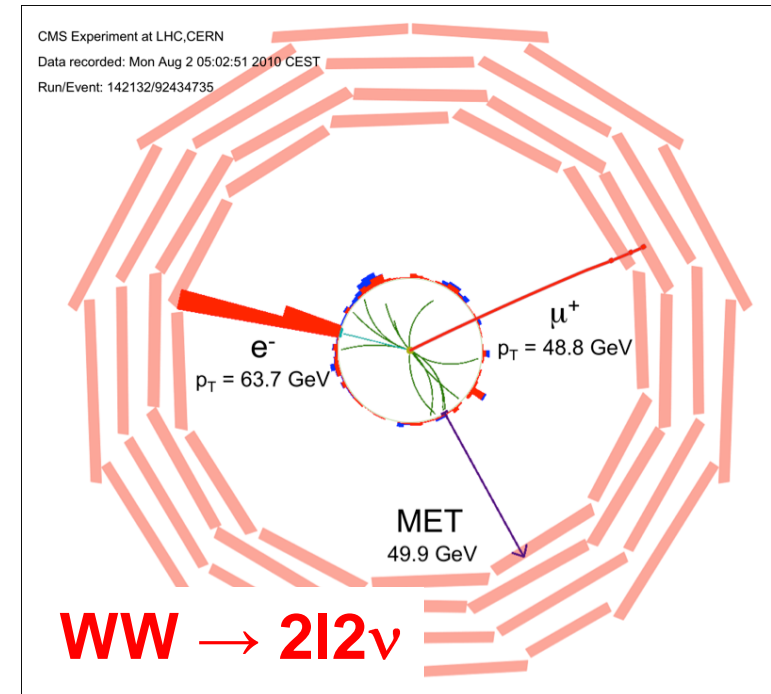
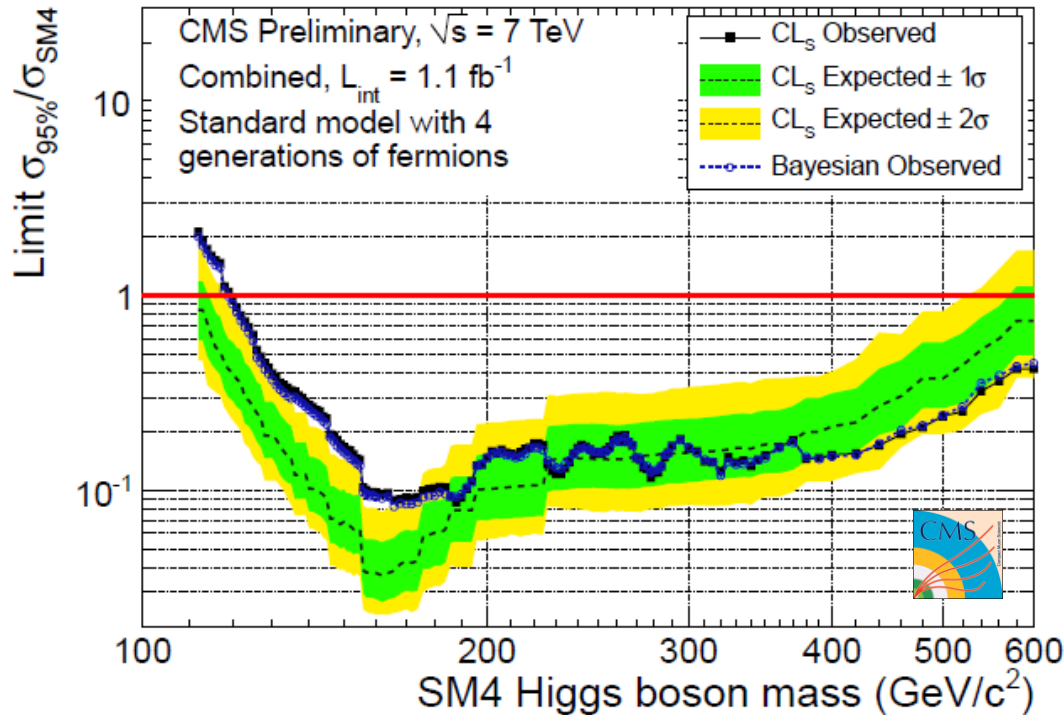
p-value:

$$p_0 = P(q_0 \geq q_0^{\text{obs}}) = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(Z / \sqrt{2} \right) \right],$$



Поиск бозона Хиггса СМ с 4мя фермионами

CMS PAS HIG-11-011

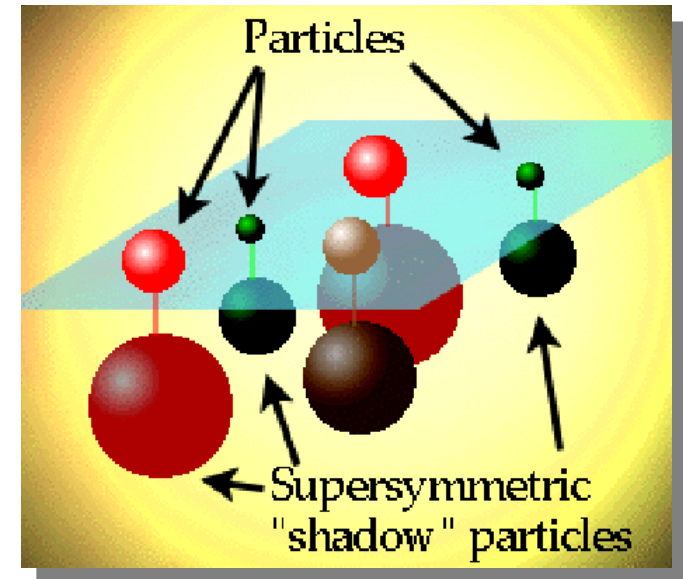
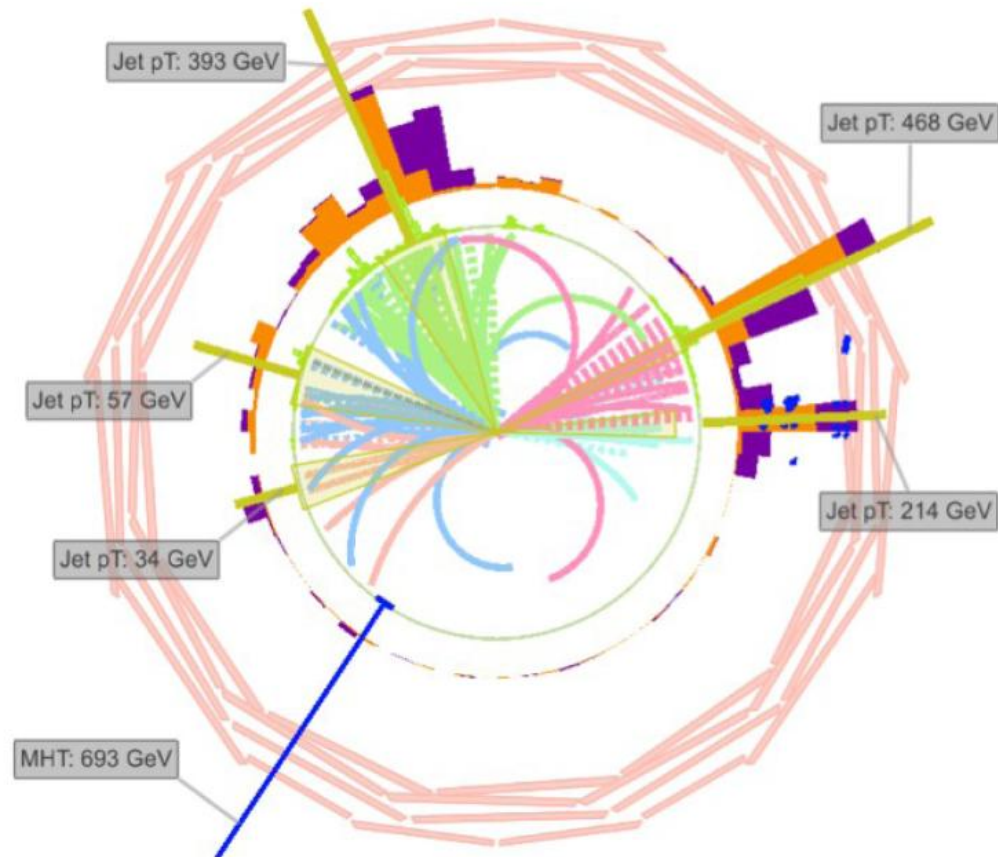


**В предположении существования 4 го поколения фермионов
“закрытая” область массы $m_H = 120-600 \text{ ГэВ}$ при 95% C.L.**

Суперсимметрия



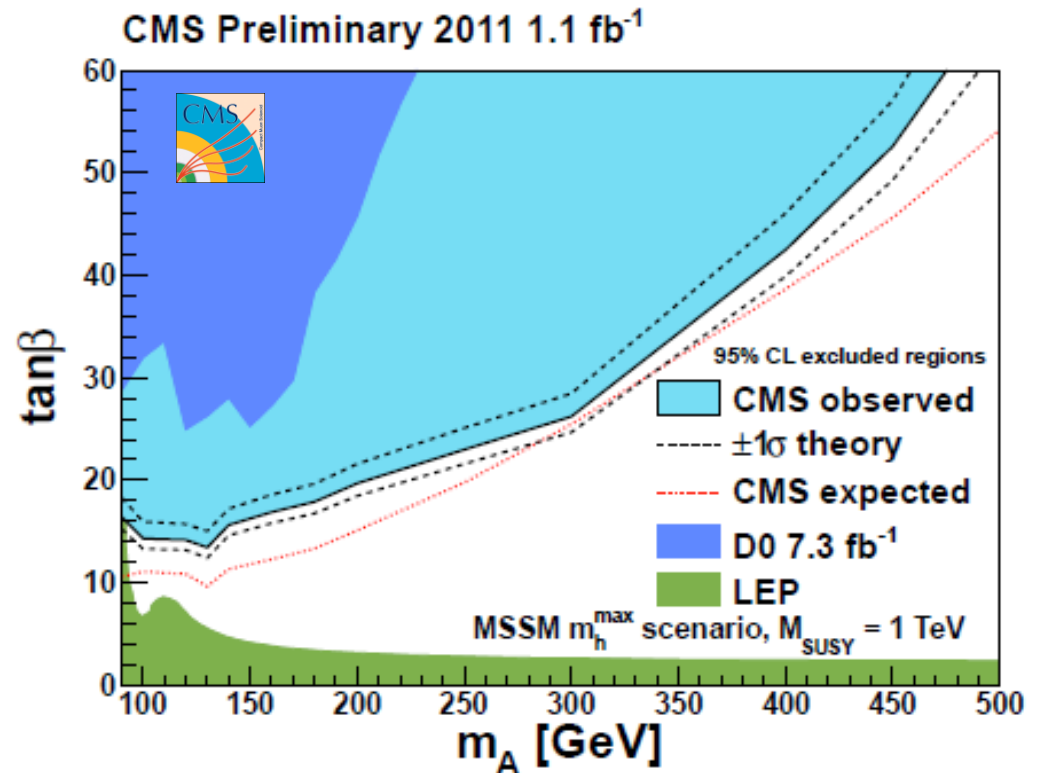
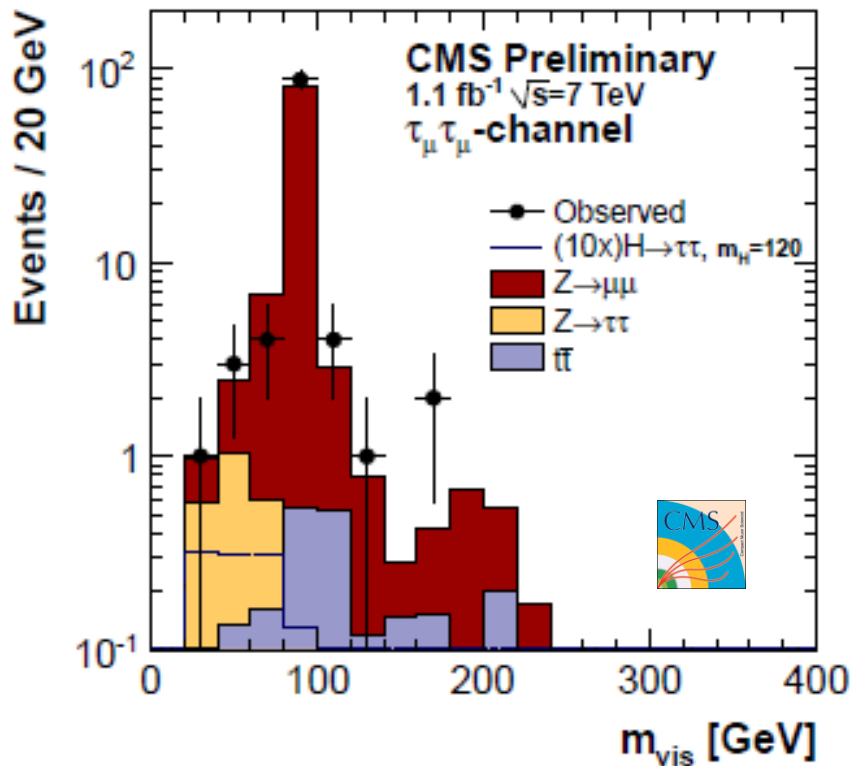
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Oct 26 07:13:54 2010 CEST
Run/Event: 148953 / 70626194
Lumi section: 49



Поиск бозона Хиггса MSSM $\rightarrow \tau\tau$

Полученные данные расширяют область параметров, исключенные Тэватрон вниз по $\tan\beta$ и значительно продвигают ее по m_A

CMS PAS HIG-11-009



“Зоопарк” частиц MSSM

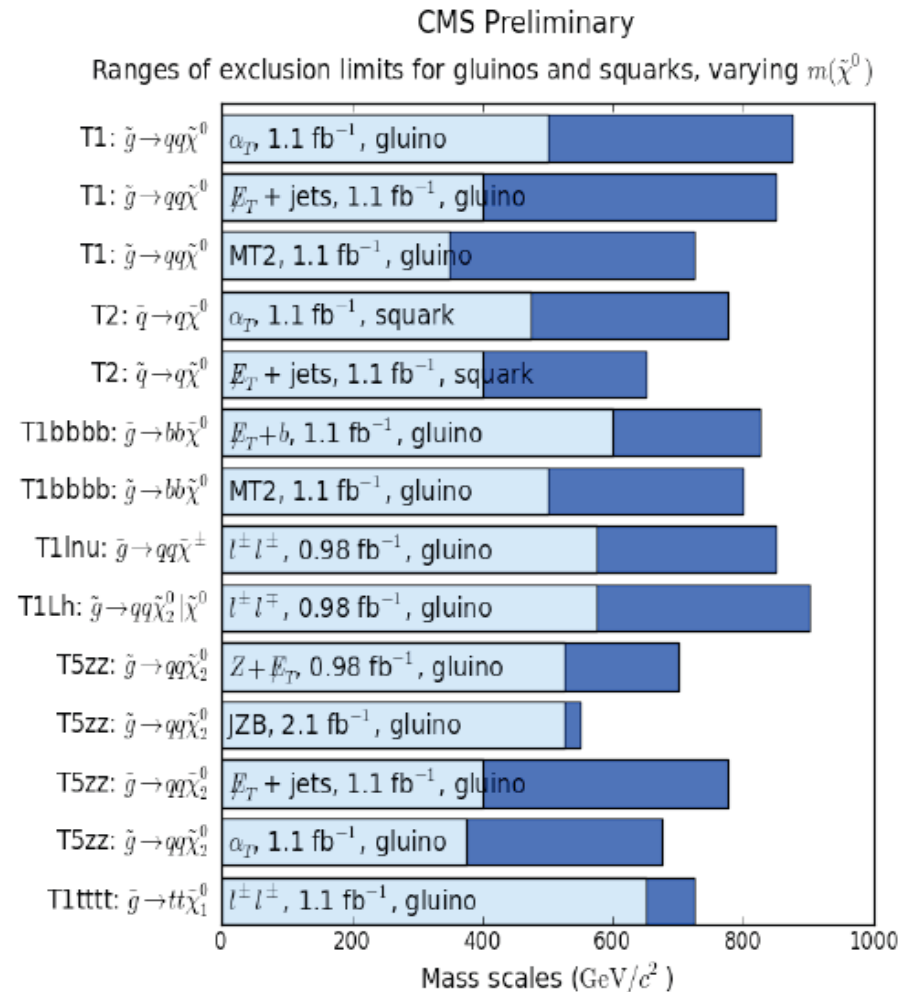
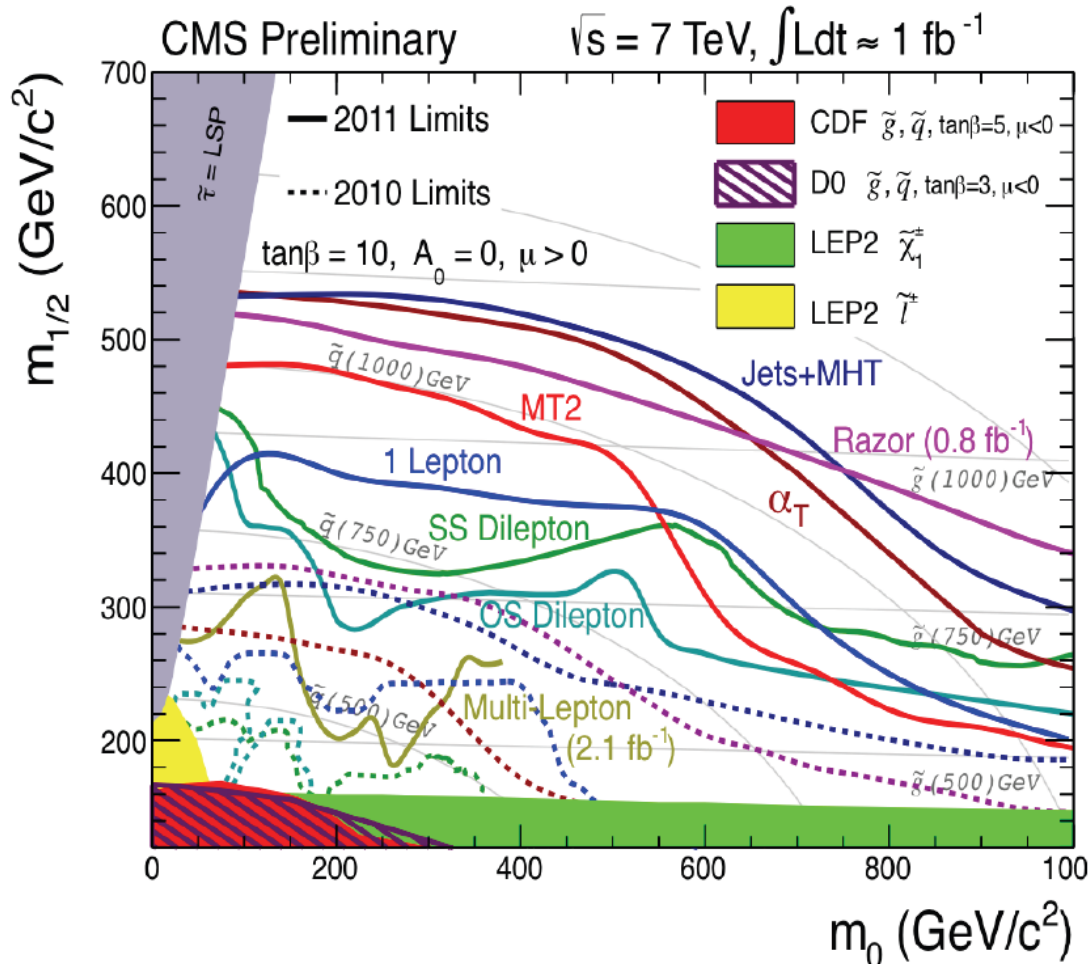
Суперполя	Бозоны	Фермионы	$SU_c(3)$	$SU_L(2)$	$U_Y(1)$
Gauge G^a V^K V^\square	gluon: $g^a, a=1,2,3$ weak: $W^K (W^\square, Z)$ hypercharge: $B(\square)$	gluino: \tilde{g}^a wino, zino: $\tilde{w}^K (\tilde{w}^\pm, \tilde{z})$ bino: $\tilde{b} (\tilde{r})$	8 1 1	0 3 1	0 0 0
Matter L_i \square_i	sleptons $\begin{cases} \tilde{L}_i = (\tilde{H}, \tilde{e})_L \\ \tilde{e}_i = \tilde{e}_R \end{cases}$	leptons $\begin{cases} L_i = (H, e)_L \\ e_i = e_R \end{cases}$	1 1	2 1	-1 2
Matter Q_i U_i D_i	squarks $\begin{cases} \tilde{Q}_i = (\tilde{u}, \tilde{d})_L \\ \tilde{U}_i = \tilde{u}_R \\ \tilde{D}_i = d_R \end{cases}$	quarks $\begin{cases} Q_i = (u, d)_L \\ U_i = u_R^c \\ D_i = d_R^c \end{cases}$	3 3* 3*	2 1 1	1/3 -4/3 2/3
Higgs H_1 H_2	two higgs doublets H_1 H_2	higgsions $\begin{cases} \tilde{H}_1 \\ \tilde{H}_2 \end{cases}$	1 1	2 2	-1 1

Каналы распада частиц MSSM

Sparticle	Decay mode	Observables
squarks	$\tilde{q}_{L,R} \rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0$	jet + photino
	$\tilde{q}_L \rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm$	jet + chargino
	$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{g}$	jet + gluino
	$\tilde{t}_1 \rightarrow c + \chi_1^0$	2 collinear jets + \cancel{E}_T
	$\tilde{t}_1 \rightarrow b + \chi_1^+$	2 b jets + 2 leptons + \cancel{E}_T
	$\tilde{t}_1 \rightarrow b + \chi_1^0 f \bar{f}'$	4 jets + \cancel{E}_T
sleptons	$\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\chi}_i^0$	lepton + photino
	$\tilde{l}_L \rightarrow H_L + \tilde{\chi}_i^\pm$	neutrino + chargino
gluino	$\tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{r}$	2 jets + photino
	$\tilde{g} \rightarrow g + \tilde{r}$	jet + photino
chargino	$\tilde{\chi}_i^\pm \rightarrow e + H_e + \tilde{\chi}_i^0$	electron + neutrino + photino
	$\tilde{\chi}_i^\pm \rightarrow q + \bar{q}' + \tilde{\chi}_i^0$	2 jets + photino
neutralino	$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_i^0 + X$	2 leptons + \cancel{E}_T , 2 jets + \cancel{E}_T , 2 leptons + 2 jets + \cancel{E}_T , \cancel{E}_T (invisible channel)

Первые поиски SUSY

Получены ограничения на пространство параметров MSSM:
 $m_{1/2} > 555$ ГэВ и



For limits on $m(\tilde{g}), m(\tilde{q}) > m(\tilde{g})$ (and vice versa). $\sigma^{prod} = \sigma^{NLO-QCD}$.
 $m(\tilde{\chi}^\pm), m(\tilde{\chi}_2^0) \equiv \frac{m(\tilde{g}) + m(\tilde{\chi}^0)}{2}$.
 $m(\tilde{\chi}^0)$ is varied from 0 GeV/c² (dark blue) to $m(\tilde{g}) - 200$ GeV/c² (light blue).

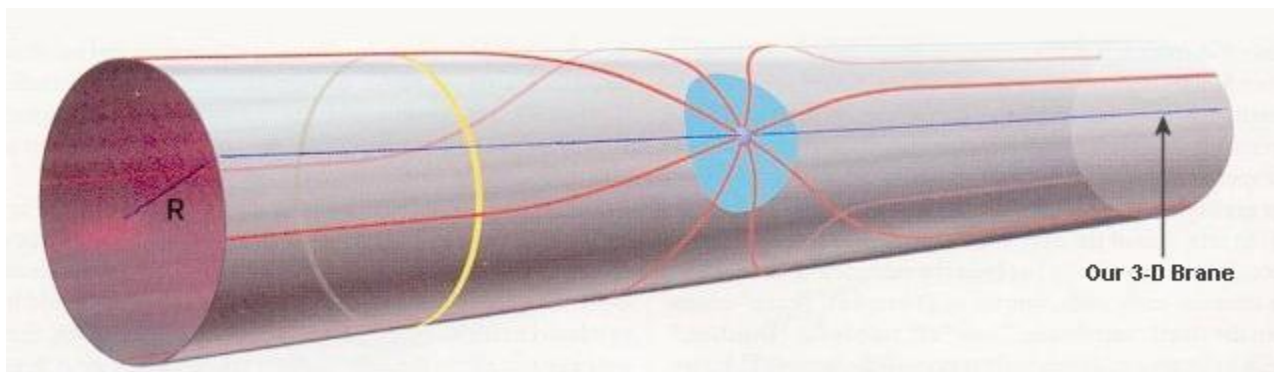
Резюме по Суперсимметрии

если в Природе существует суперсимметрия,
нарушающаяся при 1 ТэВ

то она может быть открыта в ближайшее
будущее

**CMS и ATLAS способны зарегистрировать
новые частицы в диапазоне масс до
нескольких ТэВ**

Экзотика



Что ищем?

- Расширенные калибровочные модели
 - ✓ новые калибровочные бозоны (Z' и W')
 - ✓ новые дважды заряженные бозоны Хиггса (H^{++} , H^{--})

- Дополнительные измерения

- 4ое поколение

- Лептокварки

- ... и многое другое

Экспериментальные сигналы

- ❑ Di-lepton, di-jets and di-photon resonance states (new particles) in RS1-model (RS1-graviton) and TeV-1 extra dimension model (ZKK)
- ❑ Di-leptons, di-jets continuum modifications (virtual graviton production in ADD)
- ❑ Single Jets/Single Photons + Missing ET (direct graviton production in ADD)
- ❑ Single Leptons + missing ET in WKK decays in TeV-1 extra dimension model (WKK)
- ❑ Back-to-back energetic jets + Missing ET (UED)
- ❑ 4 jets + 4 leptons + Missing ET (mUED)



Тяжелые резонансы

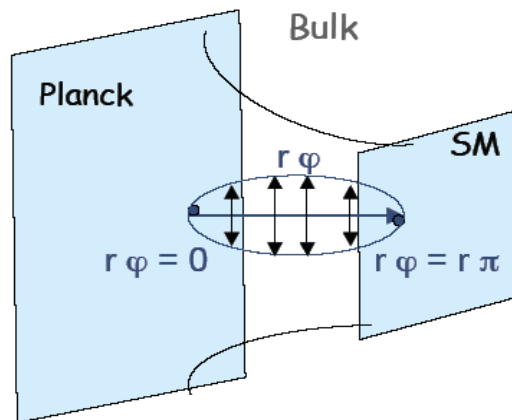
- ❑ Extra gauge bosons predicted by extended gauge models (left-right symmetric models and GUT-inspired models)
- ❑ Kaluza-Klein graviton excitations arising in extra dimensions models with curved bulk space (Randall-Sandrum model)
 - Small extra spatial dimensions, Curved bulk space (AdS_5 - slice)
 - Well separated graviton mass spectrum
- ❑ Kaluza-Klein excitations of SM gauge bosons in large flat extra-dimensions (TeV-1 Models)
 - Bosons could also propagate in the bulk
 - Fermions are localized at the same (opposite) orbifold point: destructive (constructive) interference between SM gauge bosons and KK excitations
- ❑ Technicolor

Signals: di-leptons/di-jets/di-photons resonance states in high ($\sim TeV$) invariant mass range \Rightarrow new particles would be observed as a bump, excess in the mass spectrum

The excellent momentum and energy resolutions are required !!

Новые резонансы: RS1/TeV⁻¹

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



5D curve space with AdS₅ slice:
two 3(brane)+1(extra)+time!

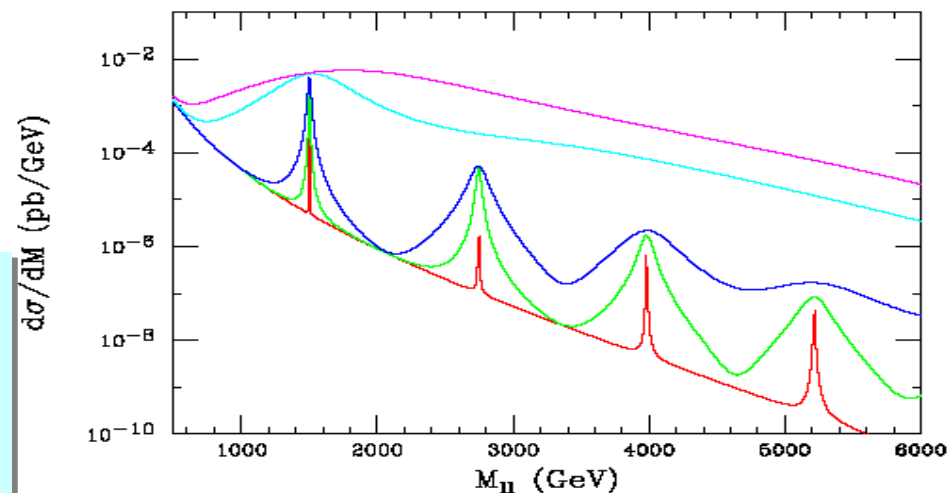
I. Antoniadis, PLB246 377 (1990): TeV⁻¹

- ❑ Multi-dimensional space with orbifolding (5D in the simplest case, n=1)
- ❑ The fundamental scale is not planckian: $M_D \sim \text{TeV}$
- ❑ Gauge bosons can travel in the bulk

Signals:

Narrow, high-mass resonance states in di-lepton, di-jet, di-photon events:

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



$$q\bar{q} \rightarrow Z_{KK} \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, jet + jet$$

Новые калибровочные бозоны (Z'/W')

- Z' is an additional heavy gauge boson, predicted in many extended gauge theories, excluded mass: ~ 1 TeV (direct searches)

CMS
PTDR 2006

Model	Γ/M %	$Z' \rightarrow \mu^+ \mu^-$ BR in %	$\sigma^{\text{LO}} \cdot \text{Br}$, full interference, fb (PYTHIA)		
			1 TeV/c ²	3 TeV/c ²	5 TeV/c ²
Z_{SSM}	3.1	3.0	610	2.8	0.050
Z_ψ	0.6	4.0	340	1.7	0.032
Z_η	0.7	3.4	370	1.8	0.035
Z_χ	1.3	5.7	500	2.2	0.038
Z_{LRM}	2.2	2.3	500	2.3	0.040
Z_{ALRM}	1.6	8.6	740	3.7	0.077

- expected properties of studied models

Z_{SSM} within the sequential standard model

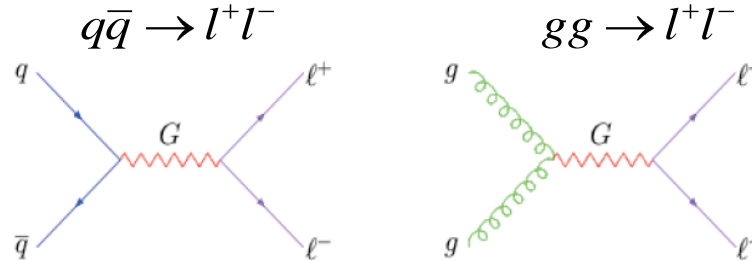
Z_η, Z_ψ, Z_χ arising in E_6 (and $SO(10)$) GUT groups

Z_{LRM} and Z_{ALRM} arising in the framework of the so-called “left-right” and “alternative left-right” models ($g_R = g_L$ chosen)

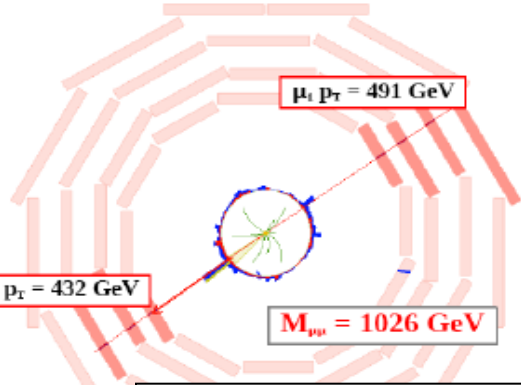
k-factor used: 1.35 (mass-independent)

Лептонные пары

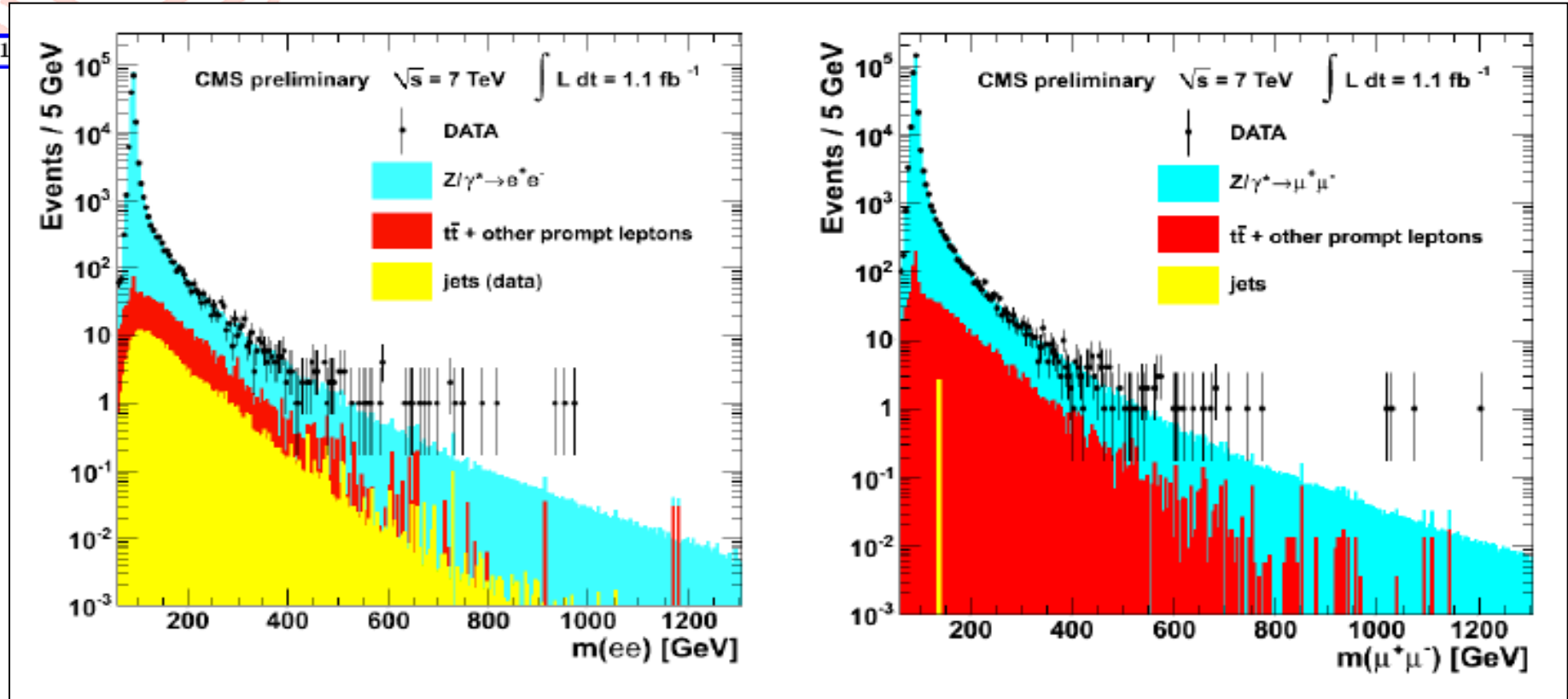
New Physics ($Z'/Z_{KK}/G_{KK}$) contributions to SM processes:



CMS PAS EXO-11-019



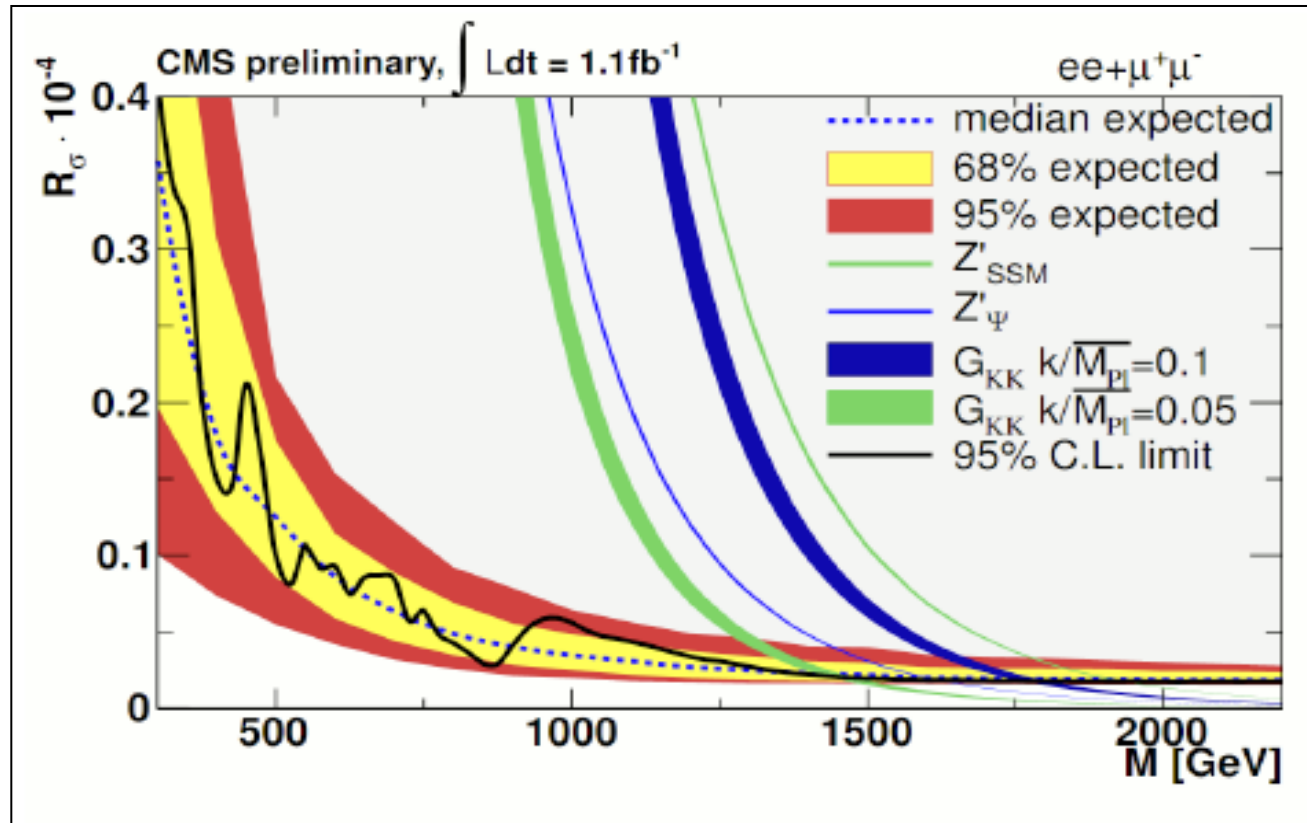
EXO-11-01



Пределы в канале с парой лептонов

$$R_\sigma \equiv \frac{\sigma(pp \rightarrow Z' + X \rightarrow \ell\ell + X)}{\sigma(pp \rightarrow Z + X \rightarrow \ell\ell + X)}$$

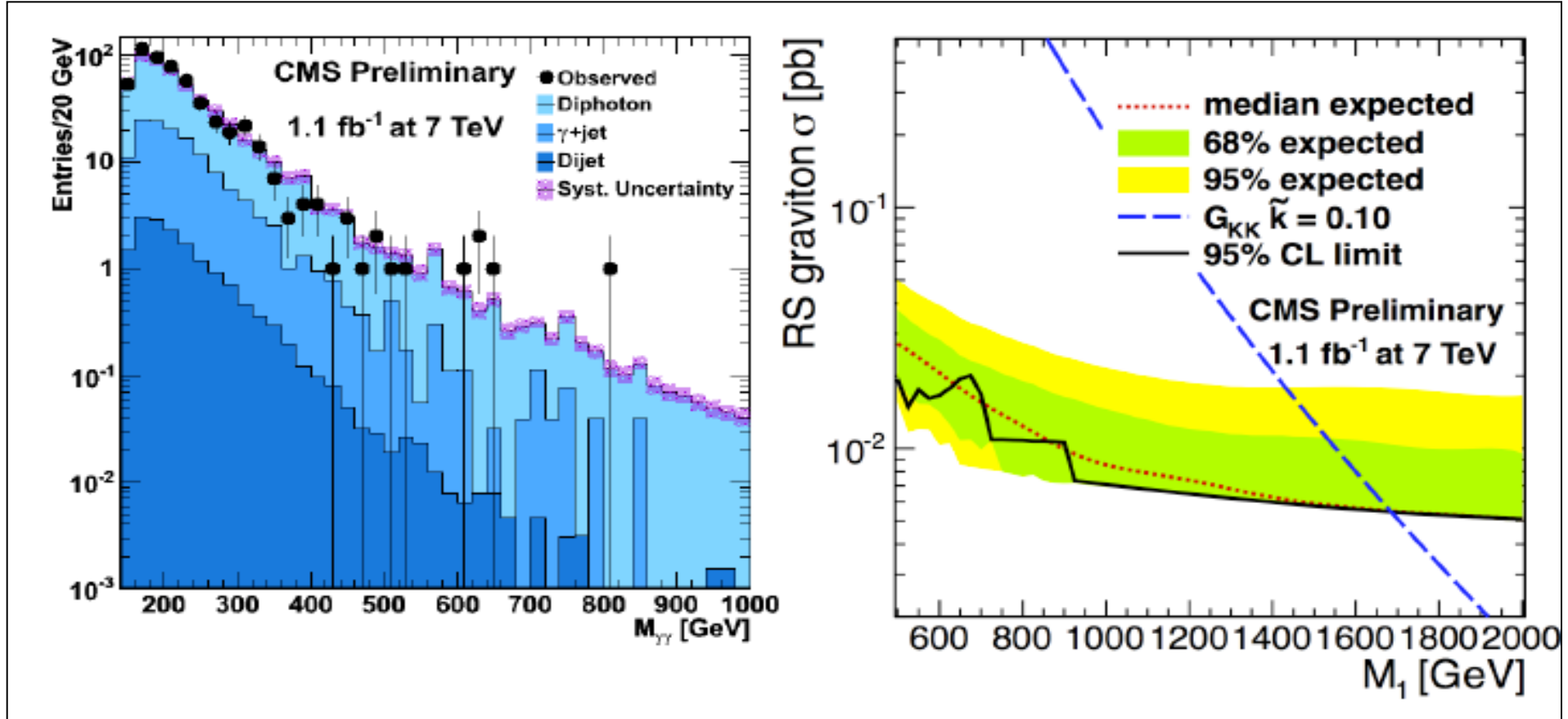
CMS PAS EXO-11-019



A Z' with standard-model-like couplings can be excluded **below 1940 GeV**, the superstring-inspired Z' **below 1620 GeV**, and RS Kaluza–Klein gravitons **below 1450 (1780) GeV** for couplings of 0.05 (0.10)

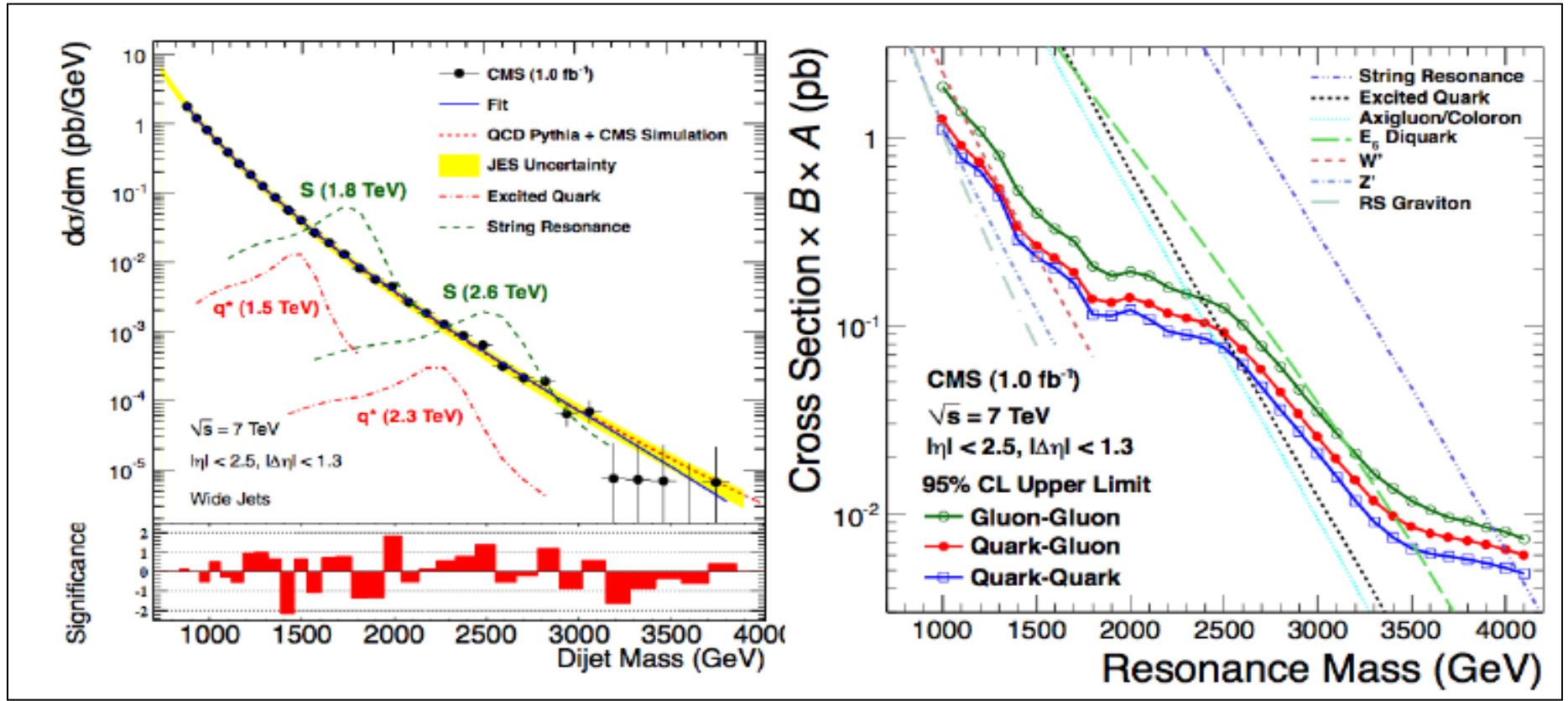
Пары фотонов

CMS PAS EXO-11-038



RS Kaluza–Klein gravitons below 1.7 TeV for couplings of 0.10

Пары струй



CMS PAS EXO-11-015

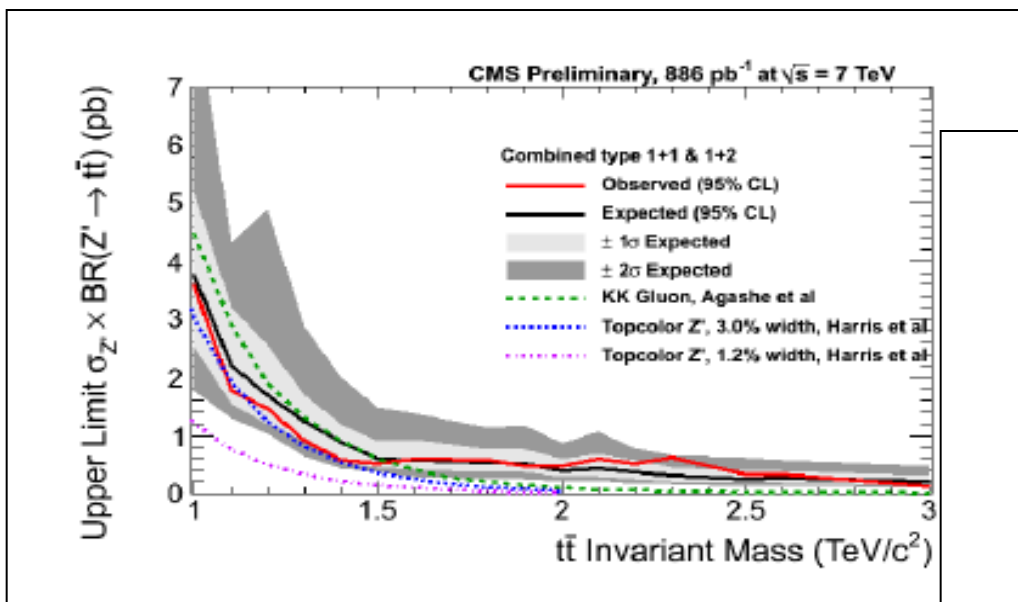
arXiv:1107.4771

Phys. Lett. B, 3 (704) 2011, 123

Model	Excluded Mass (TeV)	
	Observed	Expected
String Resonances	4.00	3.90
E ₆ Diquarks	3.52	3.28
Excited Quarks	2.49	2.68
Axigluons/Colorons	2.47	2.66
W' Bosons	1.51	1.40

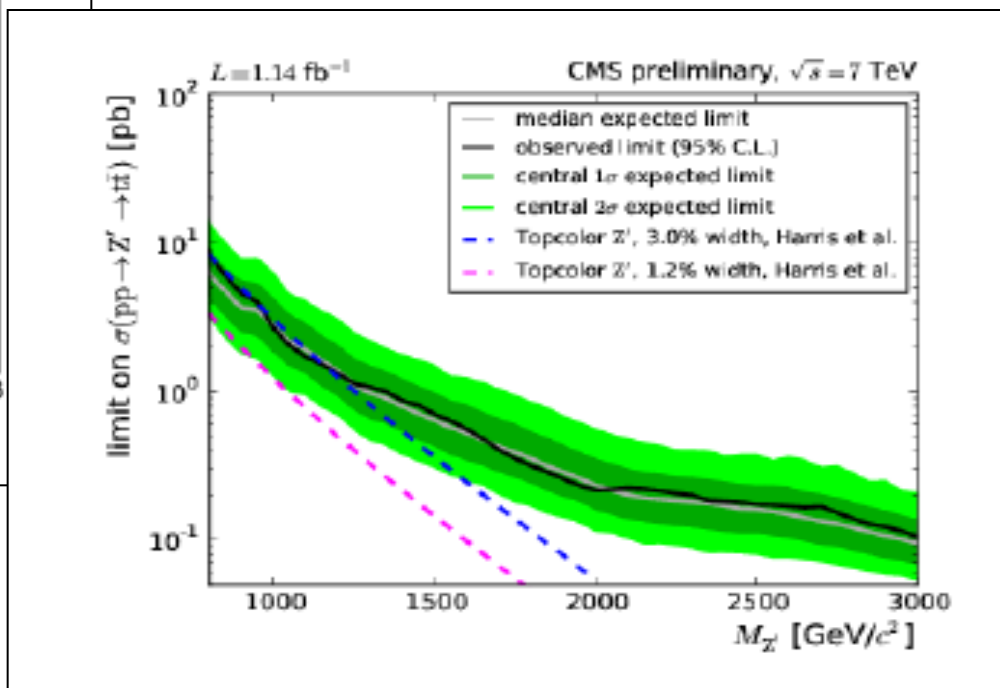
ttbar

All hadronic: KK gluon excluded 1.0-1.5 TeV, subpicobarn limits to Z' masses above 1.1 TeV



CMS PAS EXO-11-006

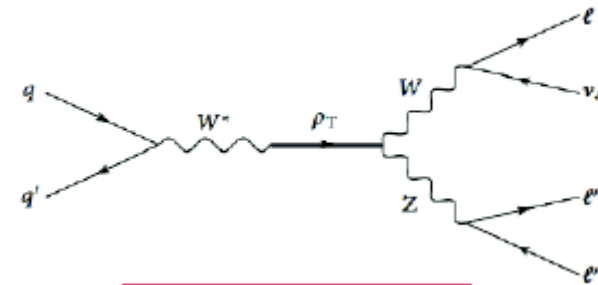
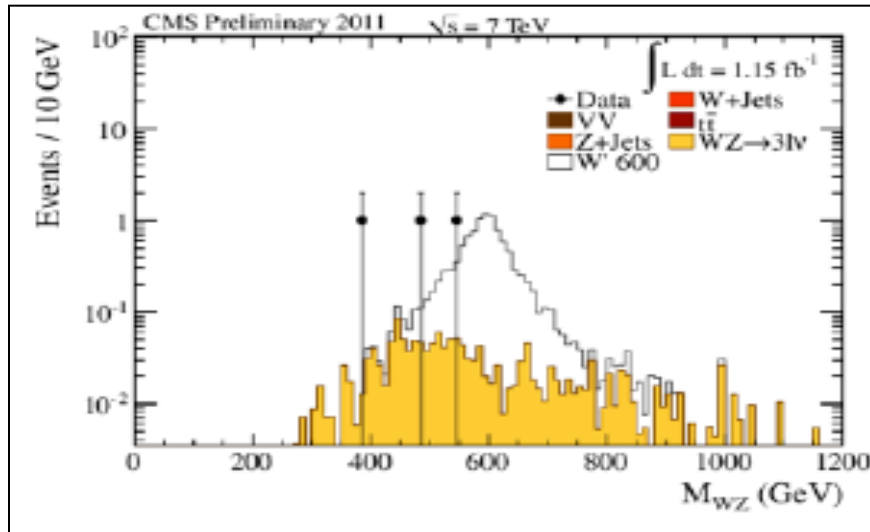
CMS PAS EXO-11-055



Semileptonic: Z' topcolor excluded in mass regions 850-935 GeV, 960-1060 GeV, sub-pb limits set on $\sigma(pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t})$ for masses above 1.35 TeV

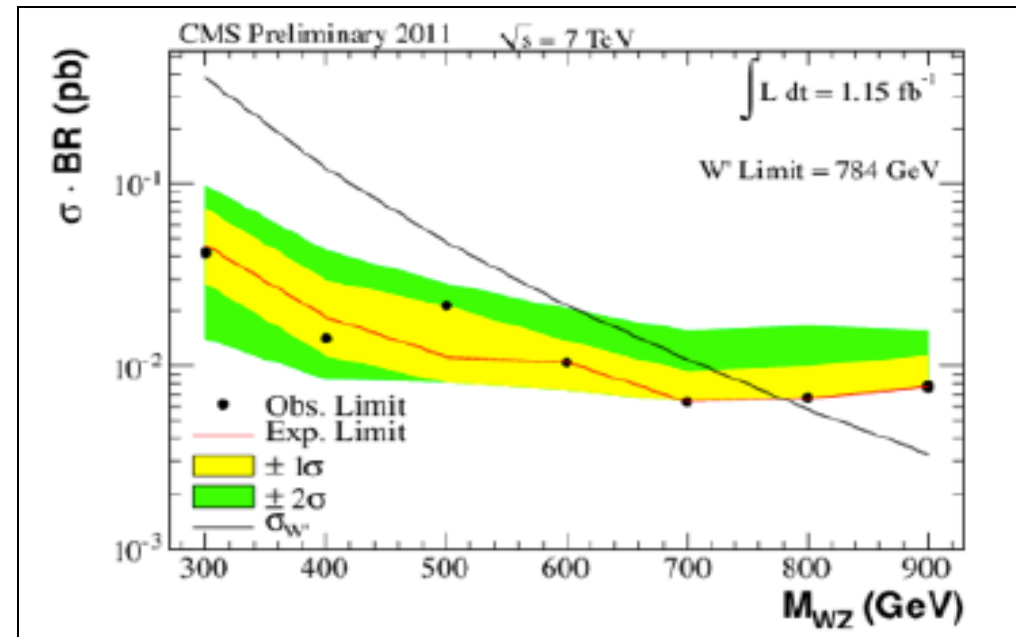
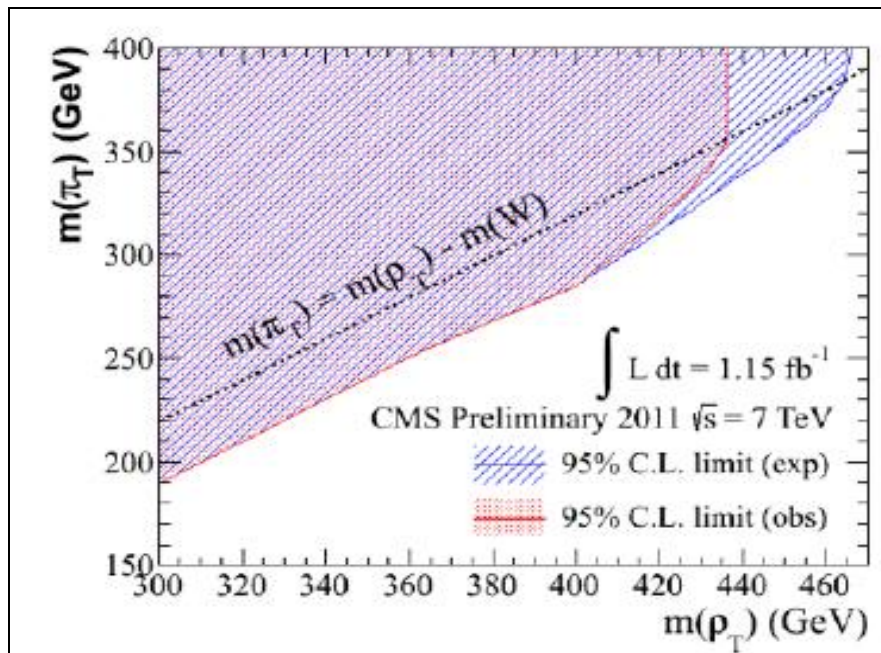
WZ резонансы

CMS PAS EXO-11-041



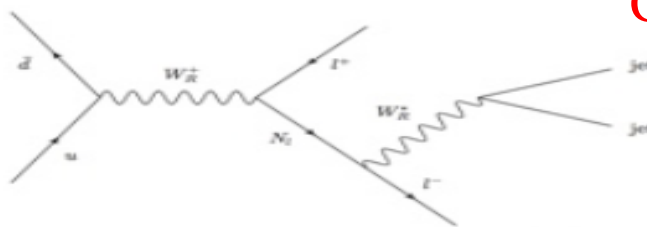
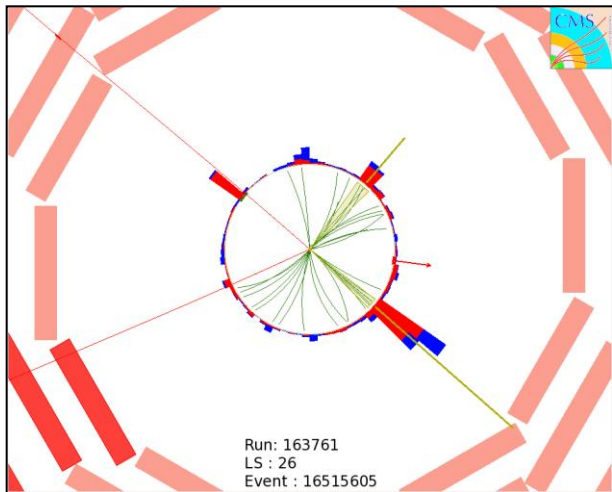
Sequential SM: $M'_W > 784 \text{ GeV}$

Technicolor: $M_\rho > 384 \text{ GeV}$

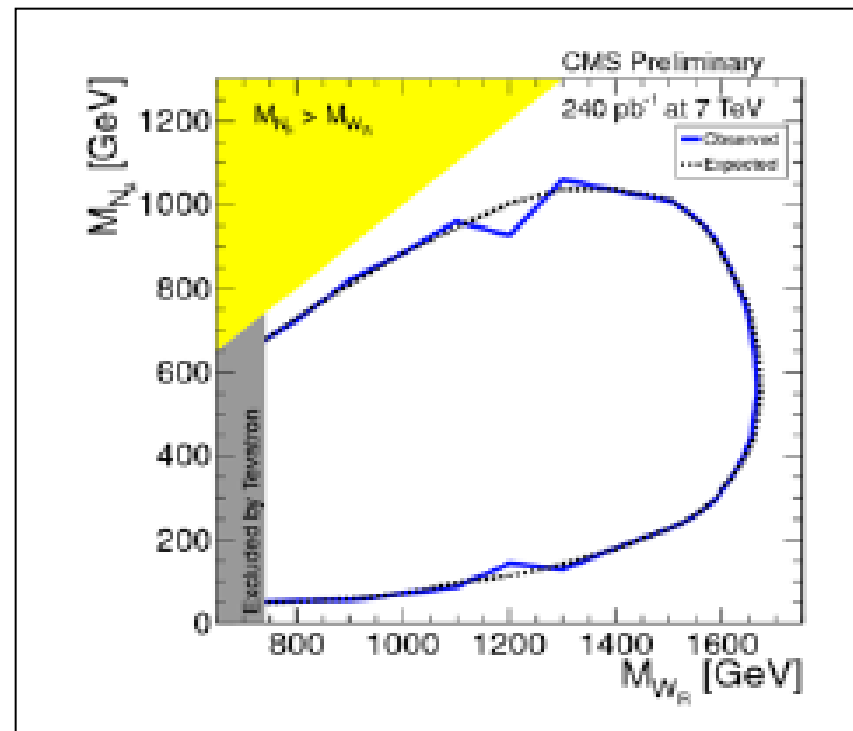
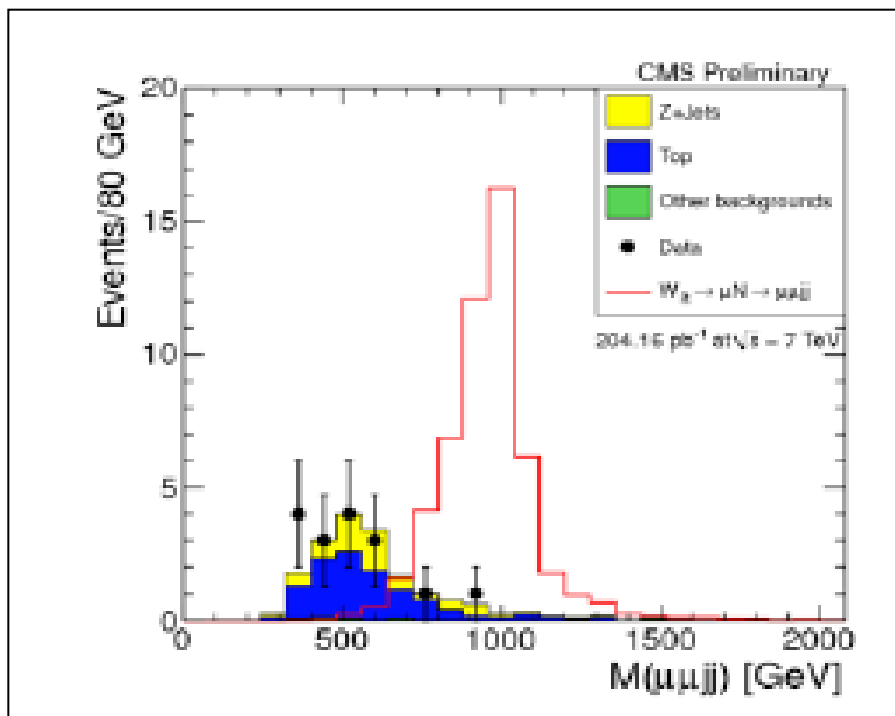


(Lepton-Lepton) + (Jet-Jet) Resonance

CMS PAS EXO-11-002



WR and heavy neutrino from LR models





Нерезонансные сигналы

- ❑ ADD-graviton contribution in the SM processes (Drell-Yan, diphotons productions)
- ❑ Compositeness

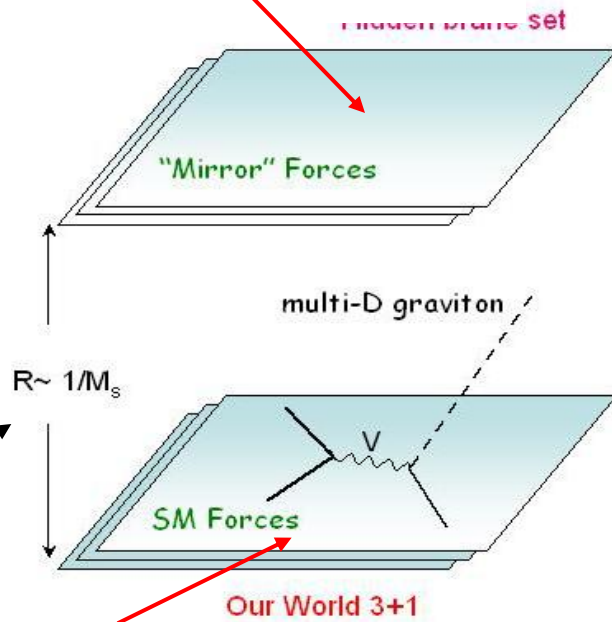
Signals: excess in di-particle spectrum

Модель ADD

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

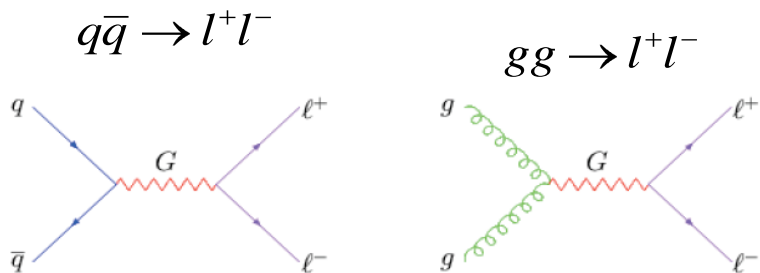
- ❑ The real World is multi-dimensional: n flat - Euclidian - extra spatial dimensions, the maximal total number of dimensions is $3(\text{our}) + 6(\text{extra}) = 9$
- ❑ The fundamental scale is not planckian: $M_D \sim \text{TeV}$
- ❑ We (all of SM forces) live on 3D brane (there is another "parallel" hidden World)
- ❑ Only gravitons are multi-dimensional

A "Parallel" World



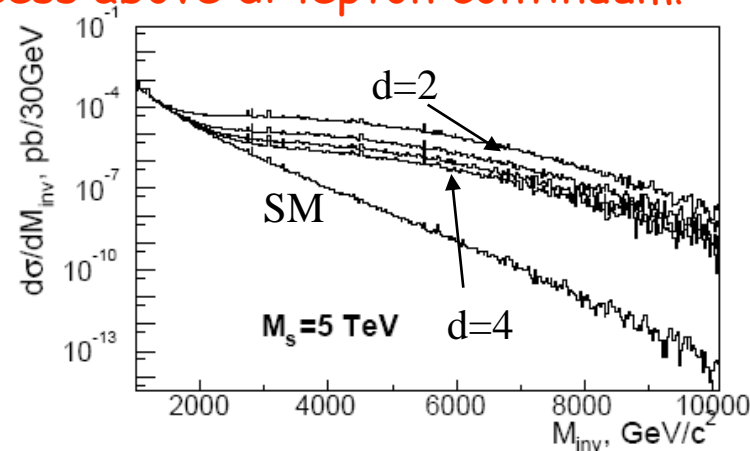
$$R \sim M^{-1} \left(\frac{M_{Pl}}{M} \right)^{2/n} \sim 10^{32/n} \times 10^{-17} \text{ sm}$$

Graviton contributions to SM processes:



Our World

Excess above di-lepton continuum!



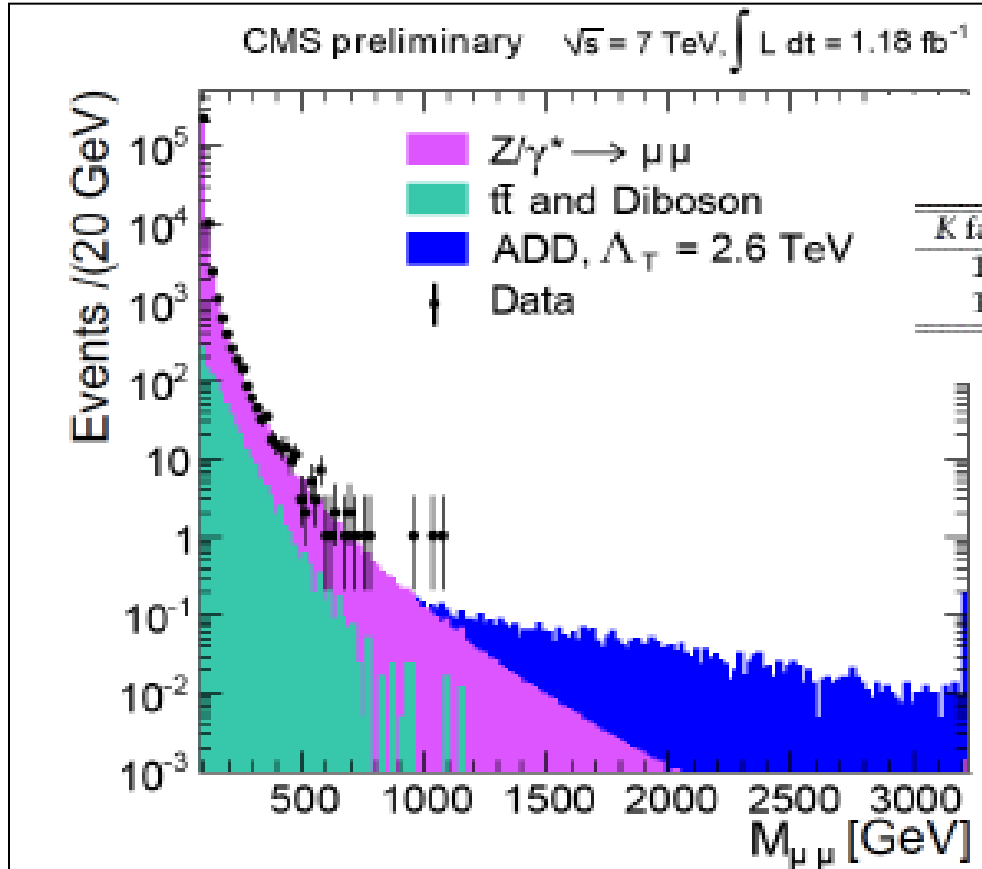
Пределы на ADD-гравитон

CMS PAS EXO-11-039

Dimuons

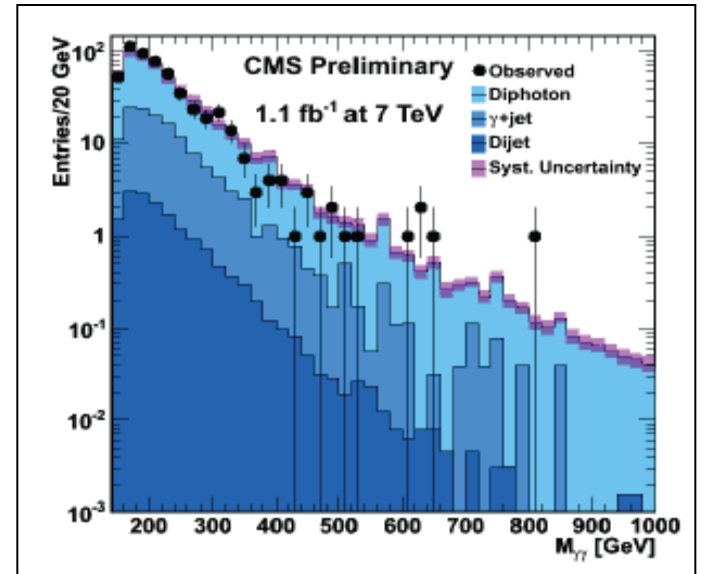
Diphotons

CMS PAS EXO-11-038



Effective Planck scale (TeV) in ADD

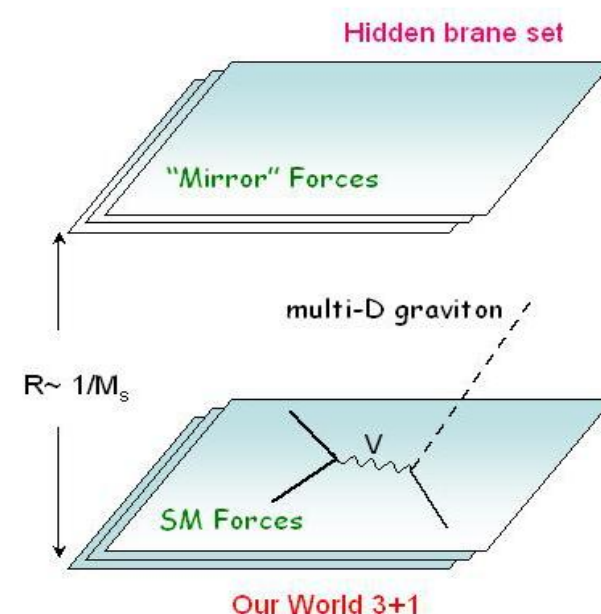
K factor	$n_{ED} = 2$	$n_{ED} = 3$	$n_{ED} = 4$	$n_{ED} = 5$	$n_{ED} = 6$	$n_{ED} = 7$
1.0	3.2	3.4	2.8	2.6	2.4	2.2
1.6	3.5	3.7	3.1	2.8	2.6	2.4



n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7
2.6	3.1	2.6	2.3	2.1	2.0

- ❑ Extra gauge bosons (W') predicted by extended gauge models (left-right symmetric models and GUT-inspired models)
- ❑ Kaluza-Klein graviton emission in large flat extra-dimensions (ADD model)
- ❑ Technicolor

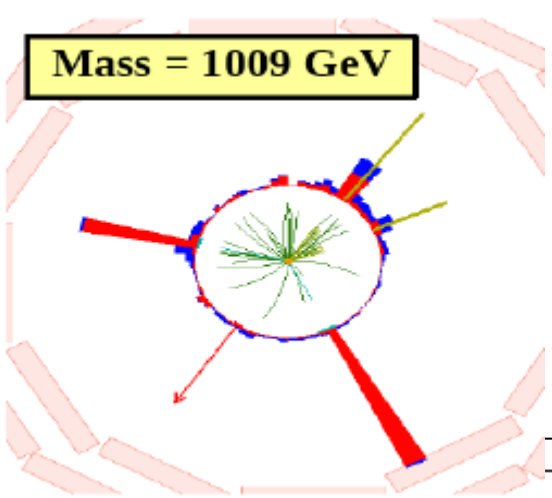
Signals: lepton + MET, photon +MET, jet +MET



Лептон + Missing ET

CMS PAS EXO-11-024

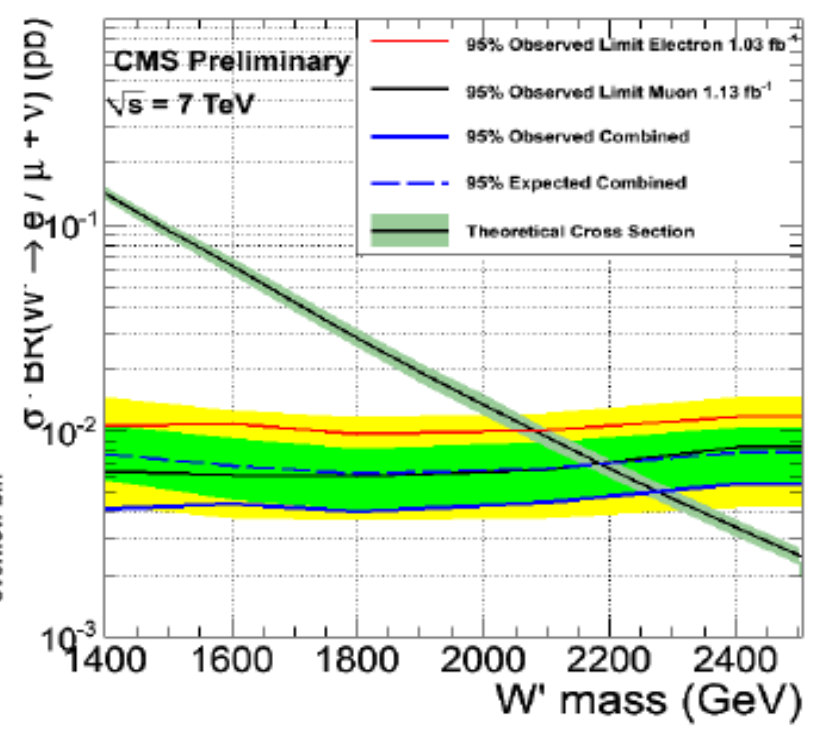
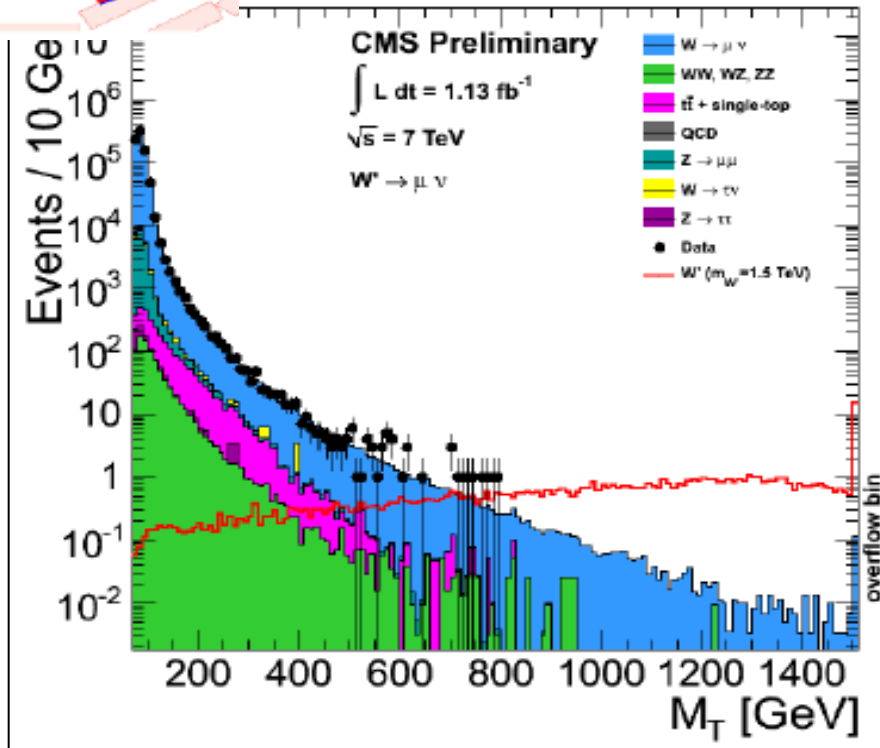
Mass = 1009 GeV



Signature is W-like at high mass
Background is SM W production!

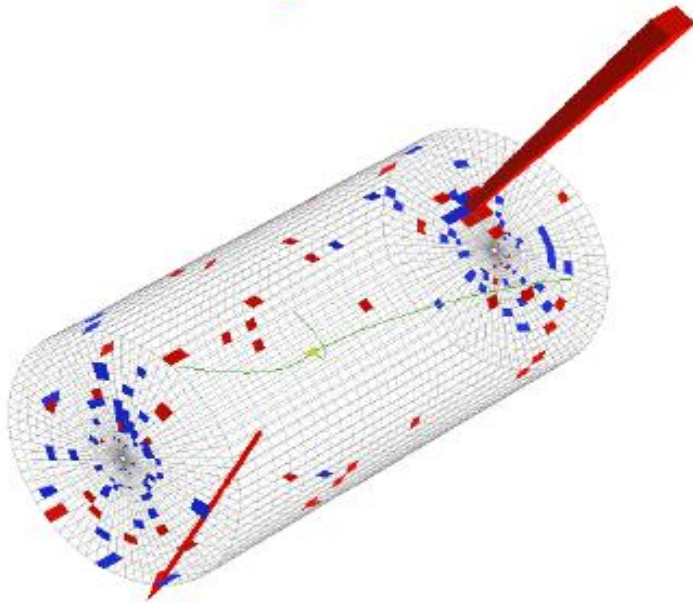
W' with SM-like coupling is excluded with $M_{W'} = 2.27$ TeV

$$M_T = \sqrt{2 \cdot p_T^\ell \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot (1 - \cos \Delta\phi_{\ell, \nu})}$$

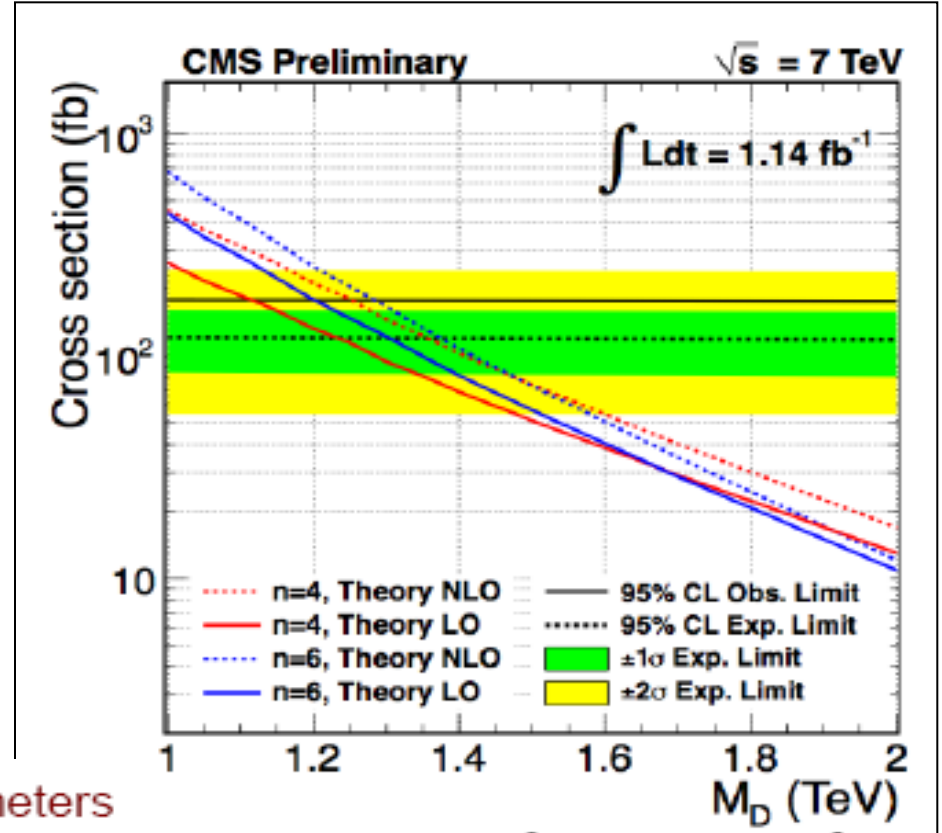


Фотон + Missing ET

CMS PAS EXO-11-058



CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Sun Apr 24 22:57:52 2011 CDT
 Run/Event: 163374 / 314736261
 Lumi section: 604



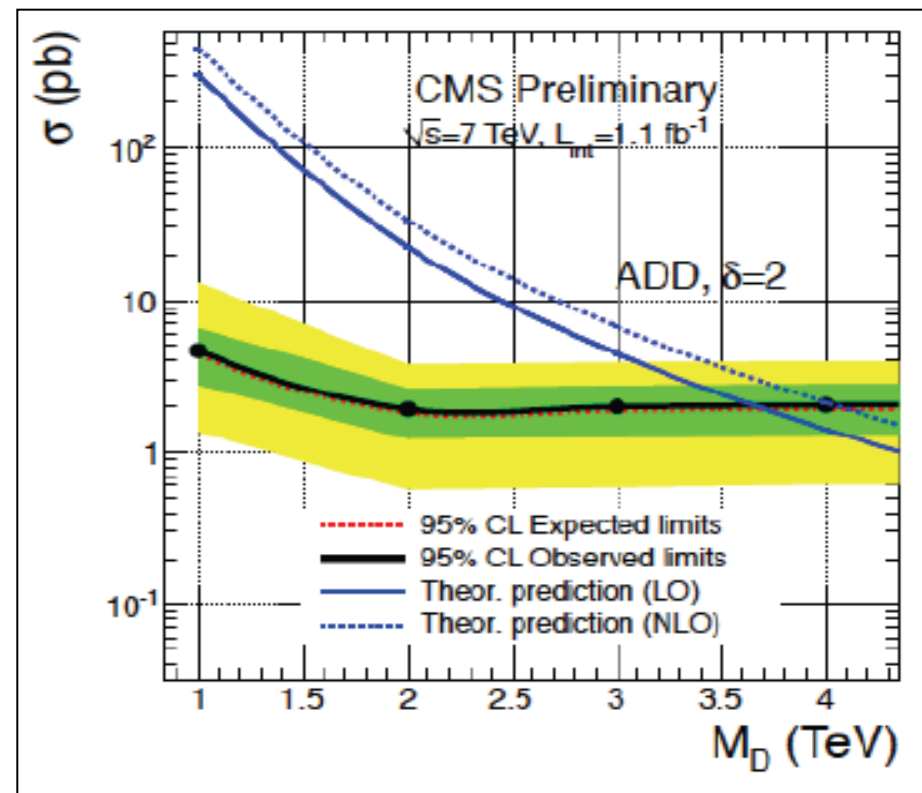
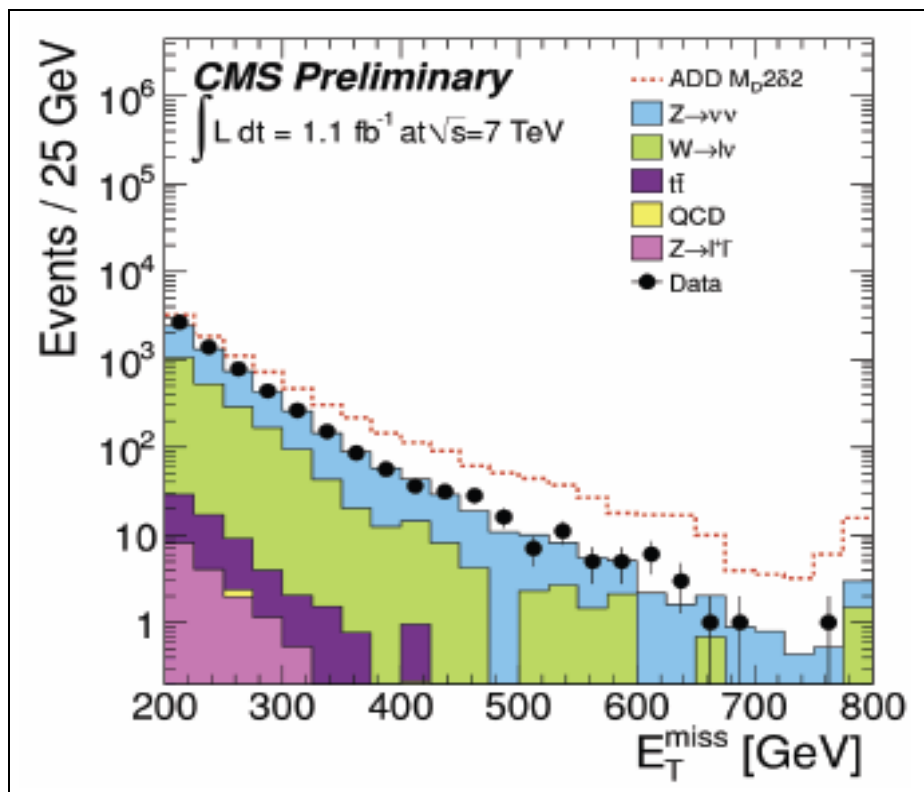
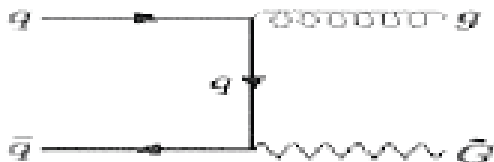
Limits on ADD models for several parameters

M_D (TeV) [no k-factor]

n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
1.30	1.07	1.12	1.16	1.21

Струя + Missing ET

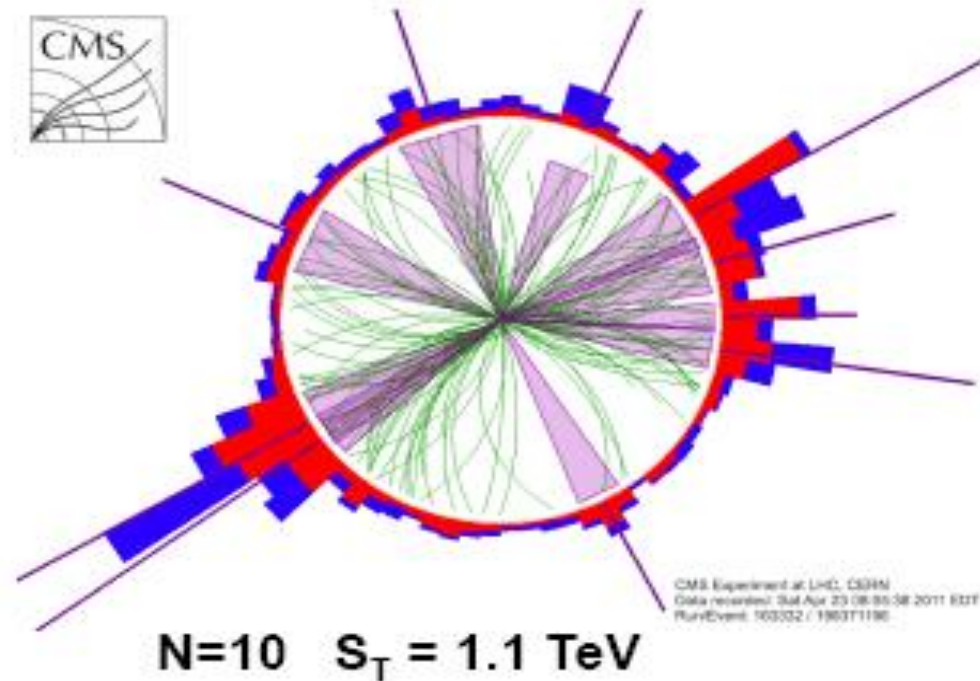
CMS PAS EXO-11-059

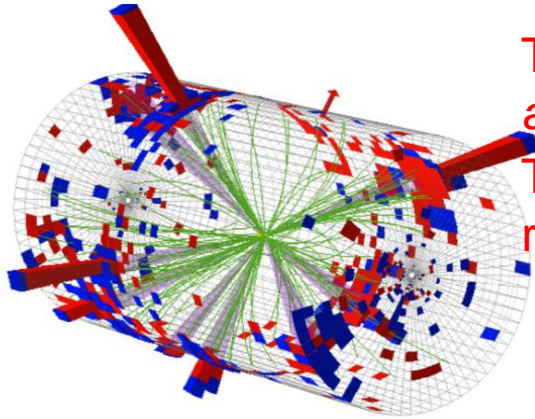


ADD K factor	M_D [TeV/ c^2]				
	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 4$	$\delta = 5$	$\delta = 6$
LO: 1.0	3.67	2.96	2.66	2.41	2.25
NLO: 1.5	4.03	3.21			
1.4			2.80	2.55	2.36



Микроскопические черные дыры



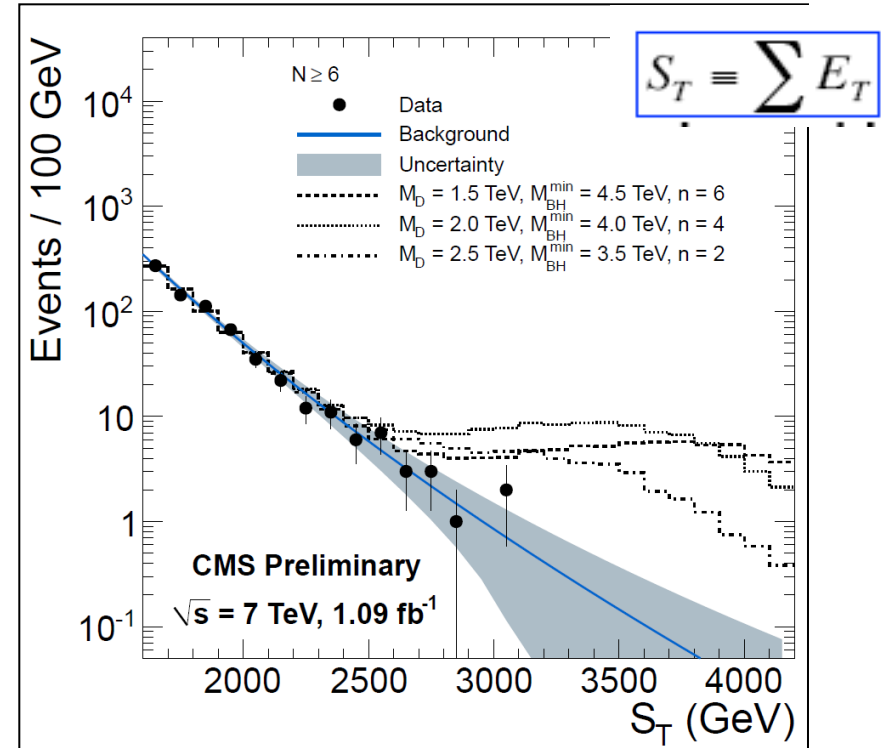
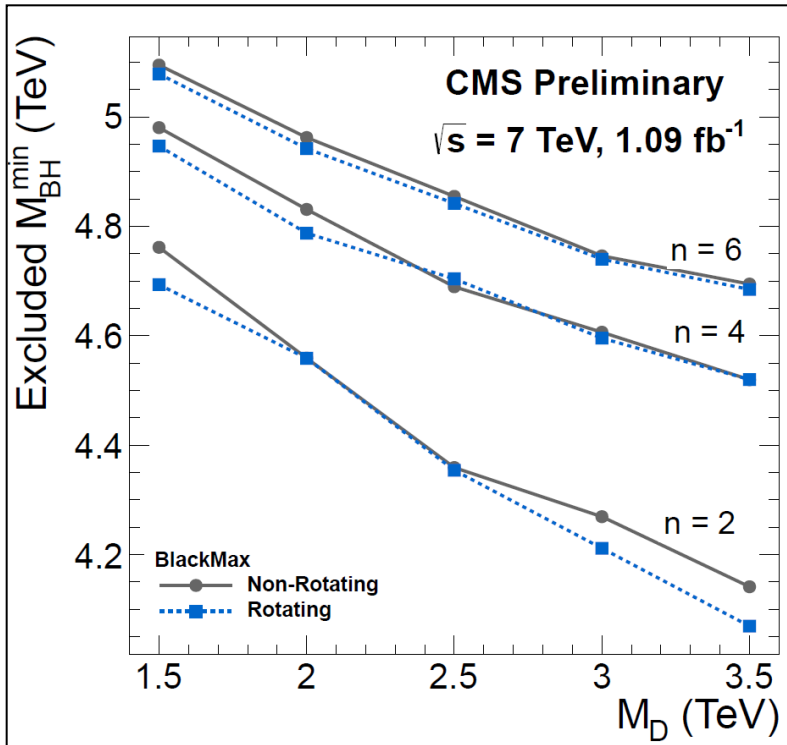


CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Mon May 23 21:46:26 2011 EDT
 Run/Event: 165967 / 347496624
 Lumi section: 280
 Orbit/Crossing: 73256853 / 3161

Black Holes

The CMS analysis - 2010, 35 pb⁻¹:
arXiv:1012.3375v1, Phys. Lett. B V697 (2011), p. 434

The CMS analysis - 2011, 1.09 fb⁻¹:
 recent CMS analysis - EXO-11-071



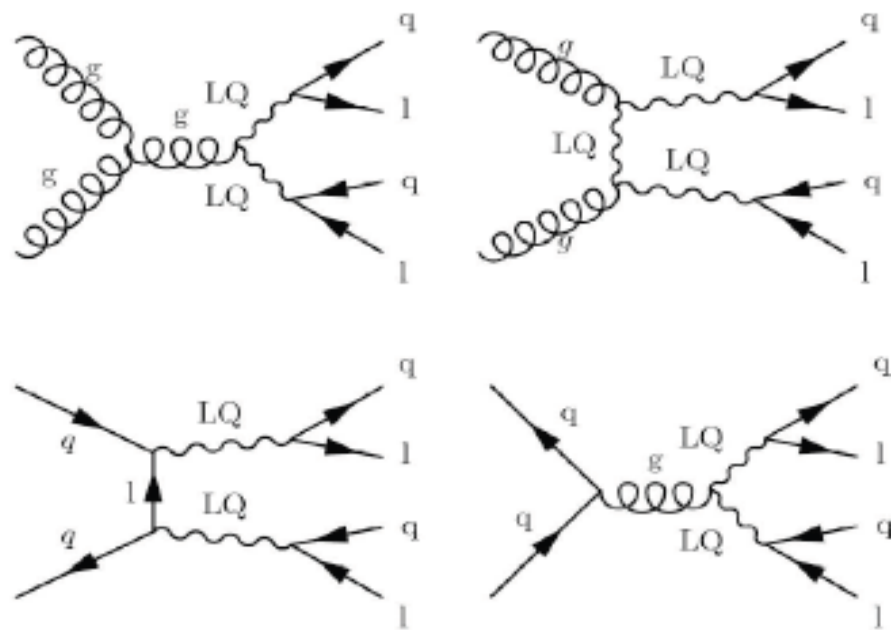
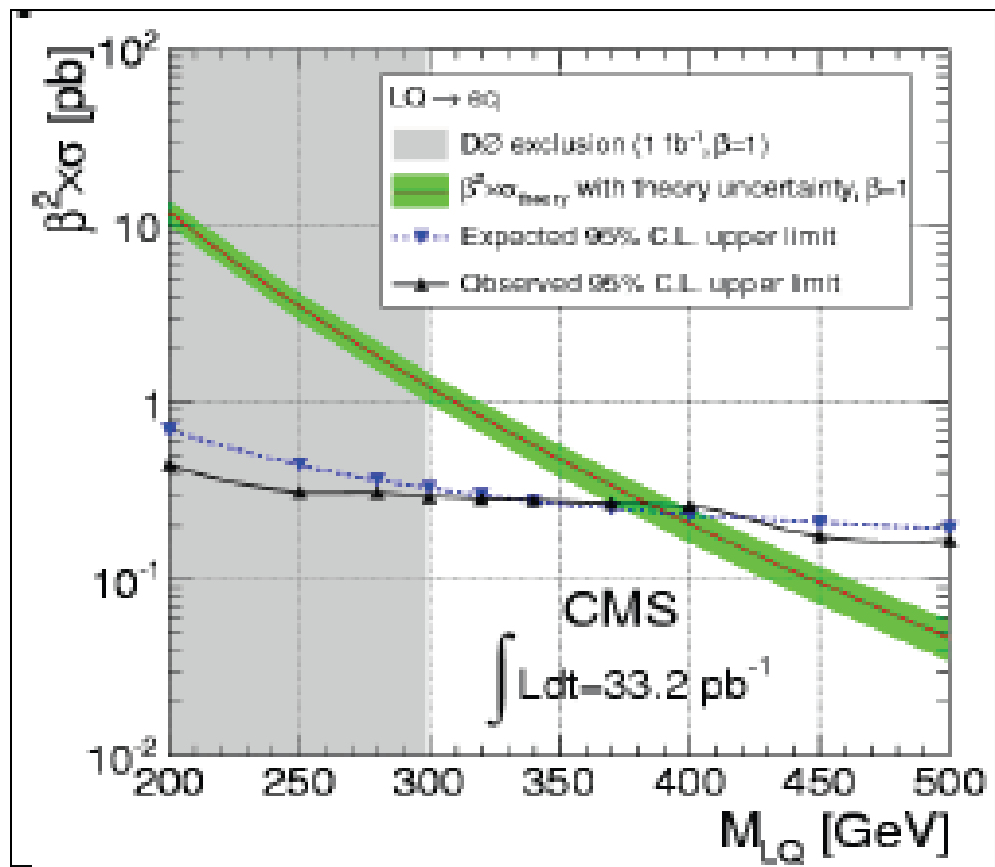
CMS set limits on the
 minimum BH mass of 4.4-5.1 TeV



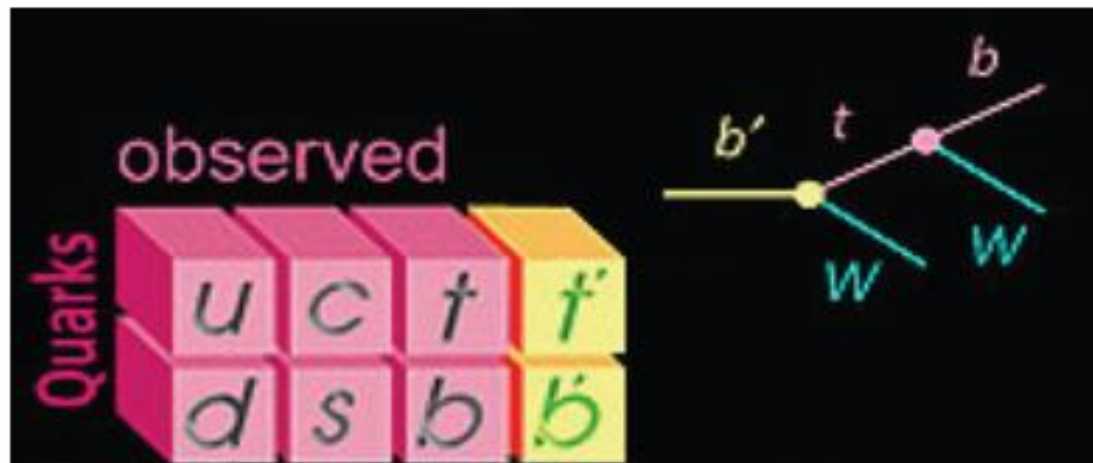
Лептокварки

Leptoquarks

CERN-PH-EP-2010-052



4^{oe} поколение

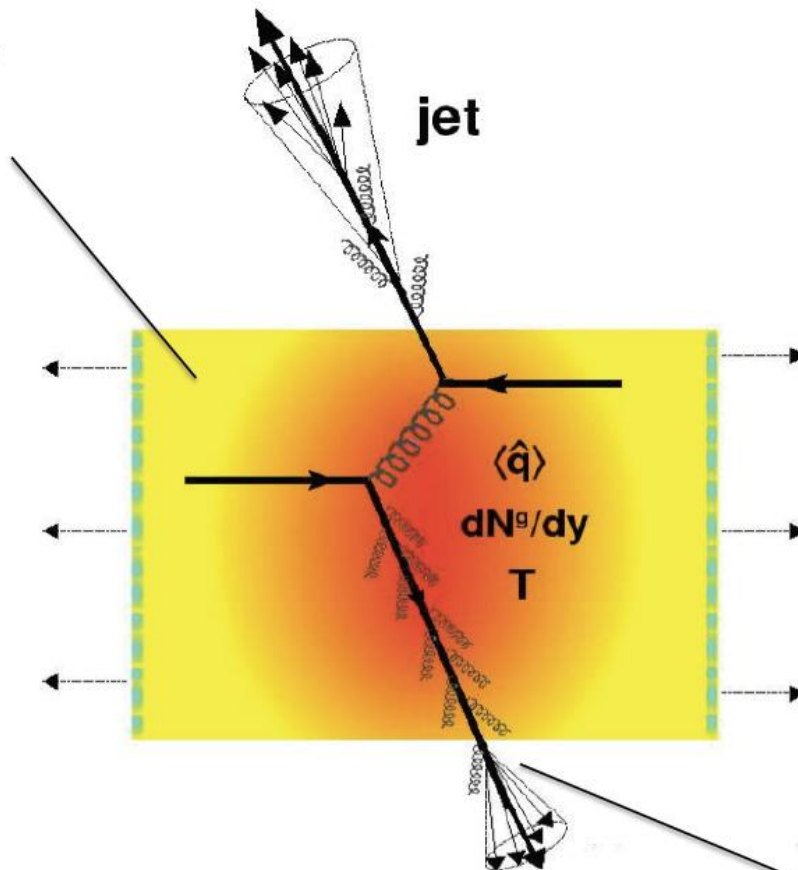


4th Generation

Decay	channel	Excluded mass [Gev]	Luminosity [fb ⁻¹]	Notes	Reference
$b' \rightarrow t+W$	Lepton+jet	495	1.1		EXO-11-036
$t' \rightarrow b+W$	dilepton	422	1.1		EXO-11-050
$t' \rightarrow b+W$	Lepton+jet	450	1.1		EXO-11-051
$t' \rightarrow t+Z$	Lepton+jet	475	1.1		EXO-11-005

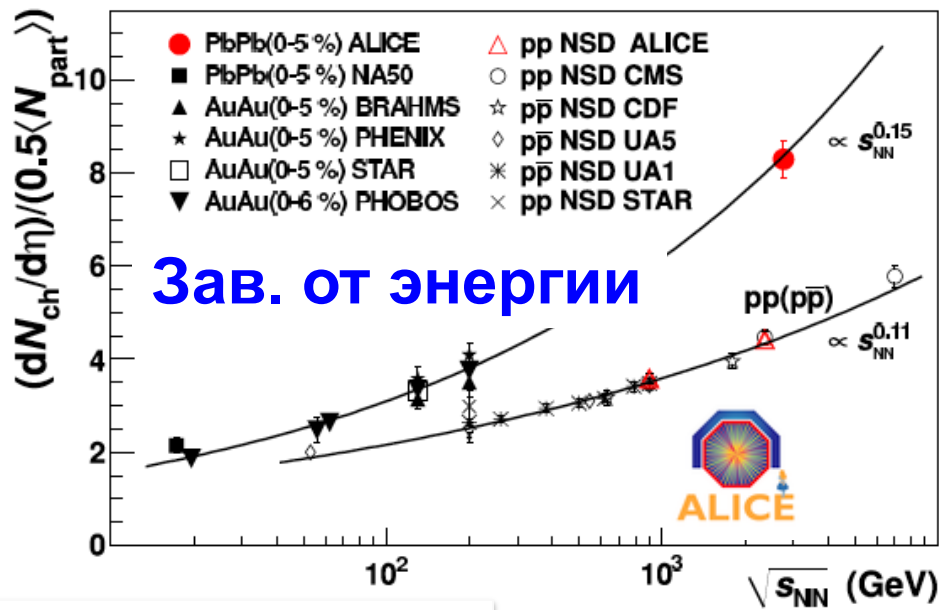
Физика тяжелых ионов

Hot and dense QCD medium created in heavy ion collisions



Scattered parton probes the QCD medium

Множественность в столкновениях ИИ.



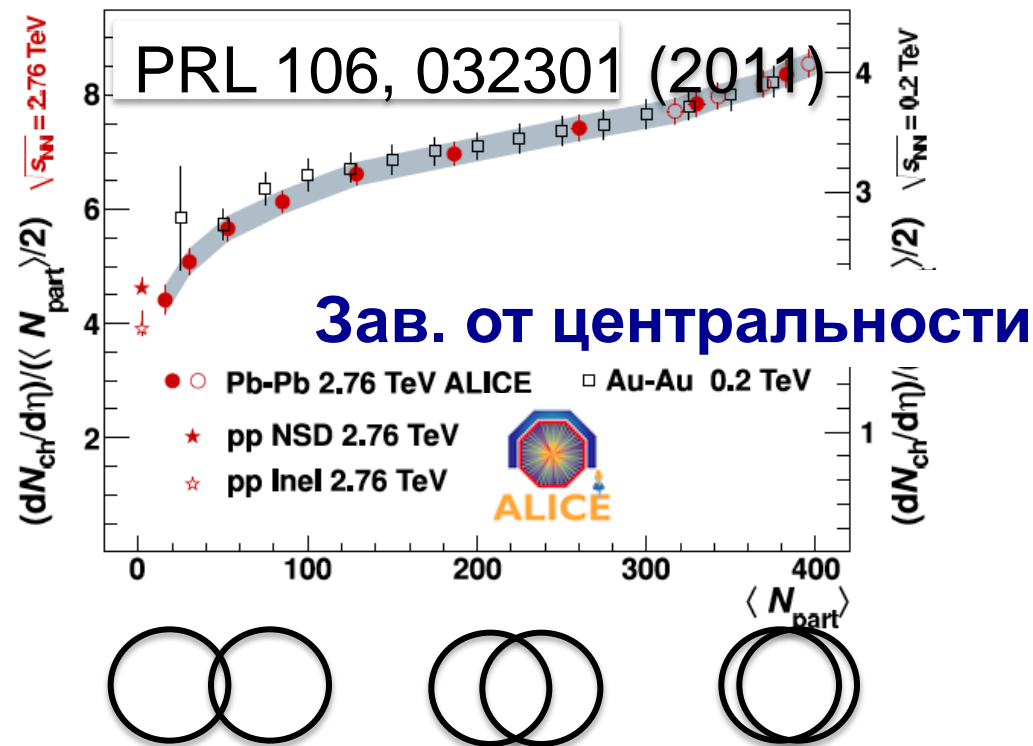
PRL 105, 252301 (2010)

Energy dependence

$$p-p \sim s_{NN}^{0.11}$$

$$A-A \sim s_{NN}^{0.15} \text{ (most central)}$$

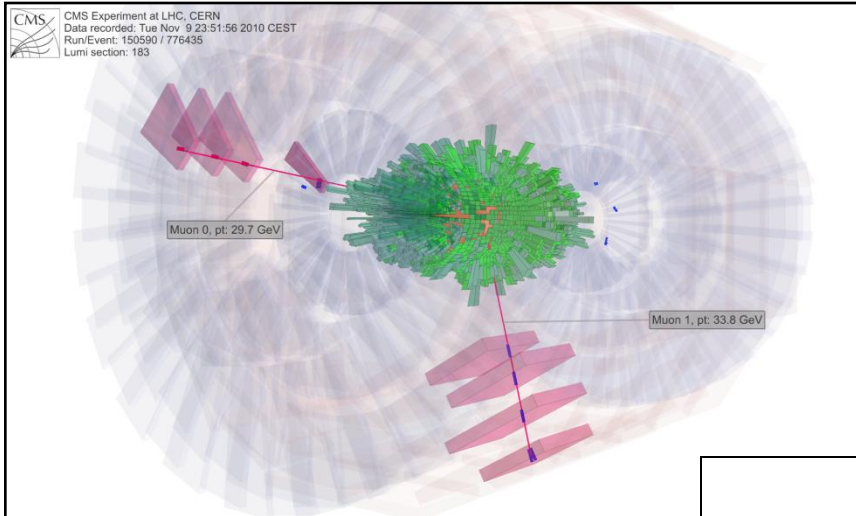
Multiplicity dependence on centrality: similar trend as at RHIC



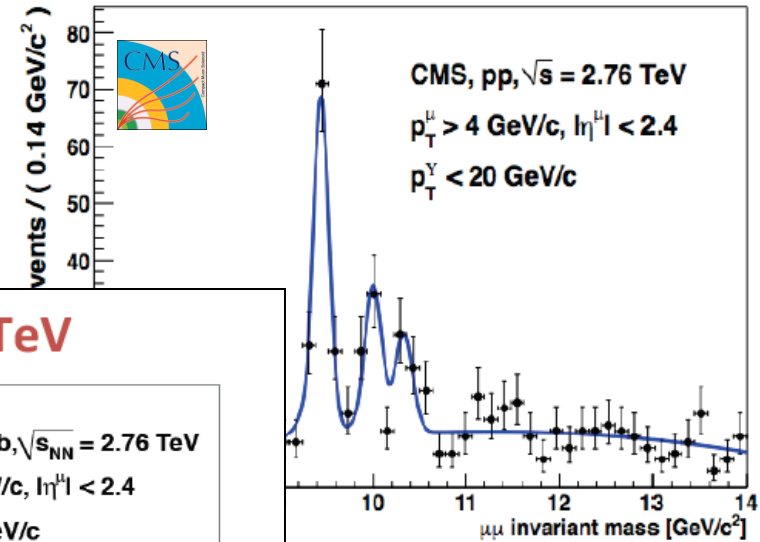
Регистрация резонансов в столкновениях НН .

Подавление возбужденных состояний Υ

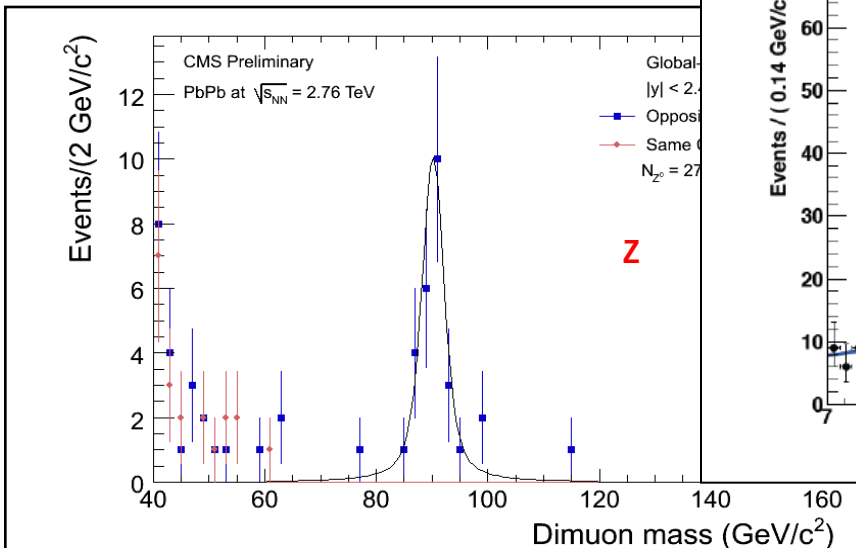
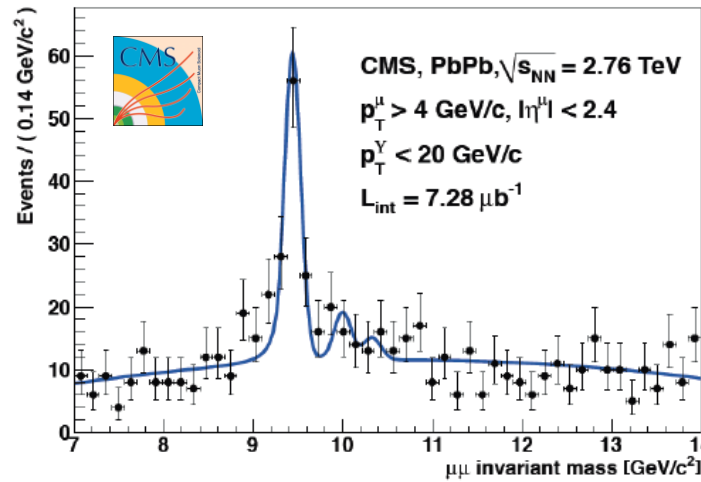
arXiv:1105.4894 ; CMS-HIN-11-007 ; CERN-PH-EP-2011-074



pp @ 2.76 TeV

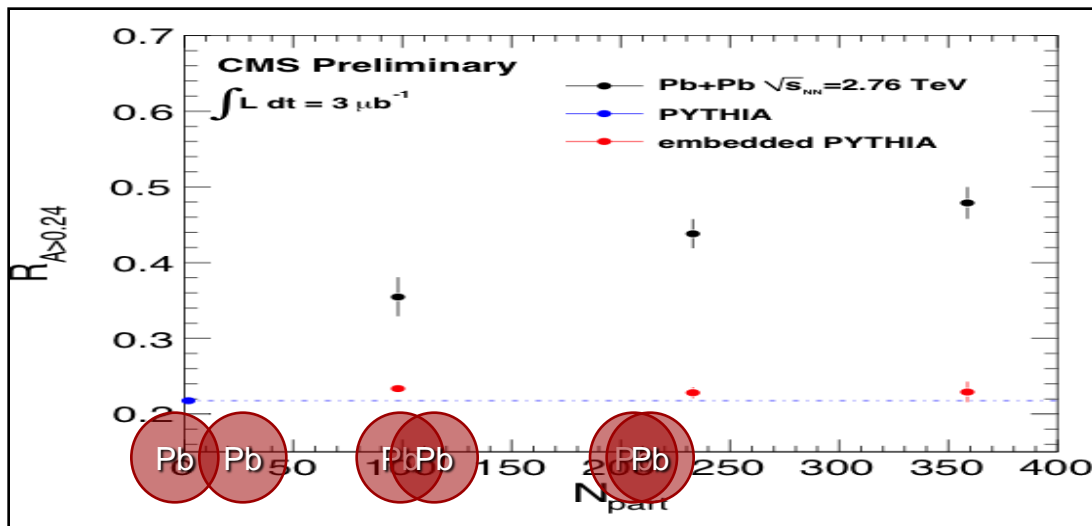
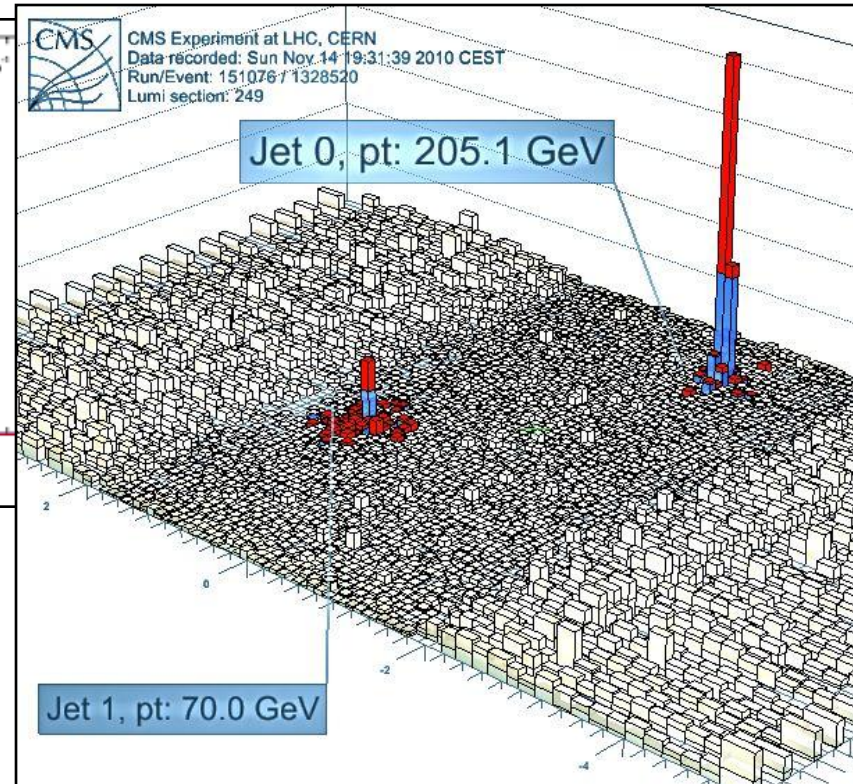
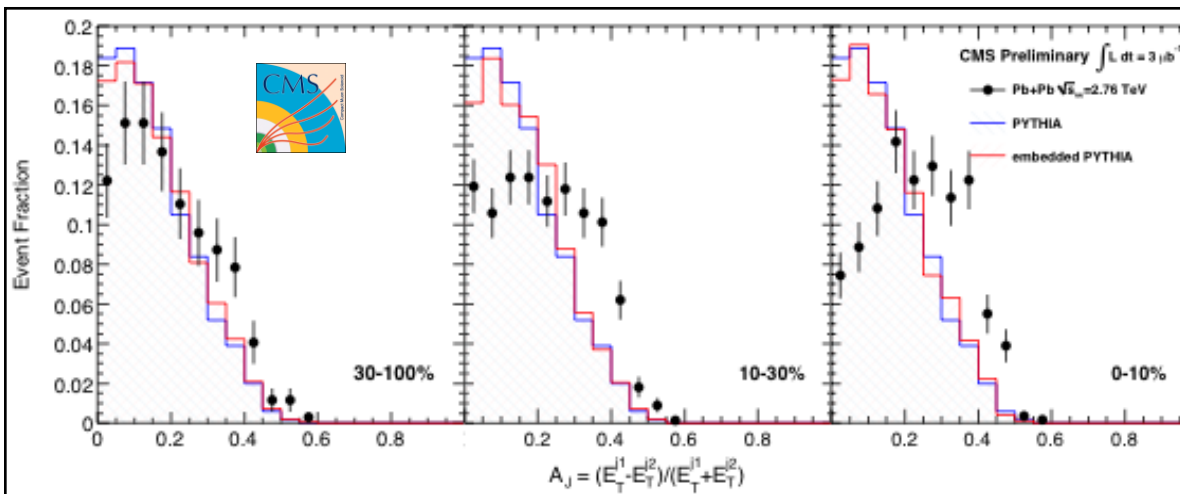


PbPb @ 2.76 TeV



$$\frac{Y(2S + 3S)/Y(1S)|_{\text{PbPb}}}{Y(2S + 3S)/Y(1S)|_{\text{pp}}} = 0.31 \pm 0.17 \pm 0.03,$$

Наблюдение гашения струй в столкновениях $Pb-Pb$.

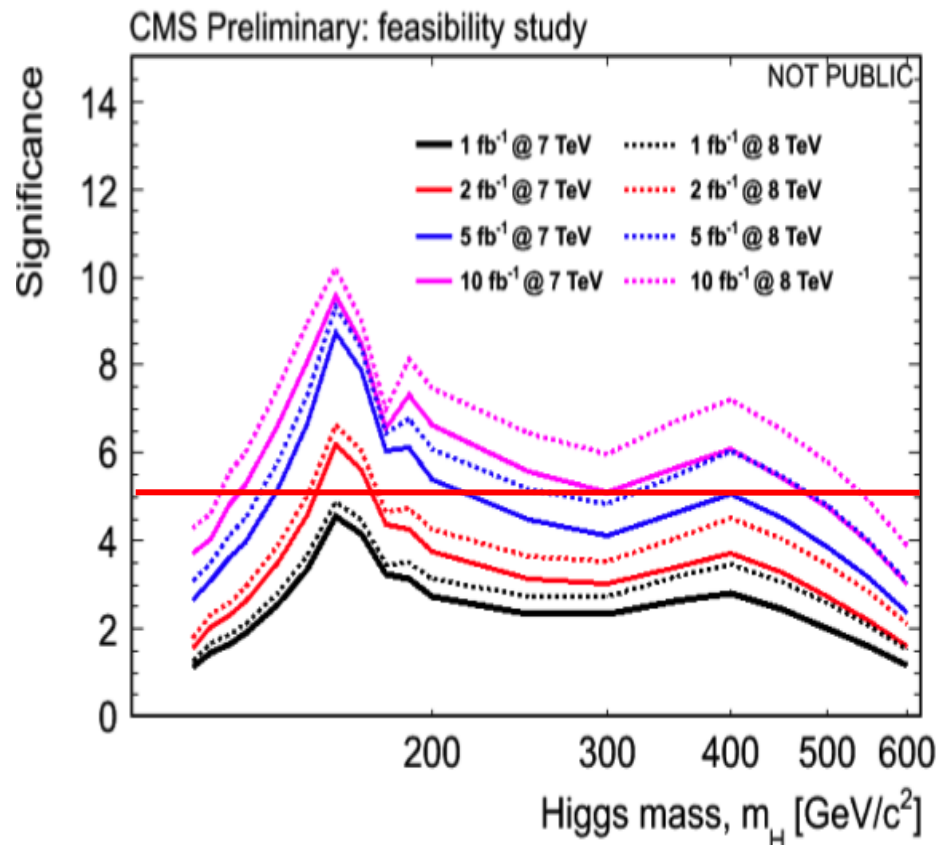


arXiv:1102.1957;
CMS-HIN-10-004;
CERN-PH-EP-2011-001.

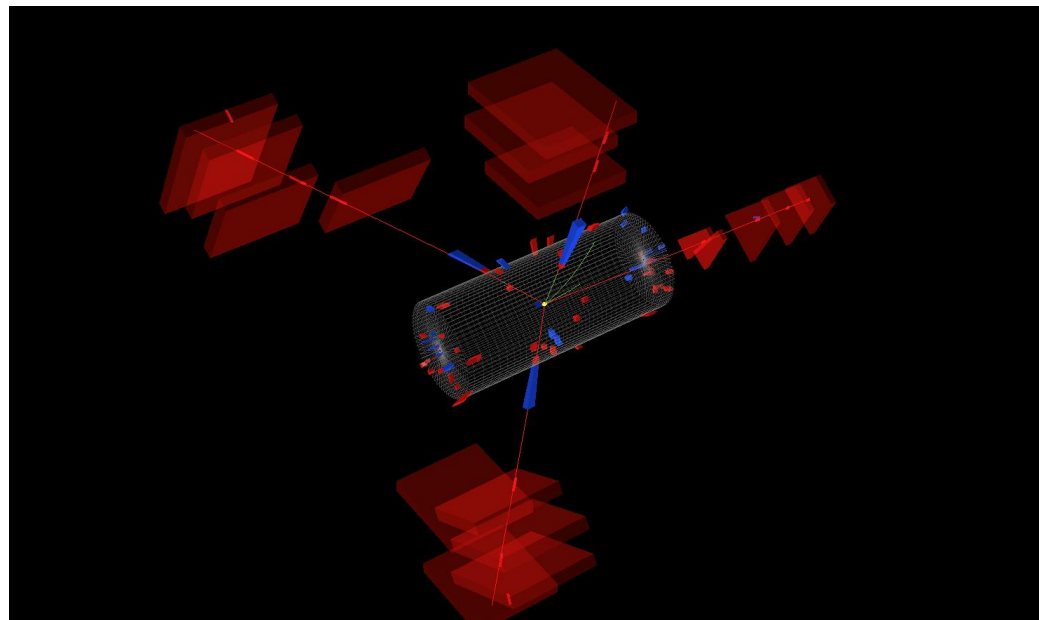
Гашение струй было зафиксировано экспериментами ATLAS и CMS

Перспективы поиска бозона Хиггса

The first $ZZ \rightarrow 4\mu$ event



with 10fb^{-1} at 8 TeV we can discover the Higgs over the mass range between ~ 115 and $\sim 600\text{GeV}$.

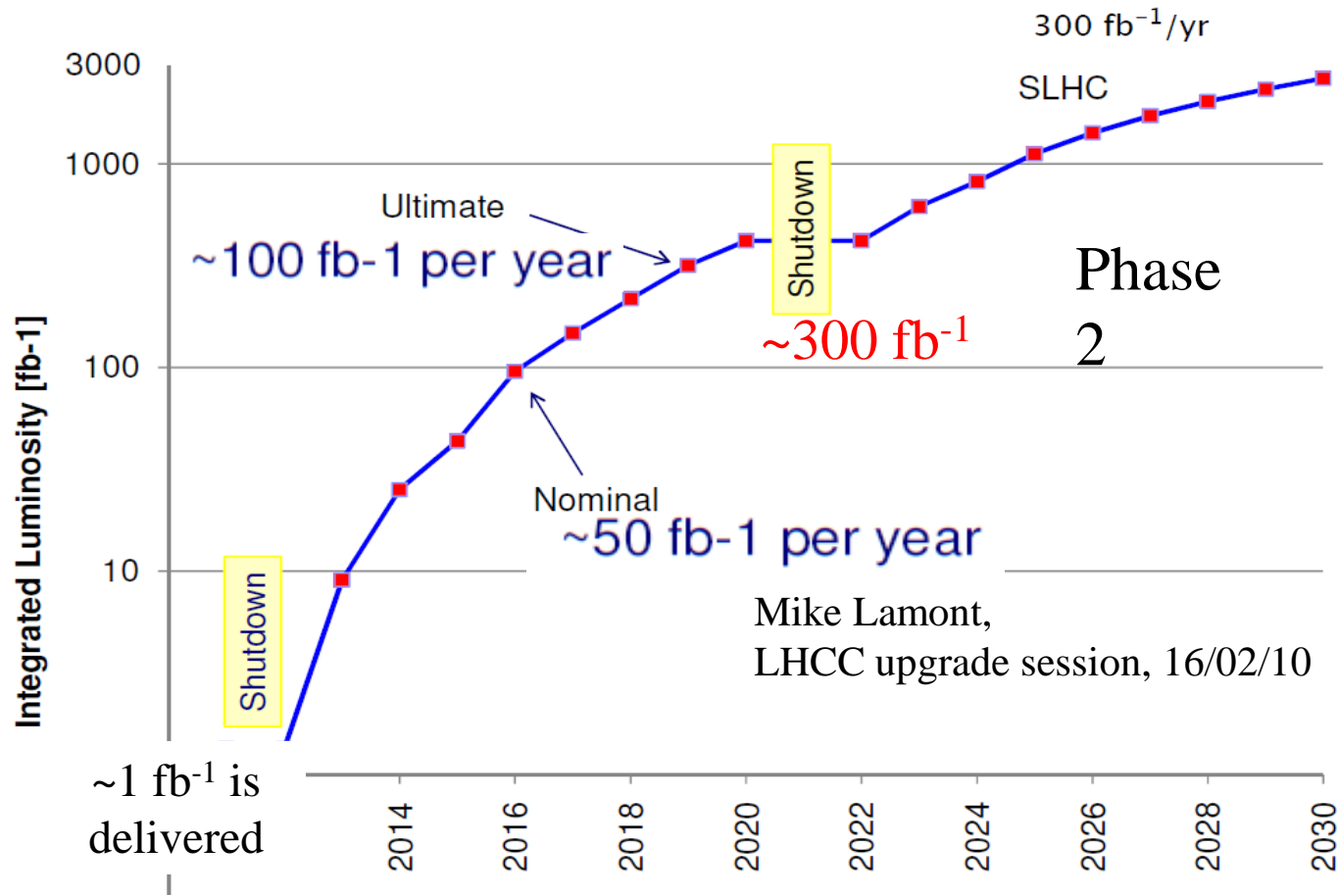


Invariant Masses

$\mu_0 + \mu_1$: 92.15 GeV (total(Z) p_T 26.5 GeV, ϕ -3.03),
 $\mu_2 + \mu_3$: 92.24 GeV (total(Z) p_T 29.4 GeV, ϕ +.06),
 $\mu_0 + \mu_2$: 70.12 GeV (total p_T 27 GeV),
 $\mu_3 + \mu_1$: 83.1 GeV (total p_T 26.1 GeV).

Invariant Mass of 4μ : 201 GeV

Сценарии развития ЛНС

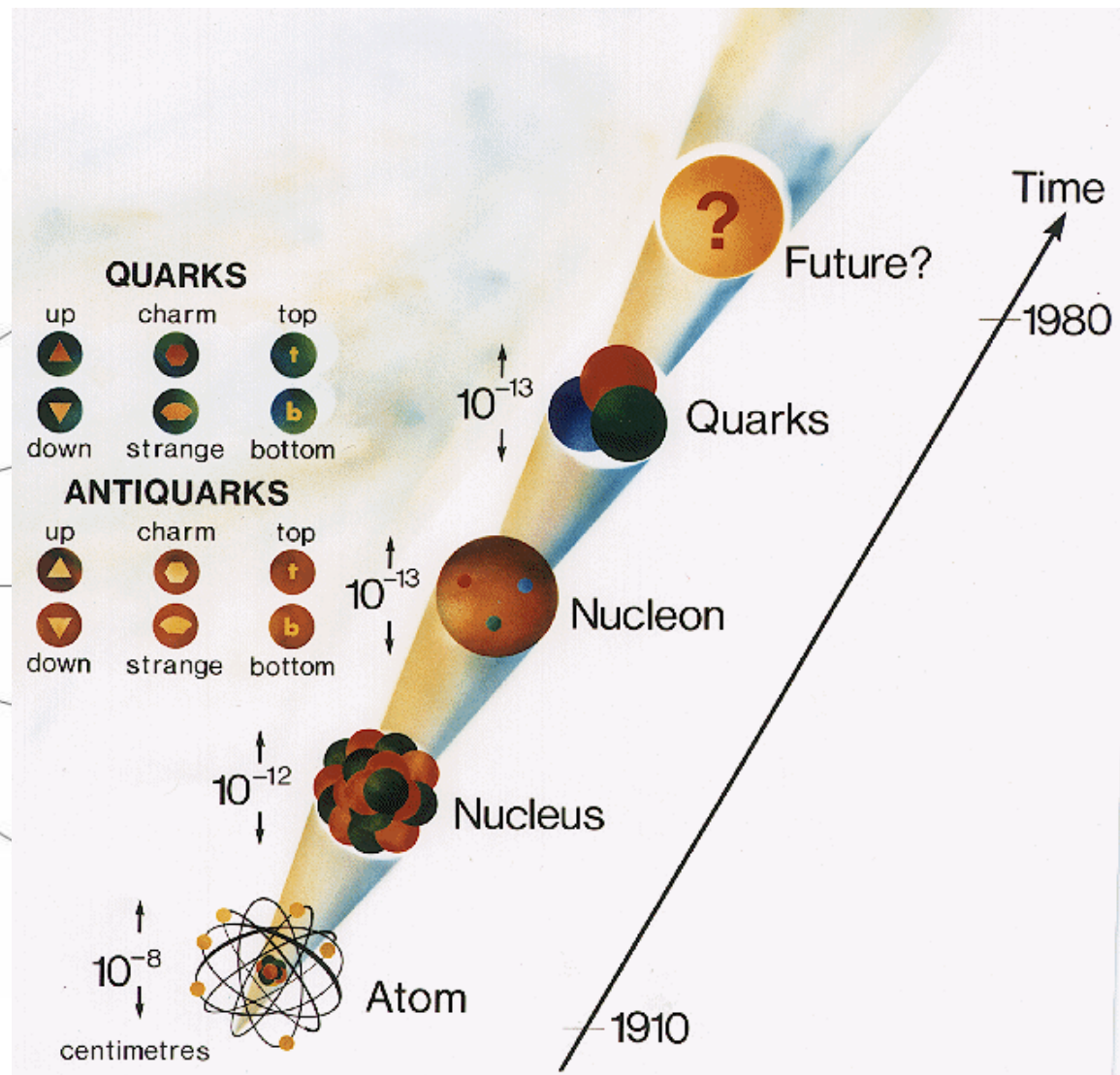
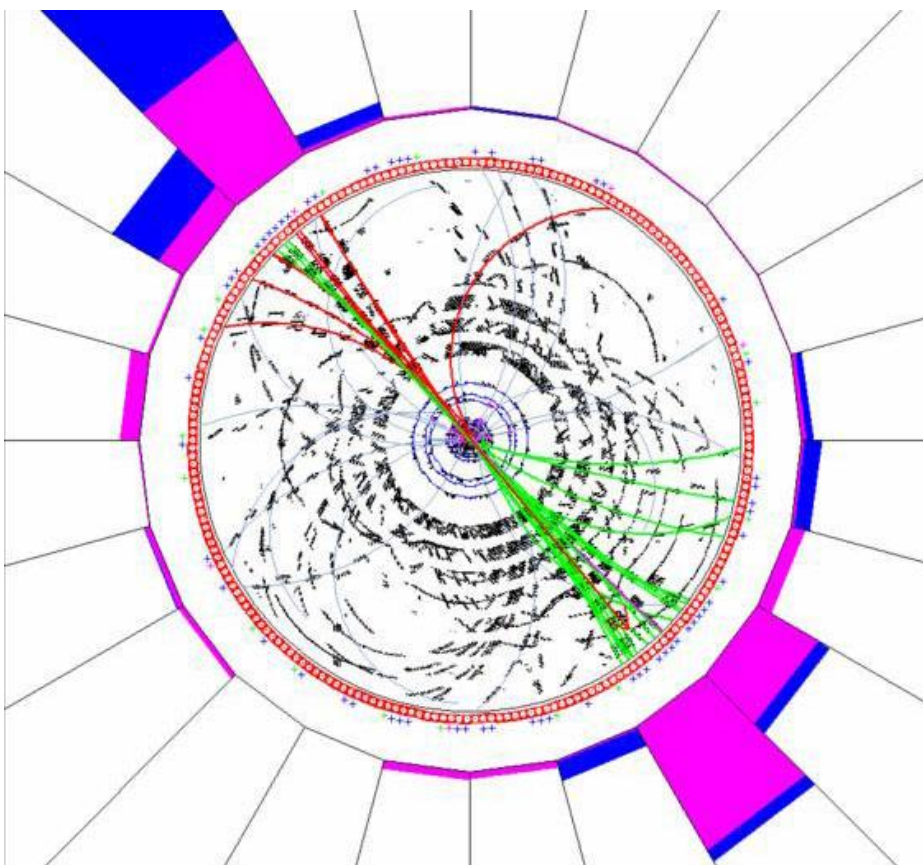


2020-2030 – High Lumi LHC

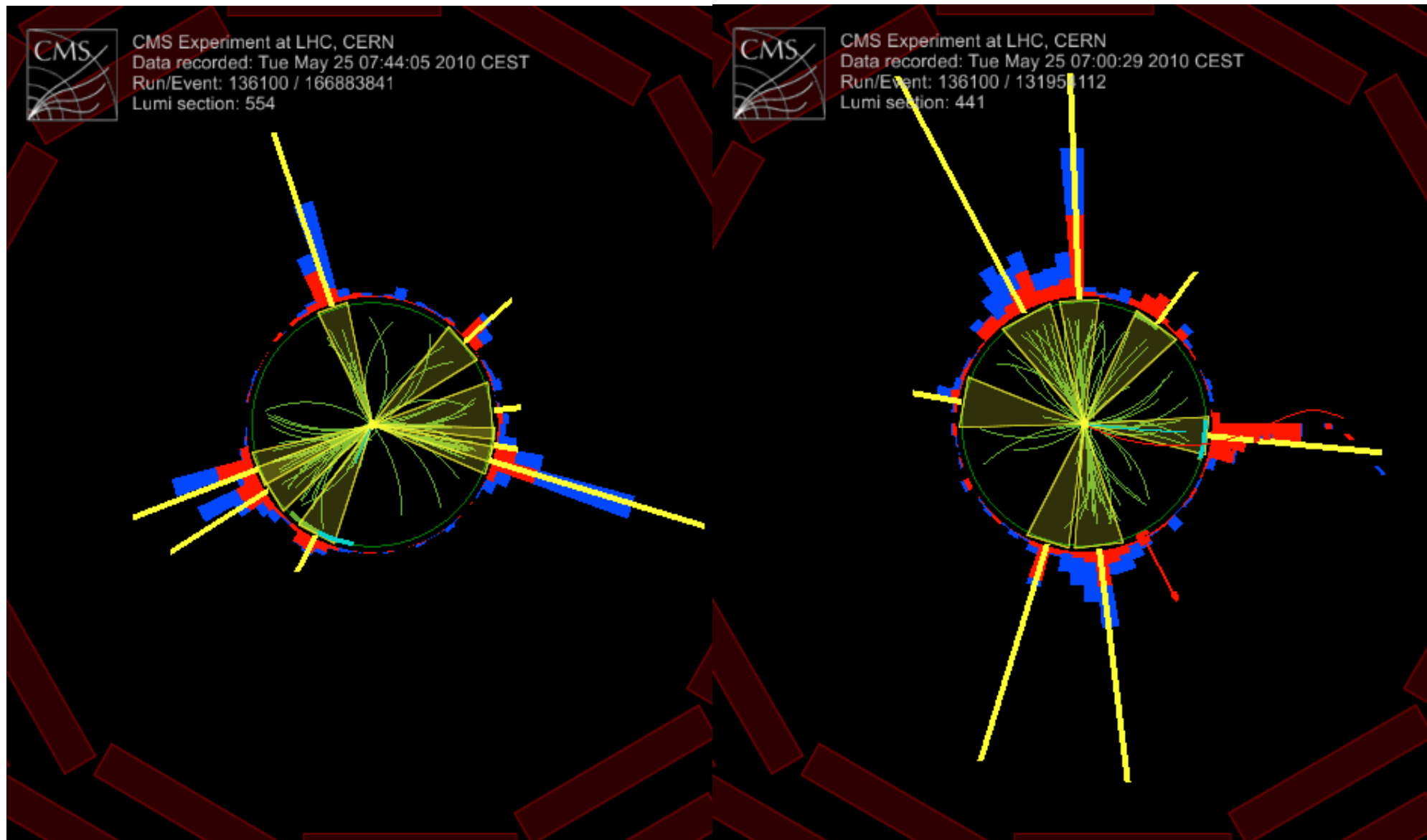
(High Luminosity (HL-LHC) Chamonix 2011)

- need to be able to integrate $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$ per year (1 fb^{-1} per day) \Rightarrow peak lumi of 10^{35} Hz/cm^2
- the goal is to achieve 3000/fb in phase 2

За 100 лет – история Вселенной

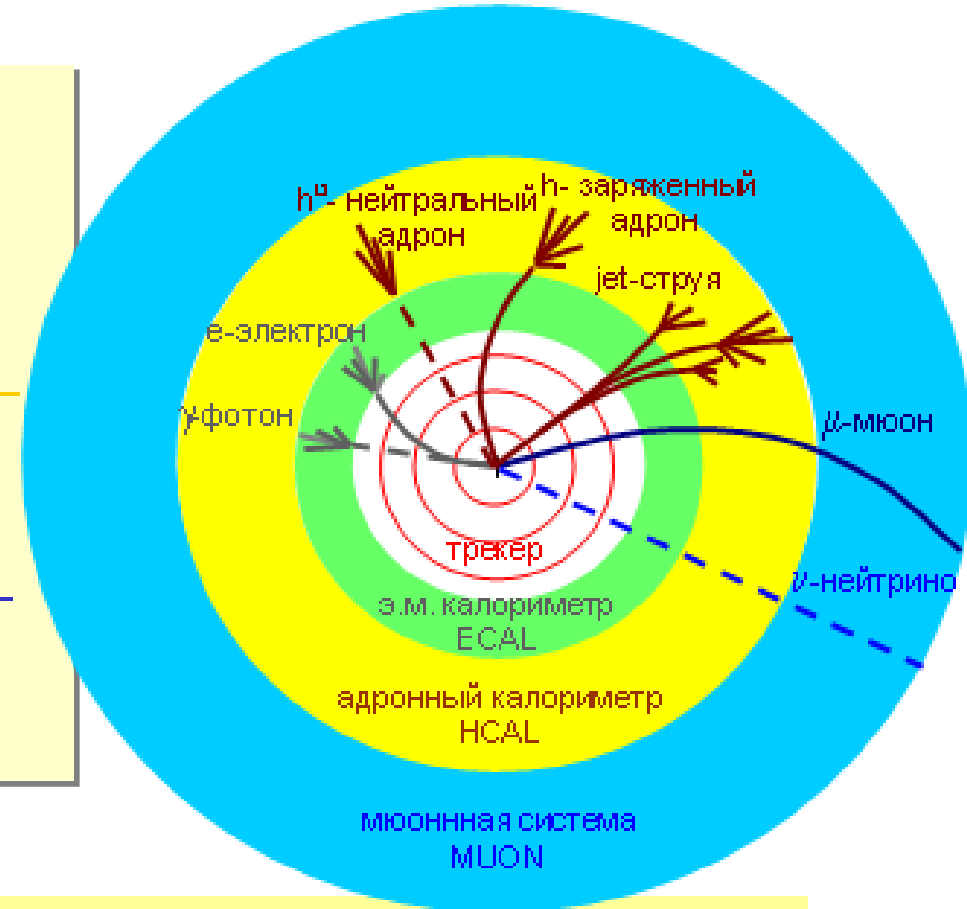


Первые события (пара струй)



Принцип “Матрешки” – 4 π структуры детектирующих слоев в магнитном поле

- **Трекер** – легкое вещество
- **ECAL** – активное вещество с максимально возможным зарядом Z – сцинтиллирующие кристаллы PWO
- **HCAL** – тяжелое вещество поглотителя – латунь, прослоенная активной средой – пластическим сцинтиллятором
- **Muon** – тяжелое вещество поглотителя – железо возвратного ярма магнита и координатные газовые камеры



- Ни один слой отдельно не может решить задачу идентификации и измерения параметров всех частиц
- Только в совокупности слоев возможно восстановление всей картины первичного взаимодействия

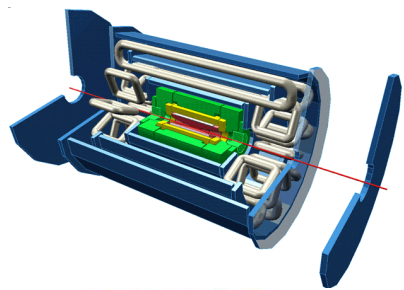
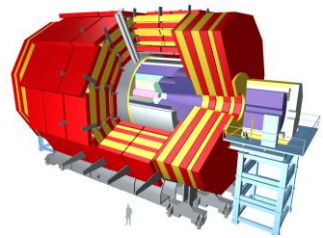
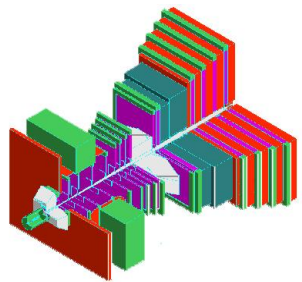
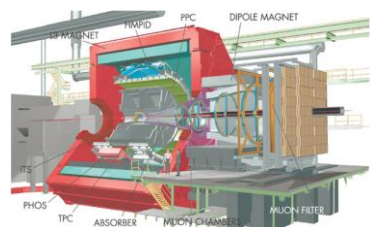
Регистрация фундаментальных частиц

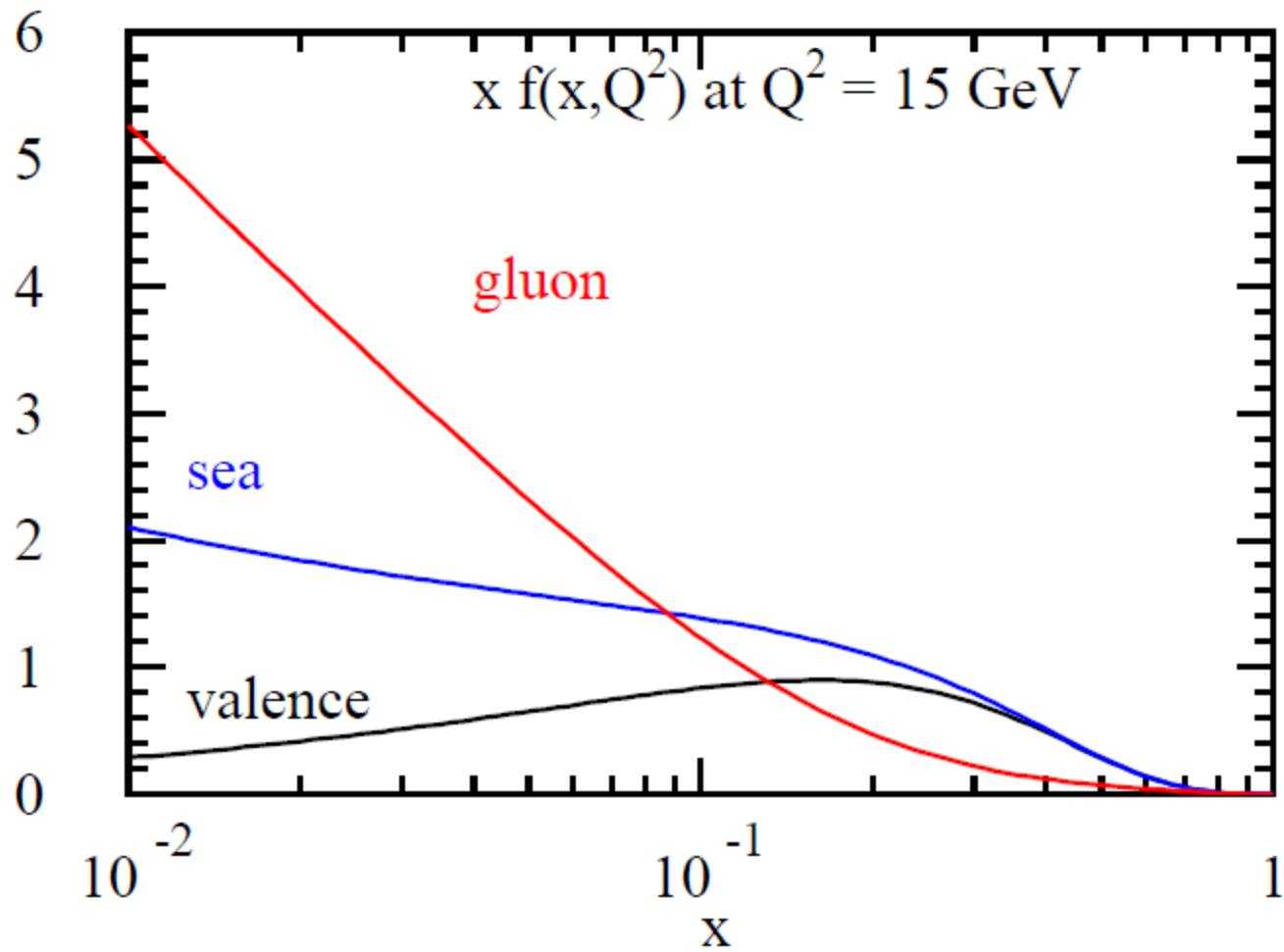
Фундаментальные частицы SM в конечном состоянии дают сигналы:

γ	γ (ЭМ ливень в ECAL, нет трека)
e	e (ЭМ ливень в ECAL с треком в трекаре)
μ	μ (трек в трекаре и мюонных камерах)
g	струи в ECAL+ HCAL
$q = u, d, s$	струи (узкие) в ECAL+HCAL
$q = c, b$	струи (узкие) + вершина распада
$t \rightarrow W + b$	$W + b$
$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	недостающая энергия в ECAL+HCAL
$\tau \rightarrow l + \nu_\tau + \nu_l$	недостающая энергия + заряженный лептон
$W \rightarrow l + \nu_l$	недостающая энергия + заряженный лептон + $E_t \sim M/2$
$Z \rightarrow l^+ + l^-$	пары заряженных лептонов
$\rightarrow \nu_l + \nu_l$	недостающая энергия в ECAL+HCAL

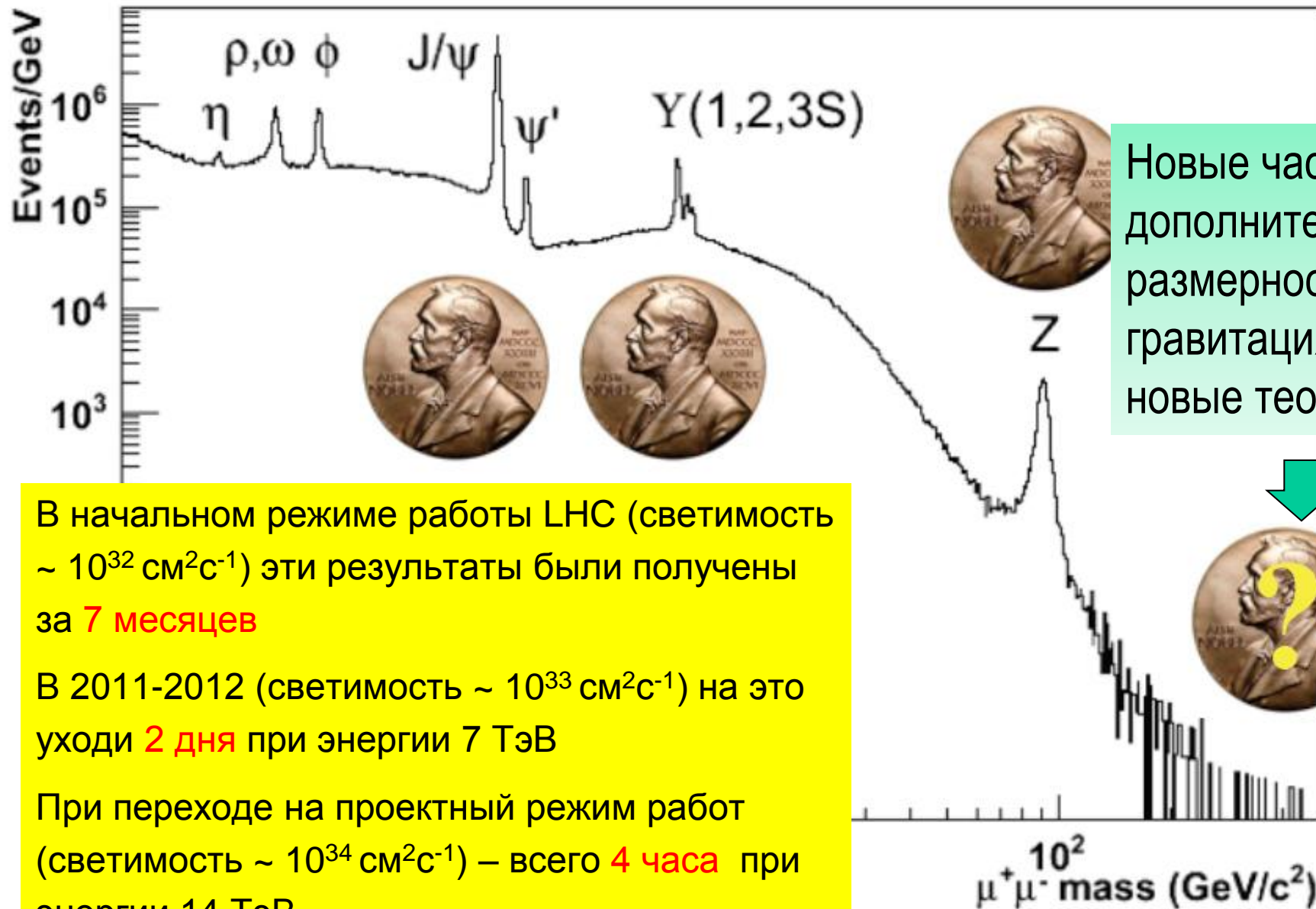
type	tracking	ECAL	HCAL	MUON
γ				
e				
μ				
Jet				
E_t miss				

Потоки данных с экспериментов ЛНС

	Level-1 kHz	Event MByte	Storage MByte/s	
	ATLAS 100	1	100	~ 3 ПетаБ/год
	CMS 100	1	100	~ 3 ПетаБ/год
	LHCb 400	0.1	20	
	ALICE 1	25	1500	



Спектр с парой мюонов



Новые частицы,
дополнительные
размерности,
гравитация и другие
новые теории

В начальном режиме работы LHC (светимость $\sim 10^{32} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) эти результаты были получены за **7 месяцев**

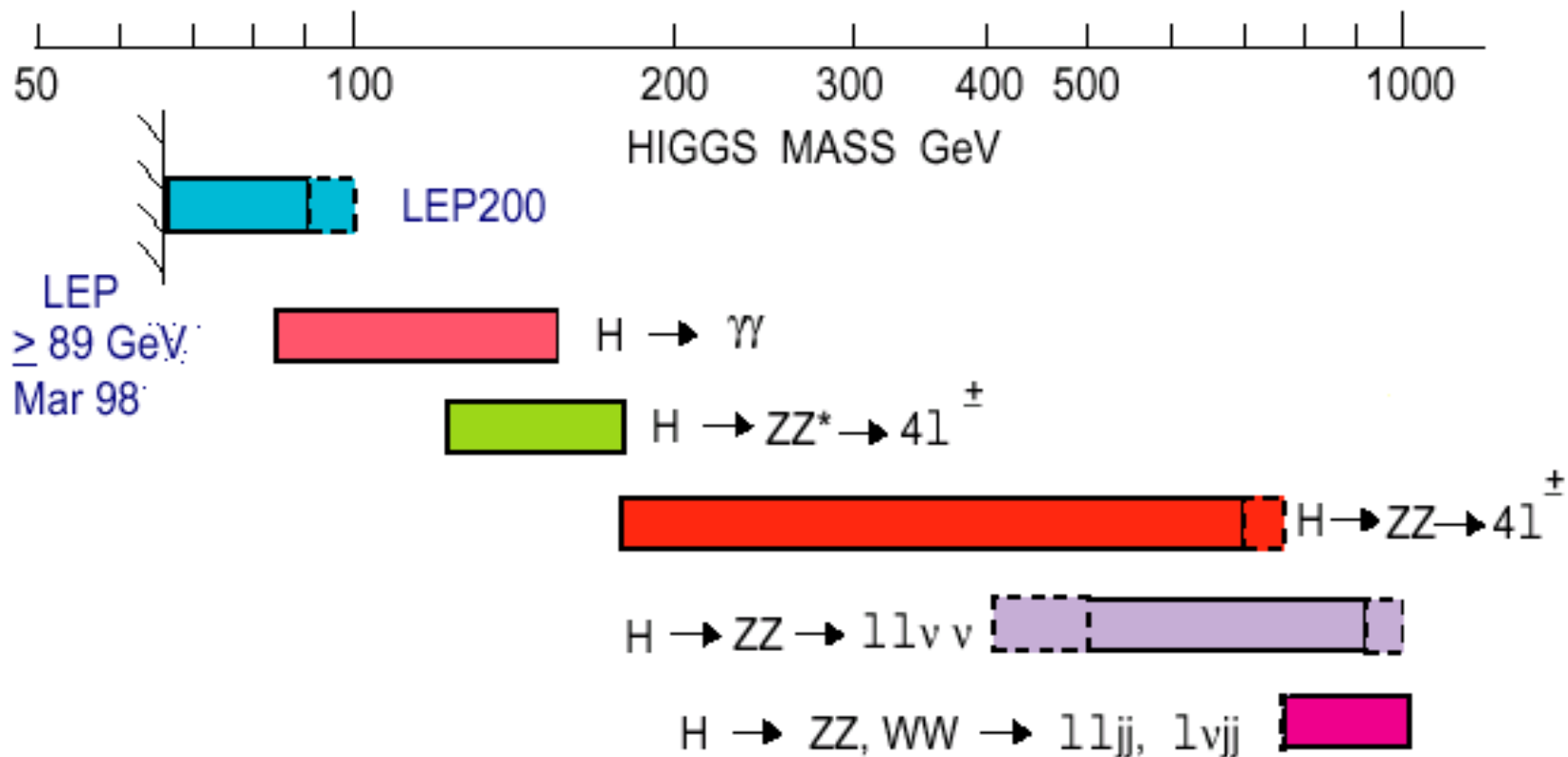
В 2011-2012 (светимость $\sim 10^{33} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) на это уходит **2 дня** при энергии 7 ТэВ

При переходе на проектный режим работ (светимость $\sim 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) – всего **4 часа** при энергии 14 ТэВ



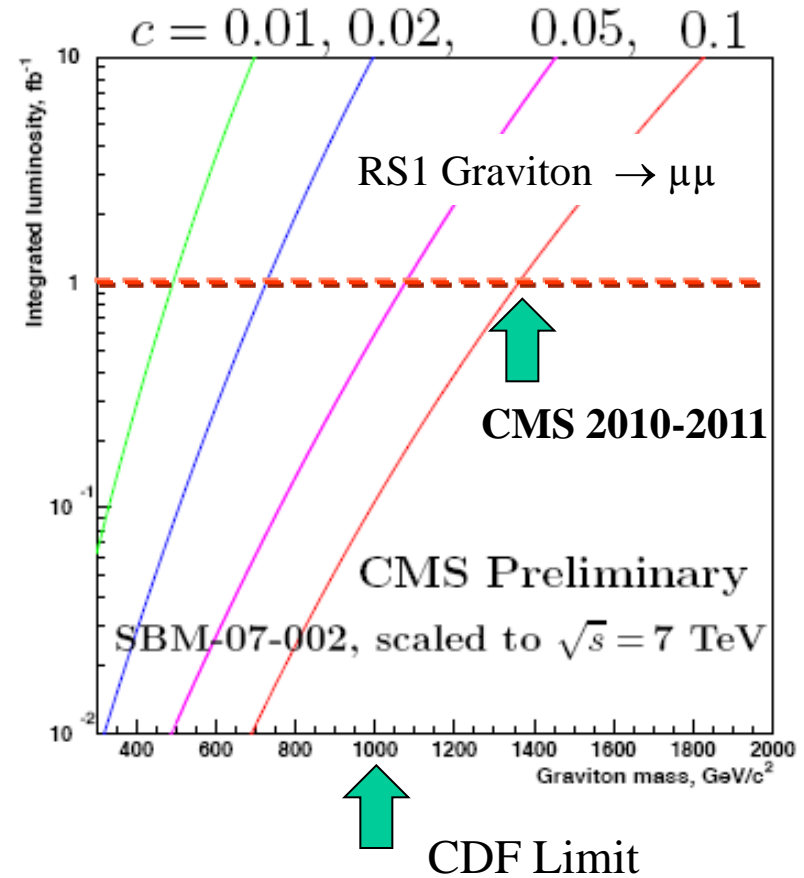
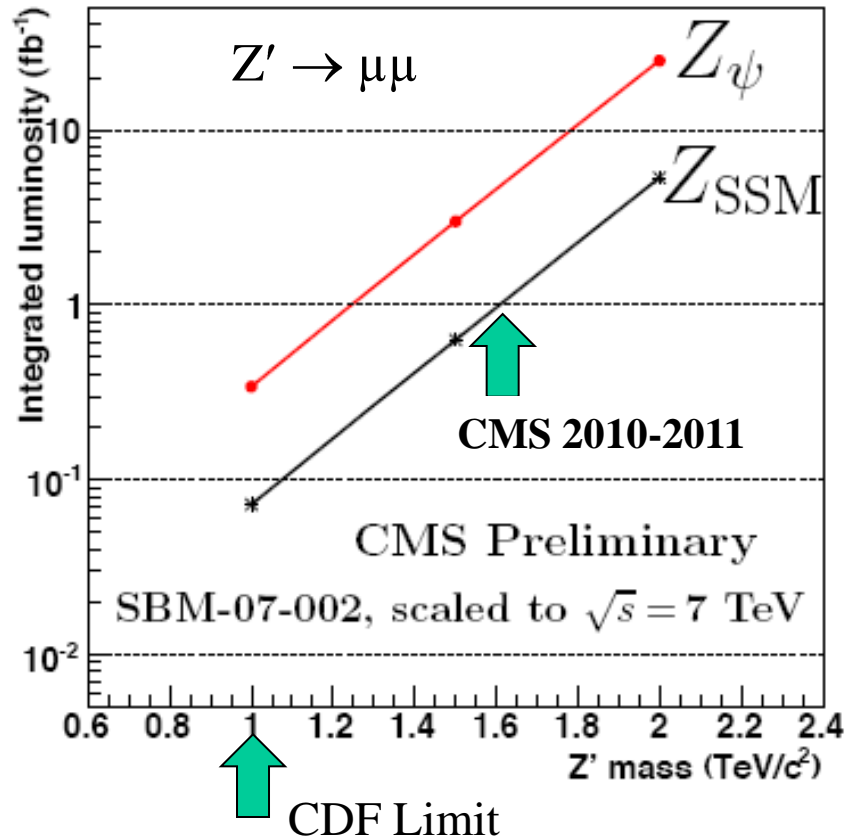
SM Higgs Search in CMS

Explorable mass range at $\sqrt{s} = 14$ TeV with 10^5 pb^{-1}
taken at $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Example of the Expected Results

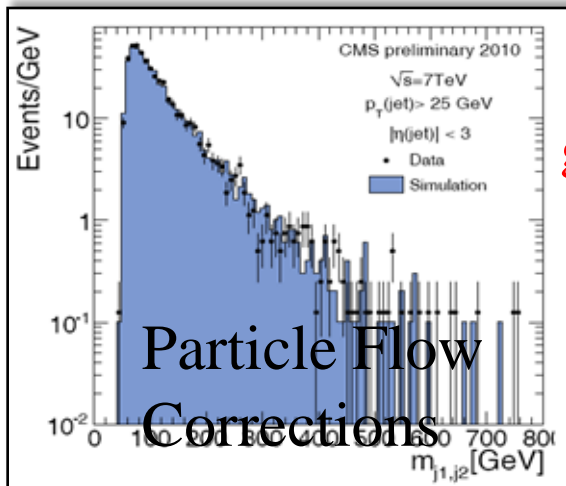
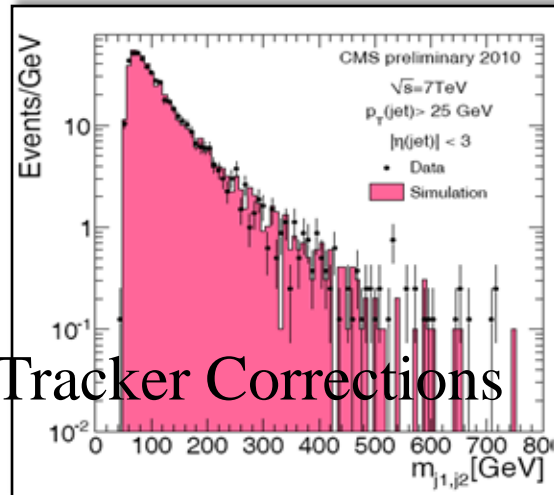
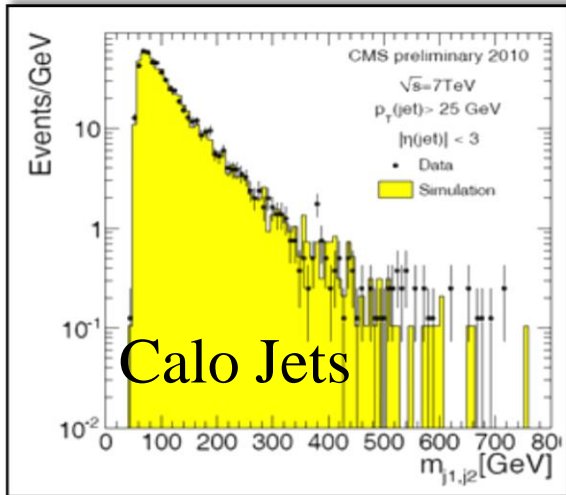
2011-2012: 8 TeV beams and up to 10 fb^{-1} of integrated luminosity



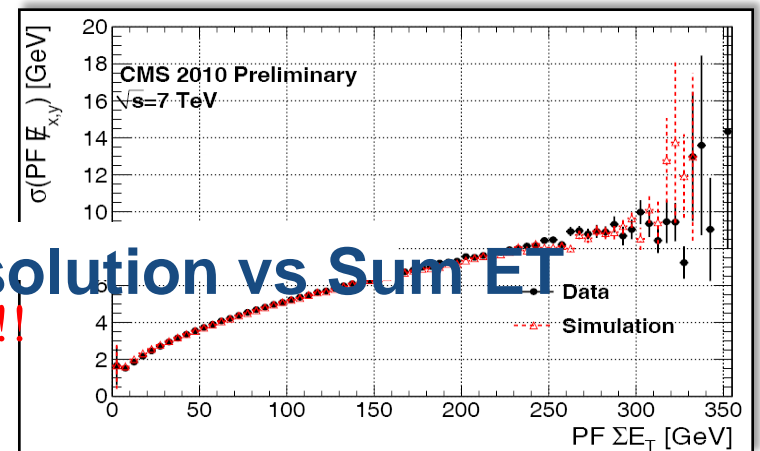
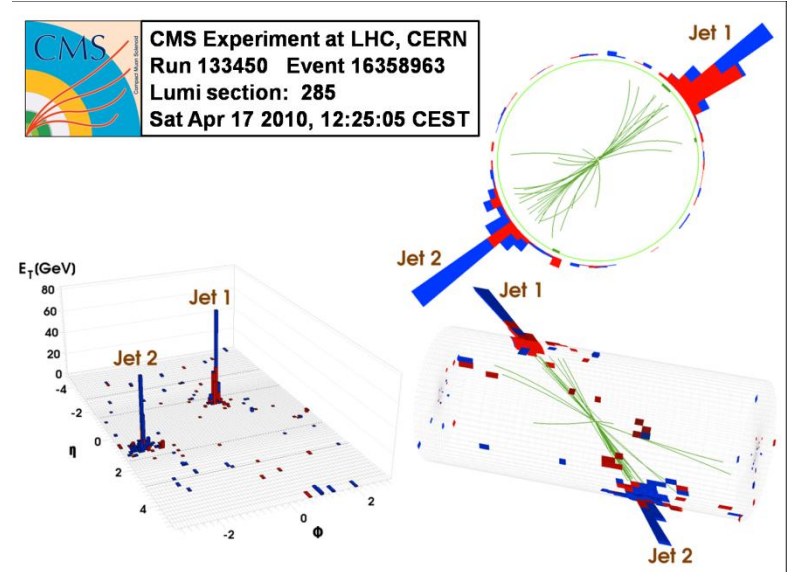
In 2011 new physics can be discovered if exists

Dijets and Missing E_T @ 7 TeV

- ❖ *Dijet selection : Jet Pt > 25 GeV, $\Delta\Phi > 2.1$, $|\eta| < 3$*
- ❖ *pure calorimetric, track corrected calo and particle flow*

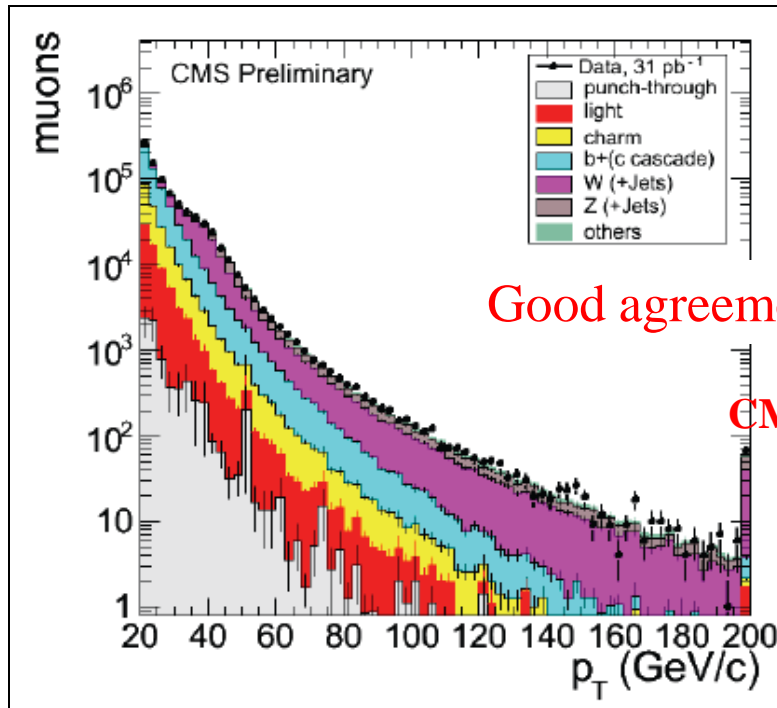


MET resolution vs Sum ET
 good agreement data and MC!!!



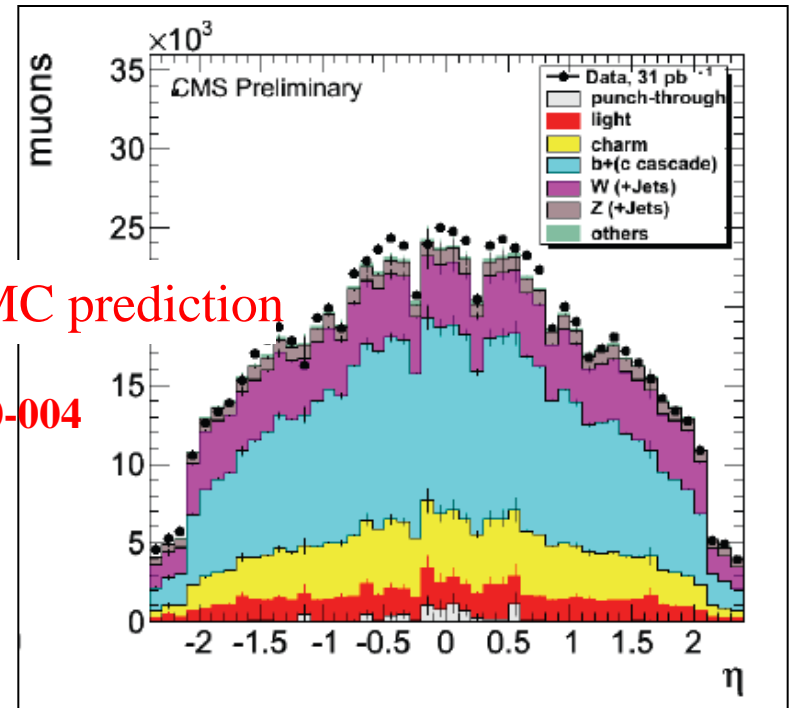
Muon Reconstruction Performance

CMS muon reconstruction performance was studied with Monte Carlo and collision data @ 7 TeV



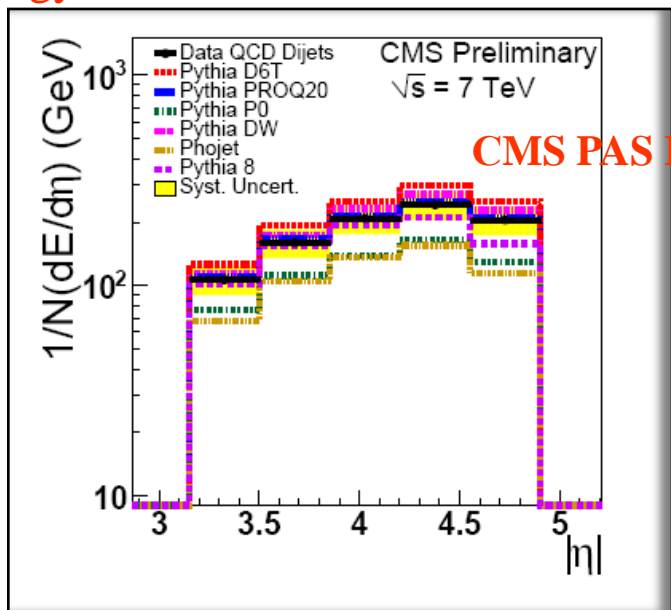
Good agreement with MC prediction

CMS MUO-10-004

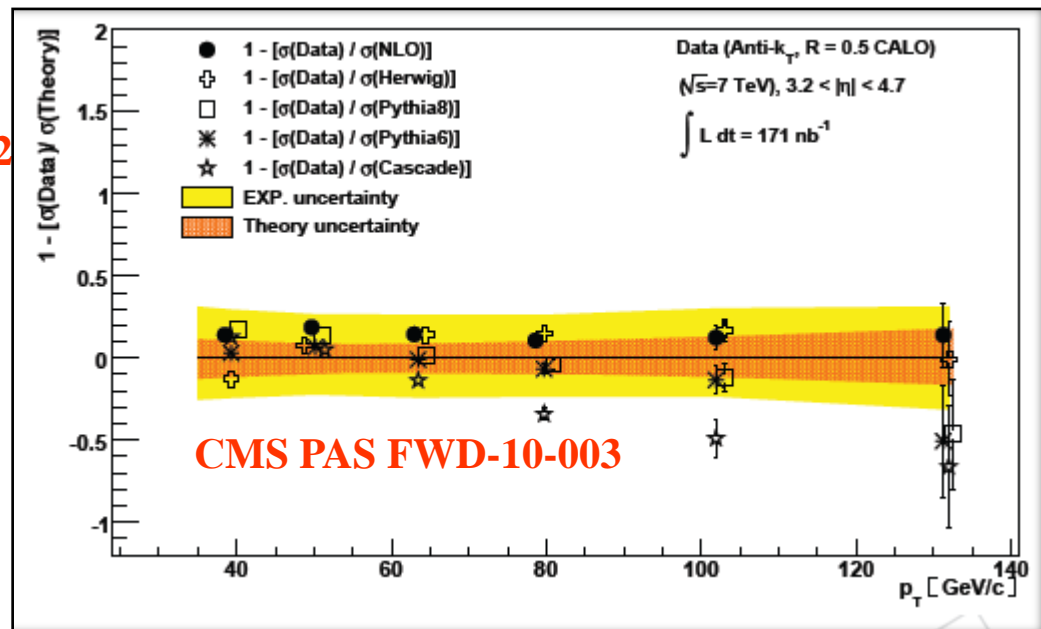


Observation of Diffraction Events

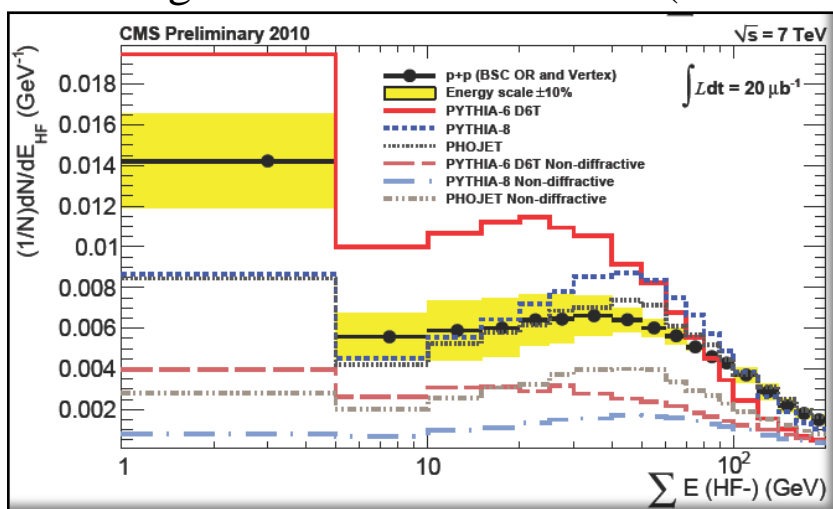
Energy flows: MC tunes



Forward jets: good agreement with theory



PHOJET agrees better with the data (in forward region)



JINR contributes in particular

- observation W and Z bosons as well as high mass dijets in events with a large rapidity gap

Инвариантная масса системы N частиц ($c=1$):

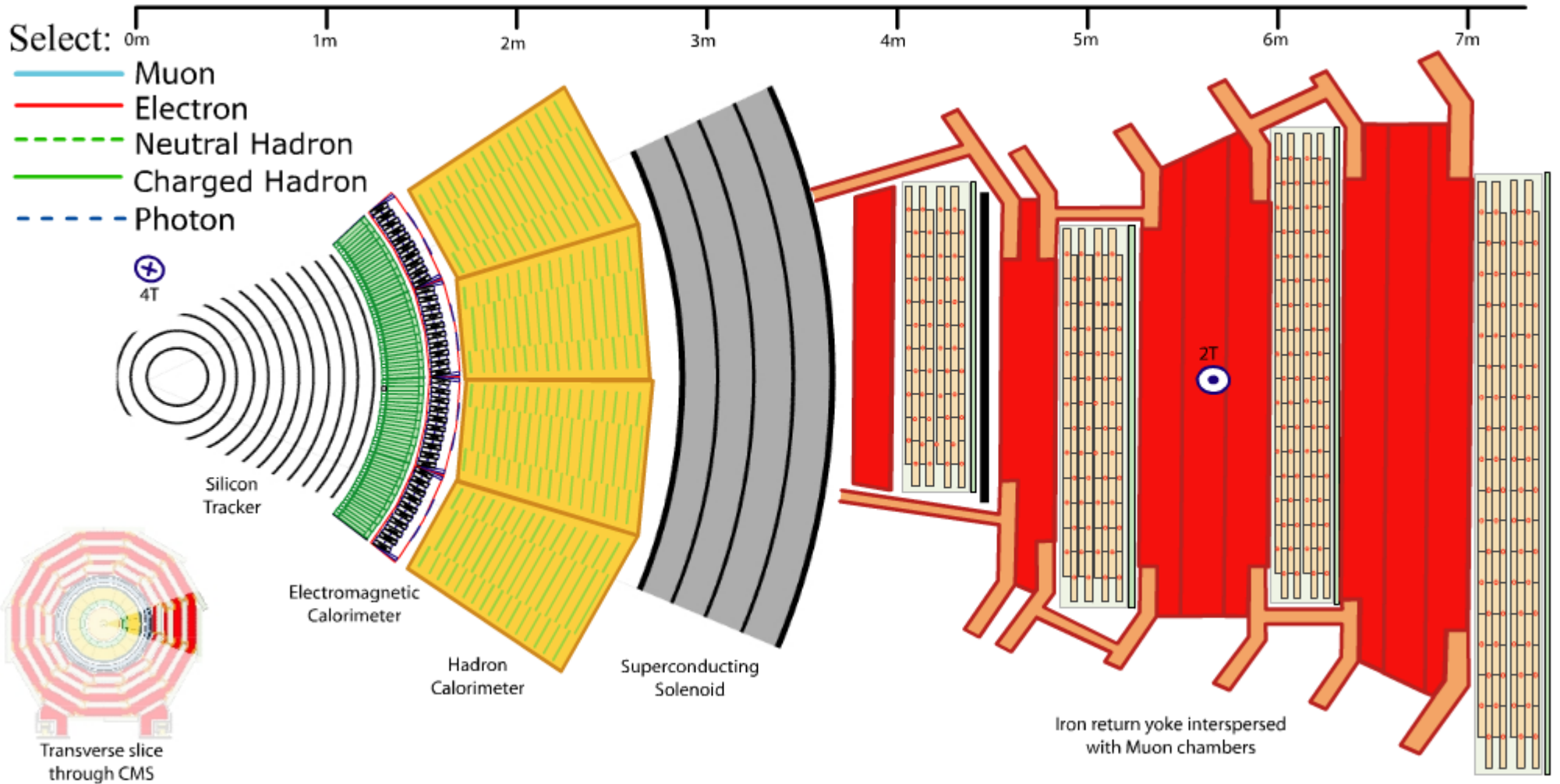
$$M_N(inv) = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2}$$

При распаде частицы массы M на N

частиц: $M_N(inv)=M$

*(следствие законов сохранения
энергии и импульса)*

Прохождение частиц через детектирующие системы (пример установки CMS)



Прохождение частиц через детектирующие системы (пример установки CMS)

