

Физика на Большом Адронном Коллайдере (LHC) в ЦЕРН: изучение фундаментальных свойств материи

С.В.Шматов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

shmatov@cern.ch

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА

МОЛОДЫХ УЧИТЕЛЕЙ ФИЗИКИ

Европейская Организация Ядерных Исследований (CERN)

1 - 7 ноября 2009 года

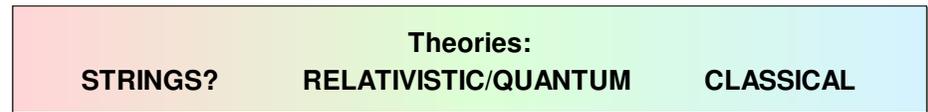
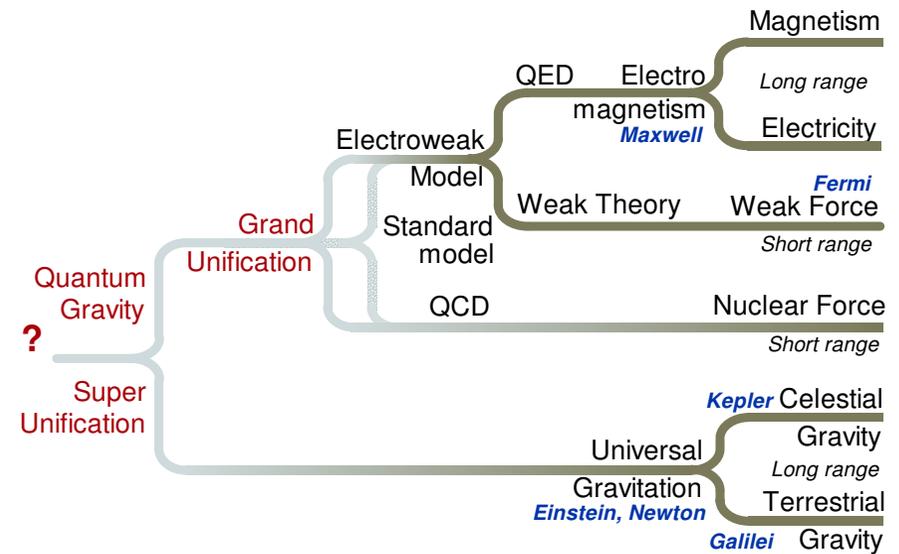
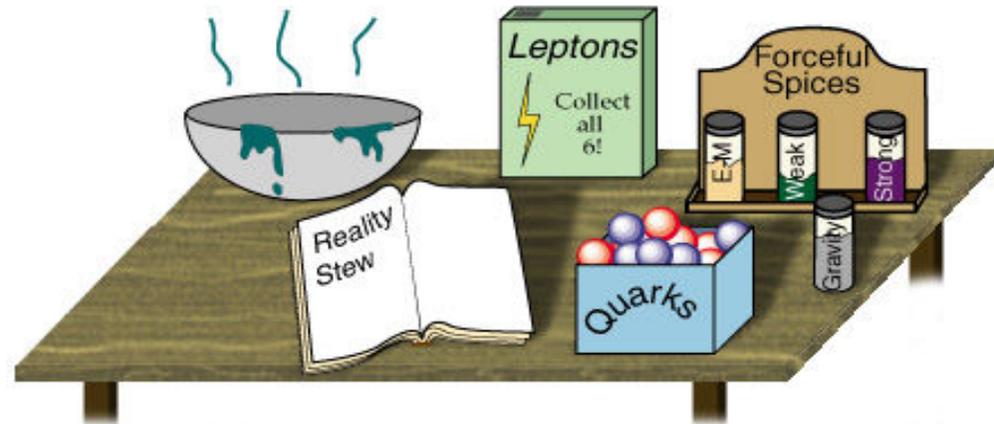
Что было до LHC?

Стандартная Модель

Три поколения
материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u верхний	c очаровательный	t истинный	γ фотон
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d нижний	s странный	b прелестный	g глюон
Лептоны	< 2,2 эВ	< 0,17 МэВ	< 15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюнное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	Z слабое взаимодействие
Лептоны	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау	W[±] слабое взаимодействие

Бозоны (переносчики взаимодействия)



Почему мы считаем, что за пределами
Стандартной модели что-то есть ?

Мотивация 1: Бозон Хиггса

Стандартная Модель (СМ) сильных и электрослабых взаимодействий находится в отличном согласии с экспериментальными данными

Проблема генерации масс частиц теоретически решается посредством механизма Хиггса

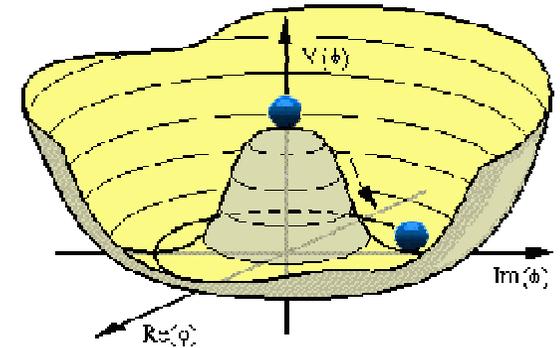
НО

масса бозона Хиггса в рамках СМ не предсказывается

(можно только сделать не прямые оценки из некоторых теоретических предположений и экспериментальных фитов: $m_H > 114$ ГэВ)

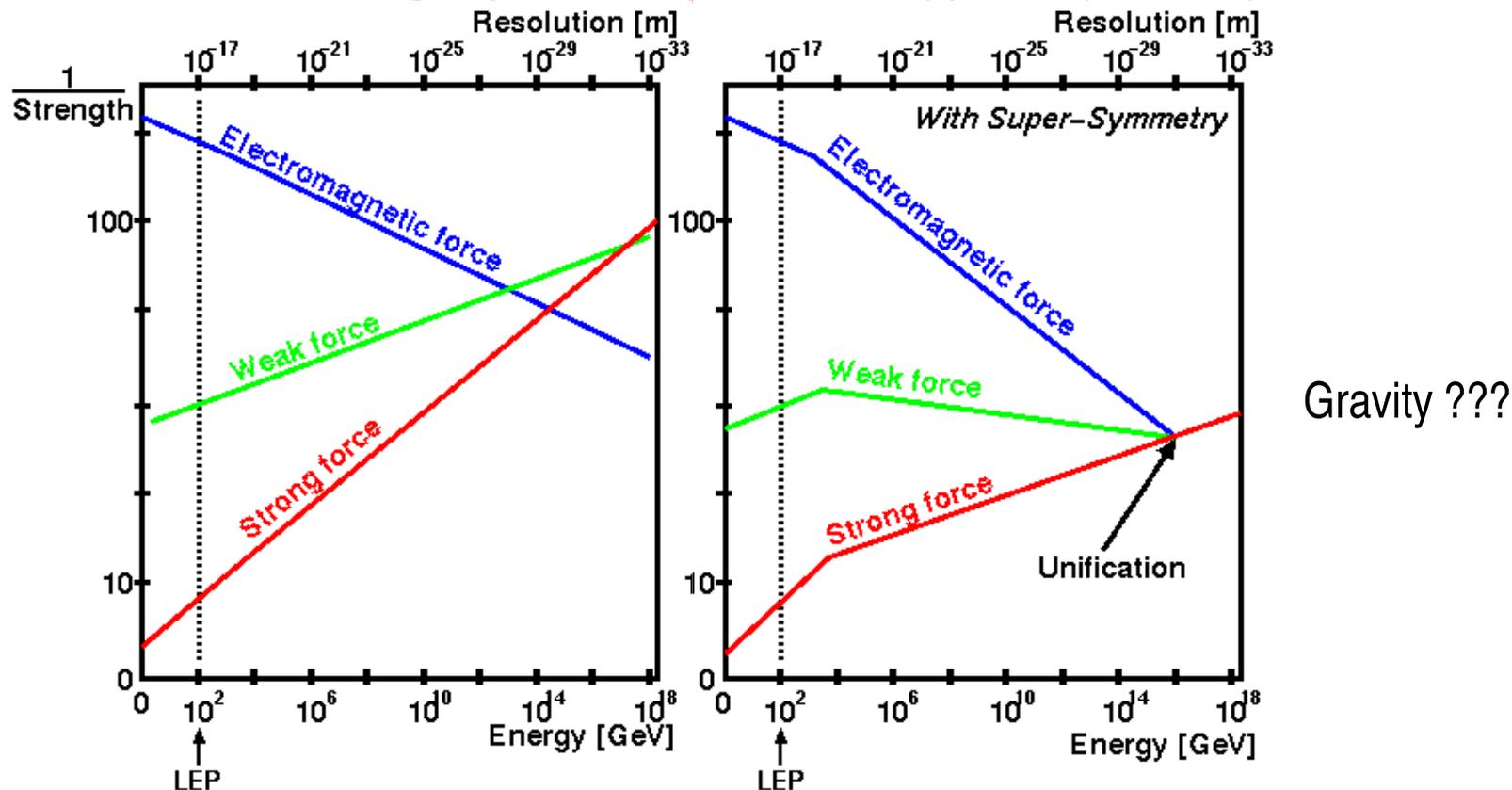
Поэтому одной из основных задач экспериментов на LHC является поиск бозона хиггса СМ и ее расширений (MSSM)

если бозон Хиггса будет обнаружен, что дальше?



Мотивация 2: является ли СМ “окончательной” теорией?

Объединение констант взаимодействий в СМ и минимальной суперсимметричной моделях (MSSM)



Вклад суперпартнеров изменяют характер поведения “бегущих” констант :

Объединение констант происходит, если $M_{SUSY} \sim 1 \text{ ТэВ} !!!!$

Мотивация 3: “белые” пятна СМ

- ❑ СМ не описывает гравитацию
- ❑ Проблема иерархии - большой разрыв между масштабом электрослабых взаимодействий (10^3 GeV) и масштабом Великого объединения (10^{16} GeV)
- ❑ Большое число свободных параметров, которые не могут быть зафиксированы самой СМ
- ❑ Число поколений фермионов также не фиксируются СМ

Космологические открытые вопросы

- ❑ Что (и как) вызвало инфляцию Вселенной на начальных стадиях?
- ❑ Из чего состоит темная материя Вселенной?
- ❑ Почему Вселенная состоит из Вещества?
(проблема CP-нарушения в ранней Вселенной и источник доминирования вещества над антивеществом)
- ❑ Почему на сегодняшний день величина космологического масштабного фактора такая же по порядку величины, как и постоянная Хаббла, но на много порядков меньше масштаба 4х-мерной гравитации, M_{Pl} или других фундаментальных масштабов физики частиц?
- ❑ Почему M_{GUT} близко к M_{Pl} ?



Возможные пути решения

- ❑ **Техницвет**
- ❑ **Расширенные калибровочные модели**
основанные на более общих симметриях, чем $SM - E_6$ or $SO(10)$
- ❑ **Суперсимметрия**
асимметрия между фермионными и бозонными полями
⇒ должна быть нарушена на низкоэнергетическом масштабе (? ТэВ)
- ❑ **Теория струн**
многомерность Вселенной - (9+1) измерение
один параметр - M_{Pl}

Физические перспективы LHC

- ❑ **Масса:** почему фундаментальные частицы имеют массу и почему эти массы столь различны?
- ❑ **Антиматерия:** куда она исчезла?
- ❑ **Темная материя:** чем она может быть?
- ❑ **Геометрия Вселенной:** существуют ли дополнительные измерения? геометрия многомерного пространства?
- ❑ **Новые частицы:** существуют ли они? (суперпартнеры, дополнительные калибровочные бозоны, гравитонные состояния и т.д.)
- ❑ **КХД-материя:** каковы свойства КХД при больших плотностях энергии, существует ли кварк-глюонная плазма?

Проверка границы применимости Стандартной модели!

Большой адронный коллайдер

$$\sqrt{S}(pp) = 14 \text{ TeV}$$

$$L(\text{start} - \text{up}) = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} (1 \text{ фбн}^{-1} / \text{год})$$

$$L(\text{low}) = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} (10 \text{ фбн}^{-1} / \text{год})$$

$$L(\text{high}) = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} (100 \text{ фбн}^{-1} / \text{год})$$

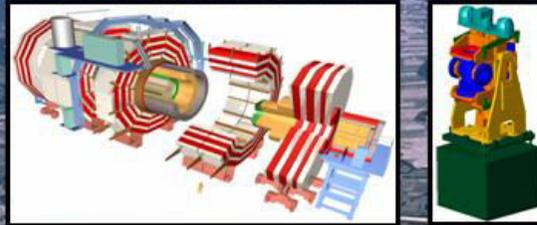
2835 сгустков (bunch) в пучке

10^{11} протонов в сгустке

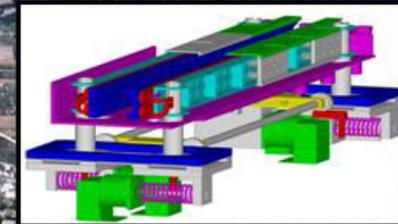
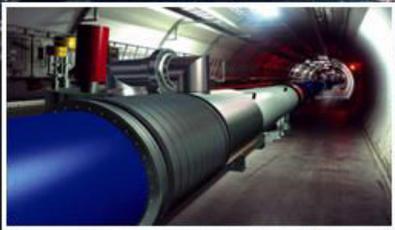
$$\sqrt{S}(PbPb) = 5.62 \text{ TeV} / \text{nucleon}$$

$$L = 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

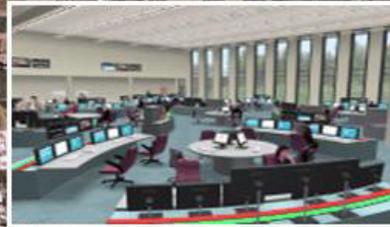
Четыре эксперимента на LHC



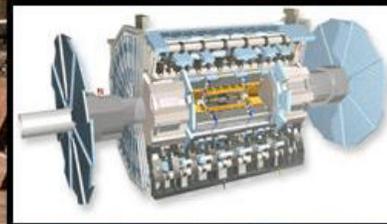
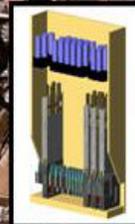
Compact Muon Solenoid (CMS)



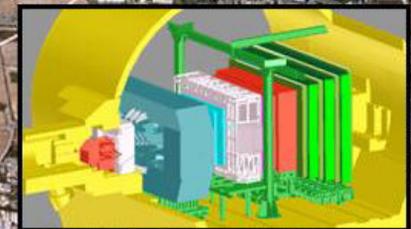
LHC-B



A Large Ion Collider Experiment (ALICE)



A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



ATLAS и CMS – многоцелевые экспериментальные установки, нацеленные на решение всего спектра физических задач LHC

CMS

LHCb предназначен для измерения параметров CP-нарушения в распадах тяжелых частиц, содержащих b-кварк (B-мезоны) – загадка антиматерии и материи

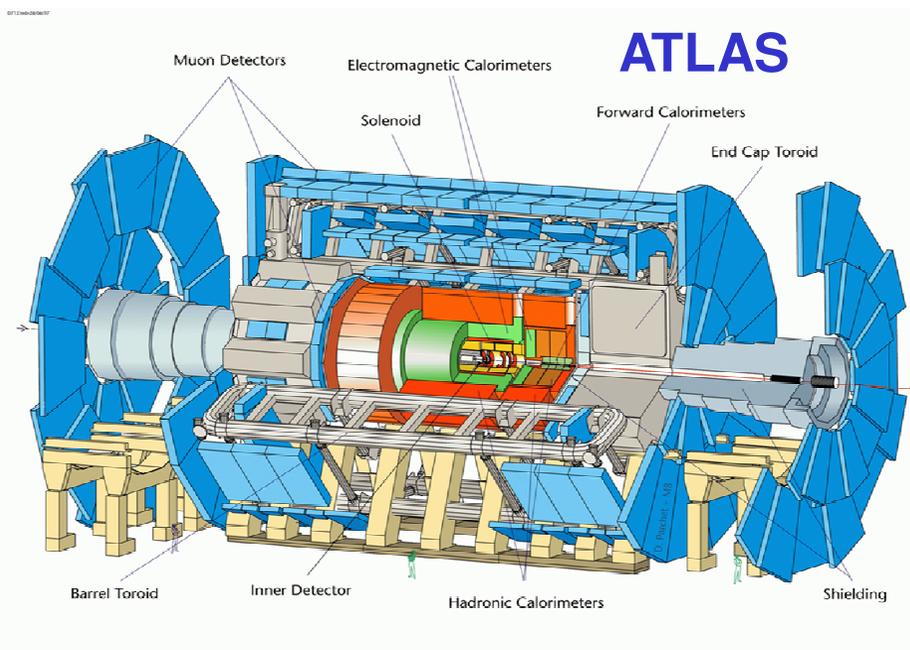
**14 км
15 минут**

ALICE сконструирован для изучения свойств сильновзаимодействующей ядерной материи и поиска кварк-глюонной плазмы

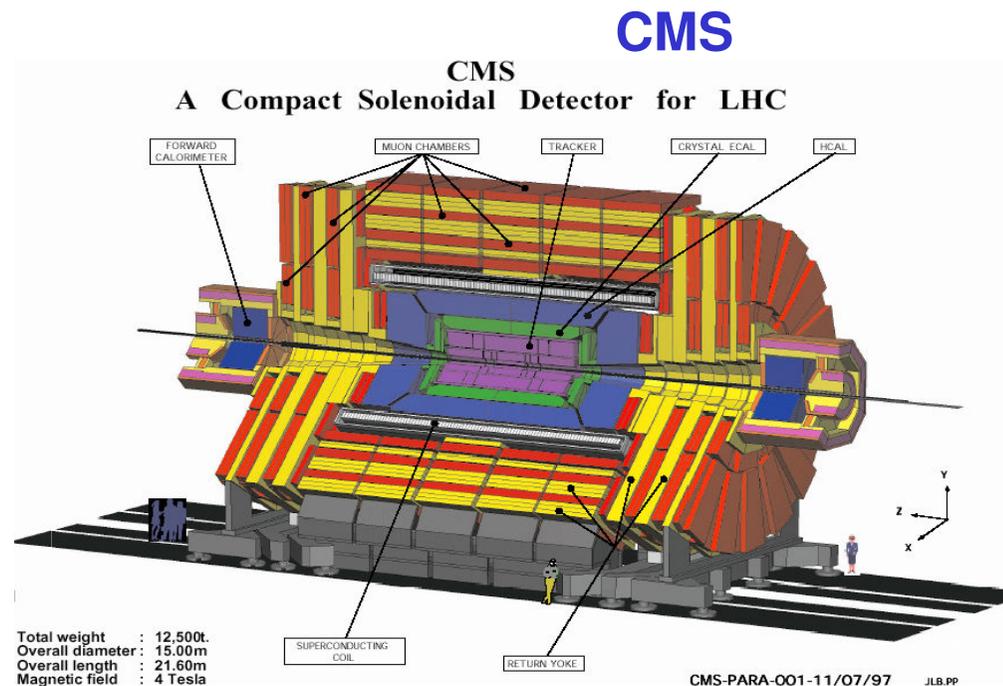
**ЦЕРН
здание 40**



Эксперименты ATLAS и CMS



Вес	7000 t
Диаметр	25 m
Длина центрального тороида	26 m
Общая длина	46 m
Магнитное поле	2 Tesla

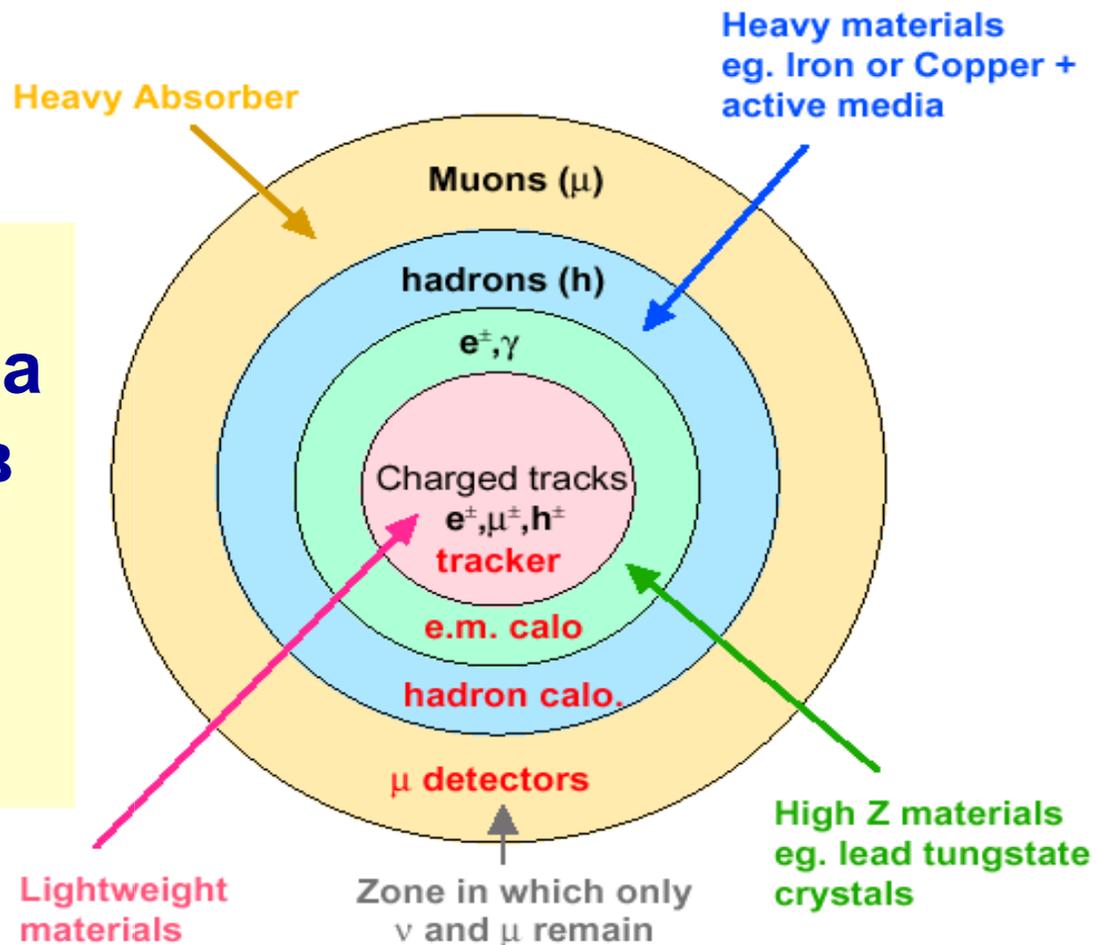


Вес	12 500 t
Диаметр	15.00 m
Длина	21.6 m
Магнитное поле	4 Tesla

Детекторные системы спроектированы для измерения:
энергии и импульса фотонов, электронов, мюонов и струй до значений
нескольких ТэВ

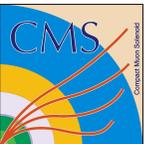
Принцип

- “Матрешка” или “луковица” - структура детектирующих слоев размещенная в магнитном поле



Each layer identifies and measures (or remeasures) the energy of particles unmeasured by the previous layer

No single detector can determine identity and measure energies/momenta of all particles



Регистрация фундаментальных частиц

Фундаментальные частицы SM в конечном состоянии дают сигналы:

- γ (ЭМ ливень в ECAL, нет трека)
- e (ЭМ ливень в ECAL с треком в трекаре)
- 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 + Et~M/2
- $Z \rightarrow l^+ + l^-$ пары заряженных лептонов
- $\rightarrow \nu_l + \nu_l$ недостающая энергия в ECAL+HCAL

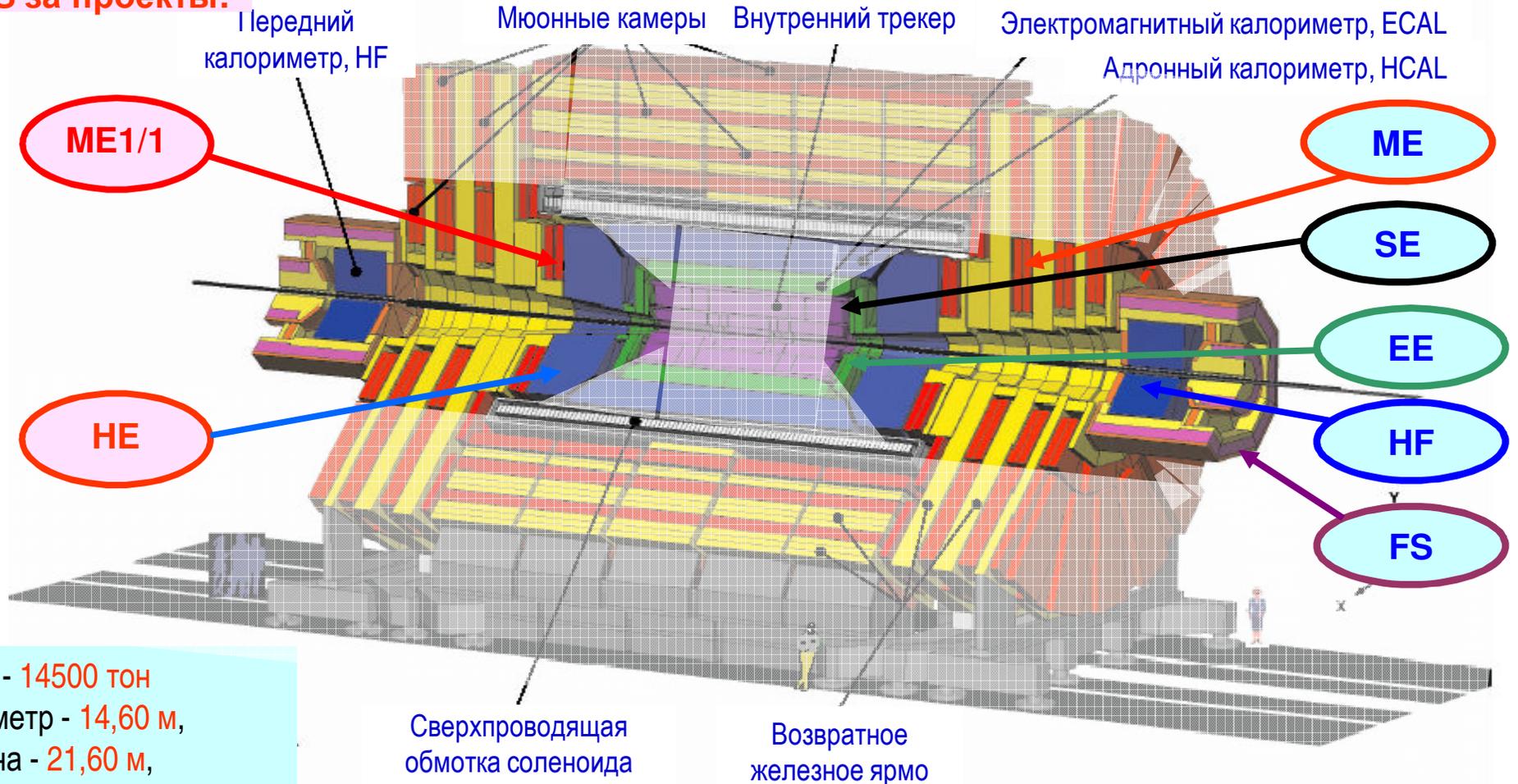
type	tracking	ECAL	HCAL	MUON
γ				
e				
μ				
Jet				
Et miss				

Участие российских институтов в проекте CMS направлено в основном на создание торцевой системы детекторов, которая размещается внутри соленоида с полем 4 Тесла и измеряет энергии и импульсы частиц с помощью калориметров и трековых детекторов

Полная ответственность RDMS за проекты:

CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC

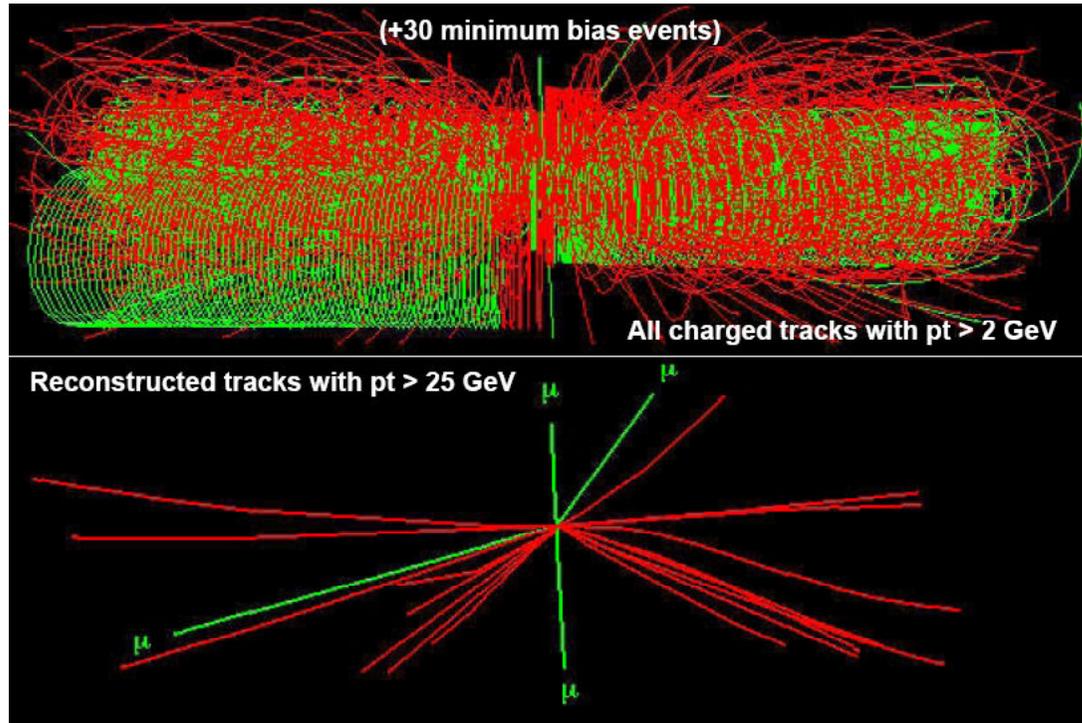
Участие RDMS в проектах:



вес - 14500 тон
диаметр - 14,60 м,
длина - 21,60 м,
магнитное поле - 4 Тесла

Как происходит накопление
физической информации?

Пример: распад бозона Хиггса в 4 мюона: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



Этапы получения физической информации:

- регистрация событий
- отбор событий
- реконструкция частиц СМ
- реконструкция физического события
- анализ (сравнение с нашими ожиданиями – теория + монте-карло*)

* моделирование физического процесса, на основании наших знаний + моделирование “отклика” детектора, т.е. прохождение частиц через детектор, их взаимодействия с материалом детектора и получаемых сигналов

Физика на LHC – физика процессов с низкими
сечениями
(маленькими вероятностями)

Физика на LHC

Полный поток “интересных” событий составляет $\sim 10^{-8}$ от полной интенсивности !

Доля событий с сигналами “новой физики” составляет от 10^{-10} (Хиггс и суперсимметрия) до 10^{-15} (физика за пределами СМ)

Процессы WW слияния ($\sim 3 \times 10^4$ соб. в год) позволяют провести проверку СМ и обнаружить бозон Хиггса в области масс до 500 ГэВ

Измерения тяжелых димюонных состояний ($\sim 10^3$ соб. в год) позволит проверить СМ в области инвариантных масс до 3-5 ТэВ и обнаружить сигналы от новых калибровочных бозонов, дополнительных измерений (гравитации на масштабе ТэВ) и т.д.

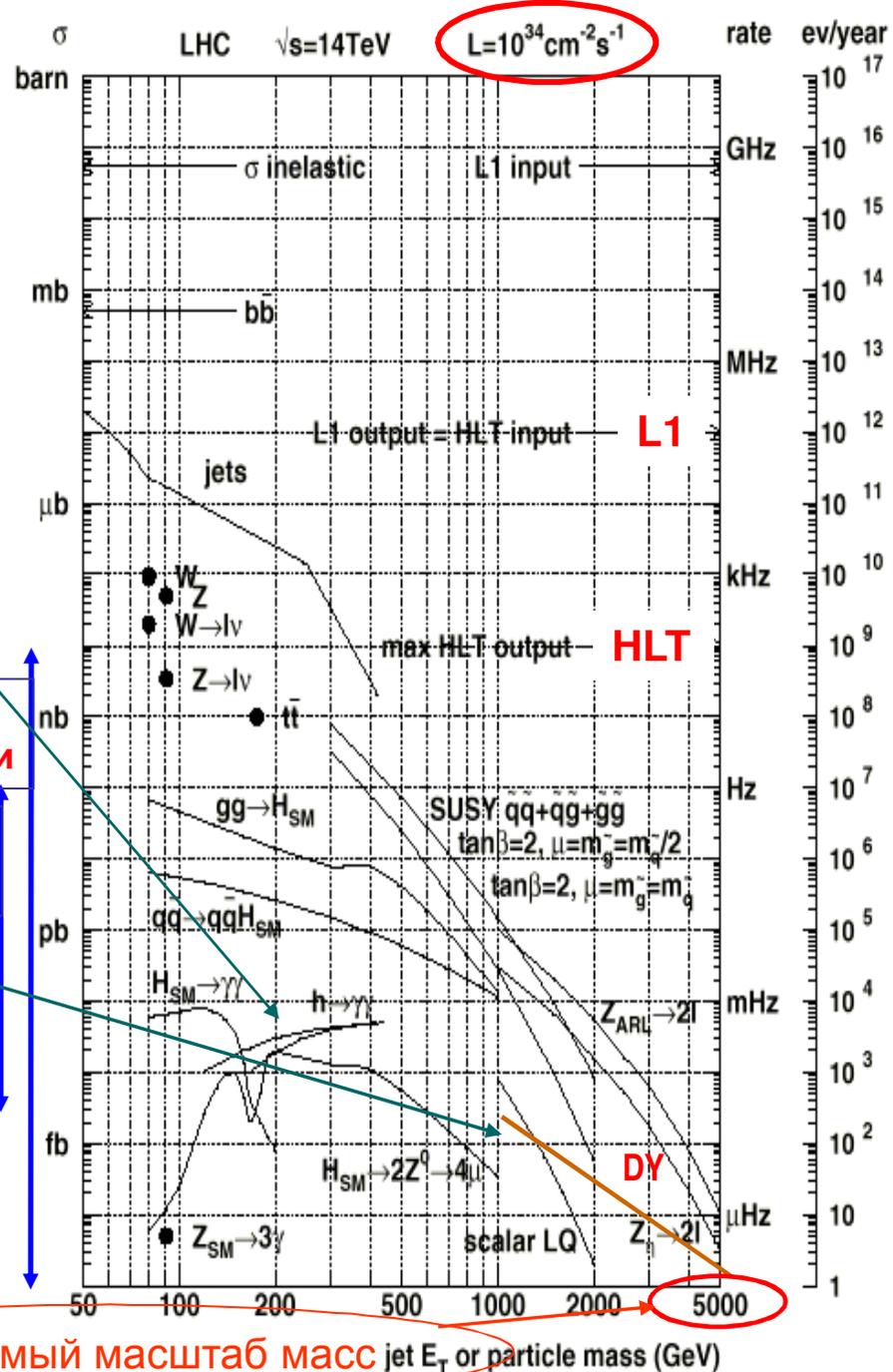
Подавление выхода димюонных состояний ($\sim 10^6$ соб. в год) служит сигналом образования кварк-глюонной плазмы

Физика Стандартной модели

Физика бозона Хиггса, суперсимметрия

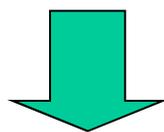
Физика за пределами СМ

достижимый масштаб масс jet E_T or particle mass (GeV)



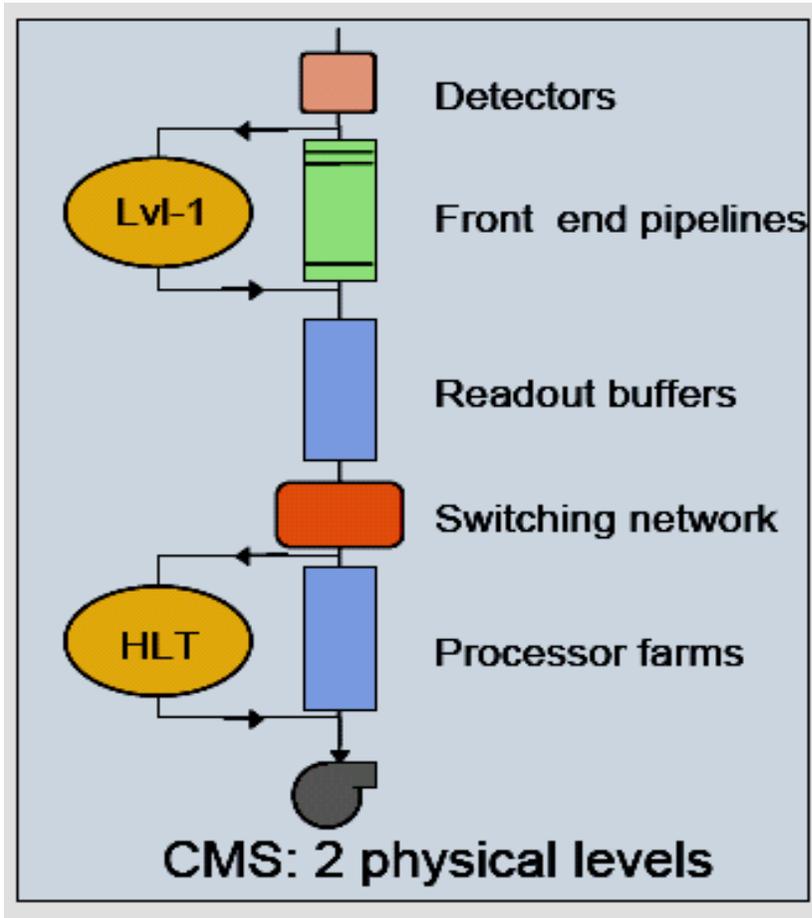
Для записи и последующего хранения, обработки и анализа необходимо выделить только часть событий (в режиме реального времени!!)

- интерес для физиков представляет только небольшая часть
- отсутствует возможность обработать весь поток данных с LHC

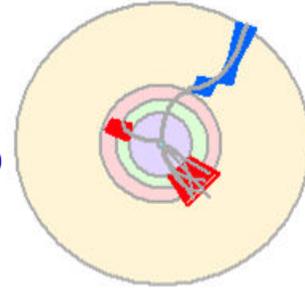


Система обора (триггер)

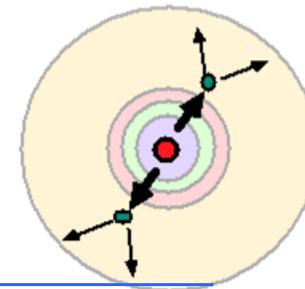
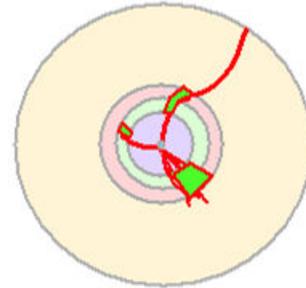
Пример: система триггера CMS



- 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

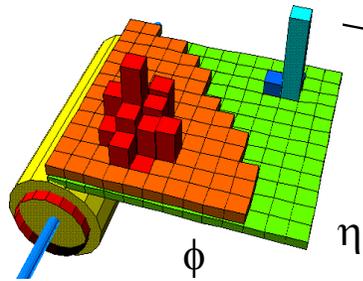


- Триггер высокого уровня (High Level Trigger):
вычислительные фермы для быстрой реконструкции и анализа событий, отбор по заданным порогам на кинематические характеристики частиц (энергия, импульс, угол, изолированность и т.д.), топологии событий



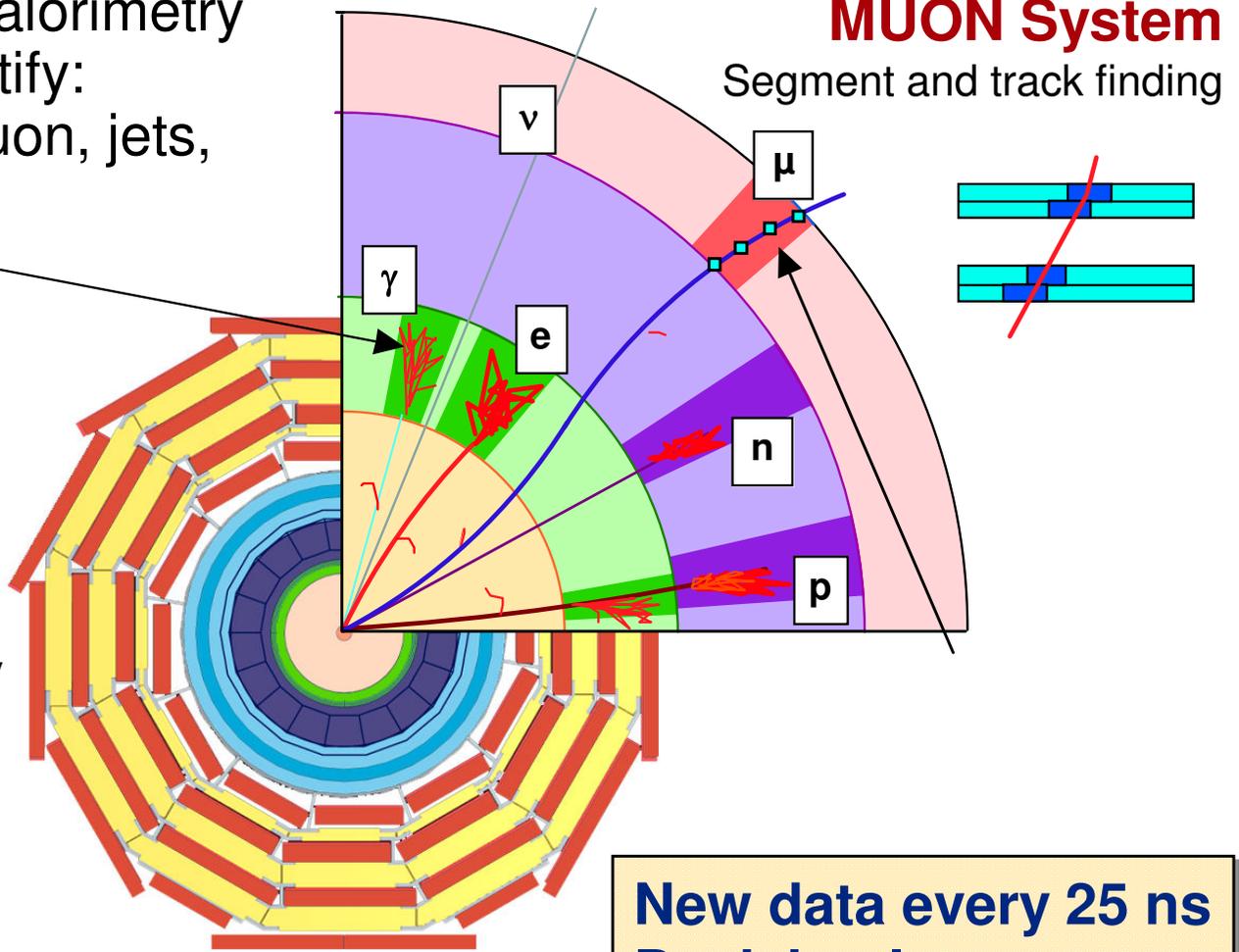
Идентификация частиц

Use prompt data (calorimetry and muons) to identify:
High p_t electron, muon, jets,
missing E_T



CALORIMETERS

Cluster finding and energy deposition evaluation



New data every 25 ns
Decision latency $\sim \mu\text{s}$

Online: Система на линии с ЭВМ

- Много-уровневый триггер - запуск установки

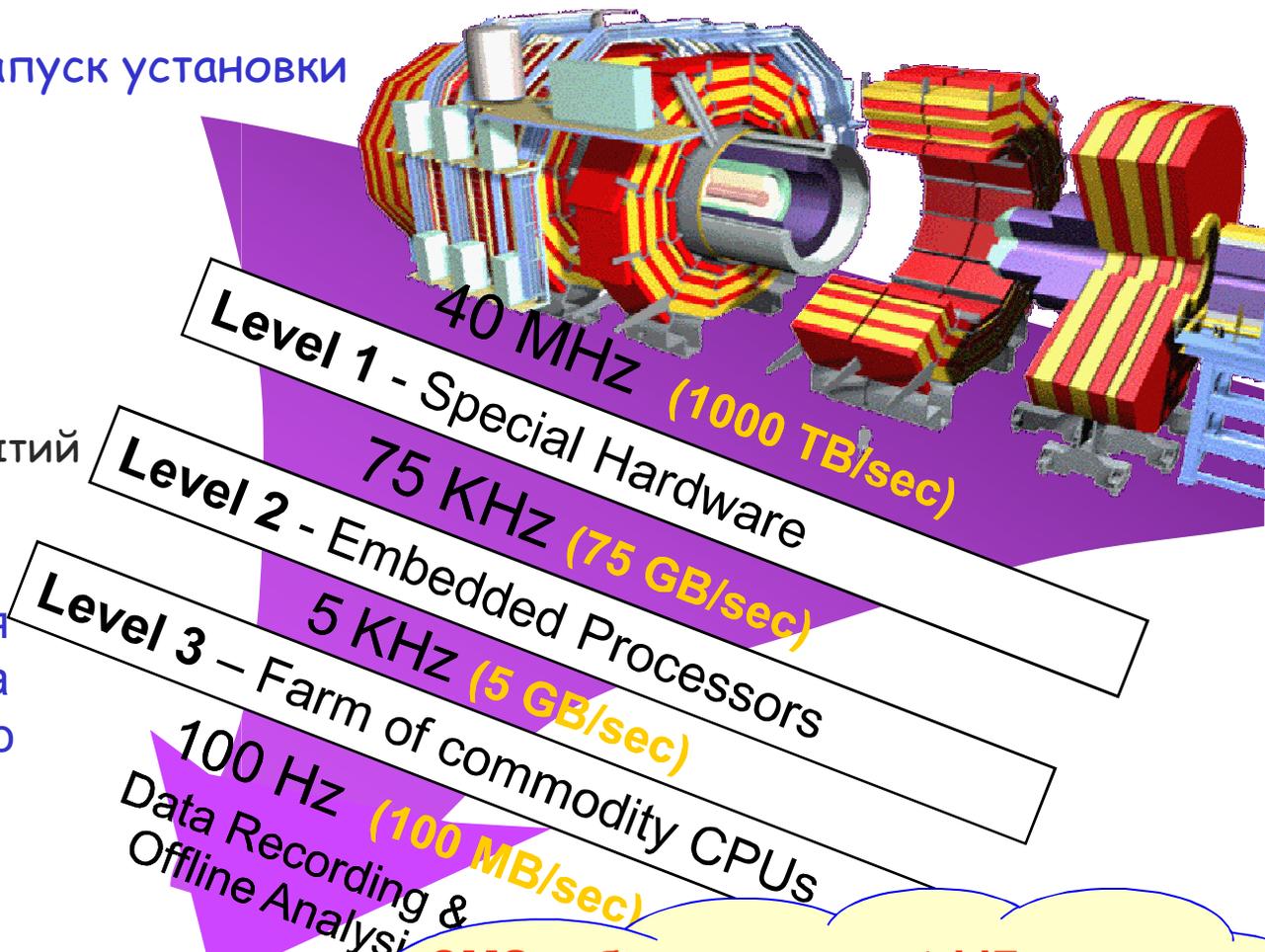
- Фильтрация фона
- Уменьшение объема данных
- Фактор Online подавления - 10^7

- Меню триггера

- Выбор интересующих событий
- Фильтрация неинтересных событий

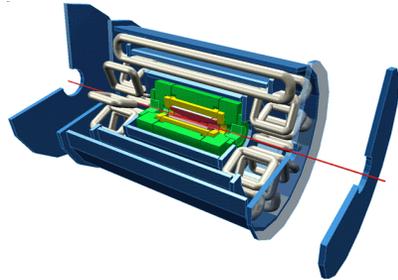
В эксперименте CMS поток данных с детектора уменьшается с 1000 TB/sec ($1\text{TB}=10^{12}$ Bytes) на входе триггера первого уровня до 100 MB/sec на выходе триггера третьего уровня.

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 HTL	- 0.1 ГБ/с
поток	~ 3ПетаБ/год

Потоки данных с экспериментов LHC



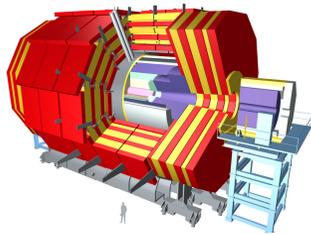
ATLAS

Level-1 kHz
Event MByte
Storage MByte/s

100

1

100

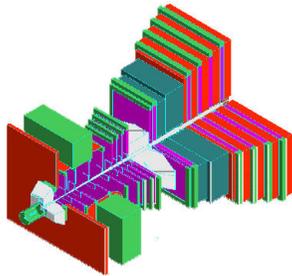


CMS

100

1

100

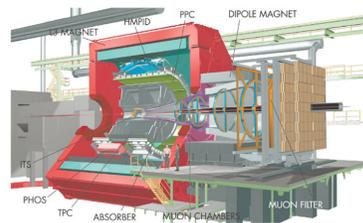


LHCb

400

0.1

20



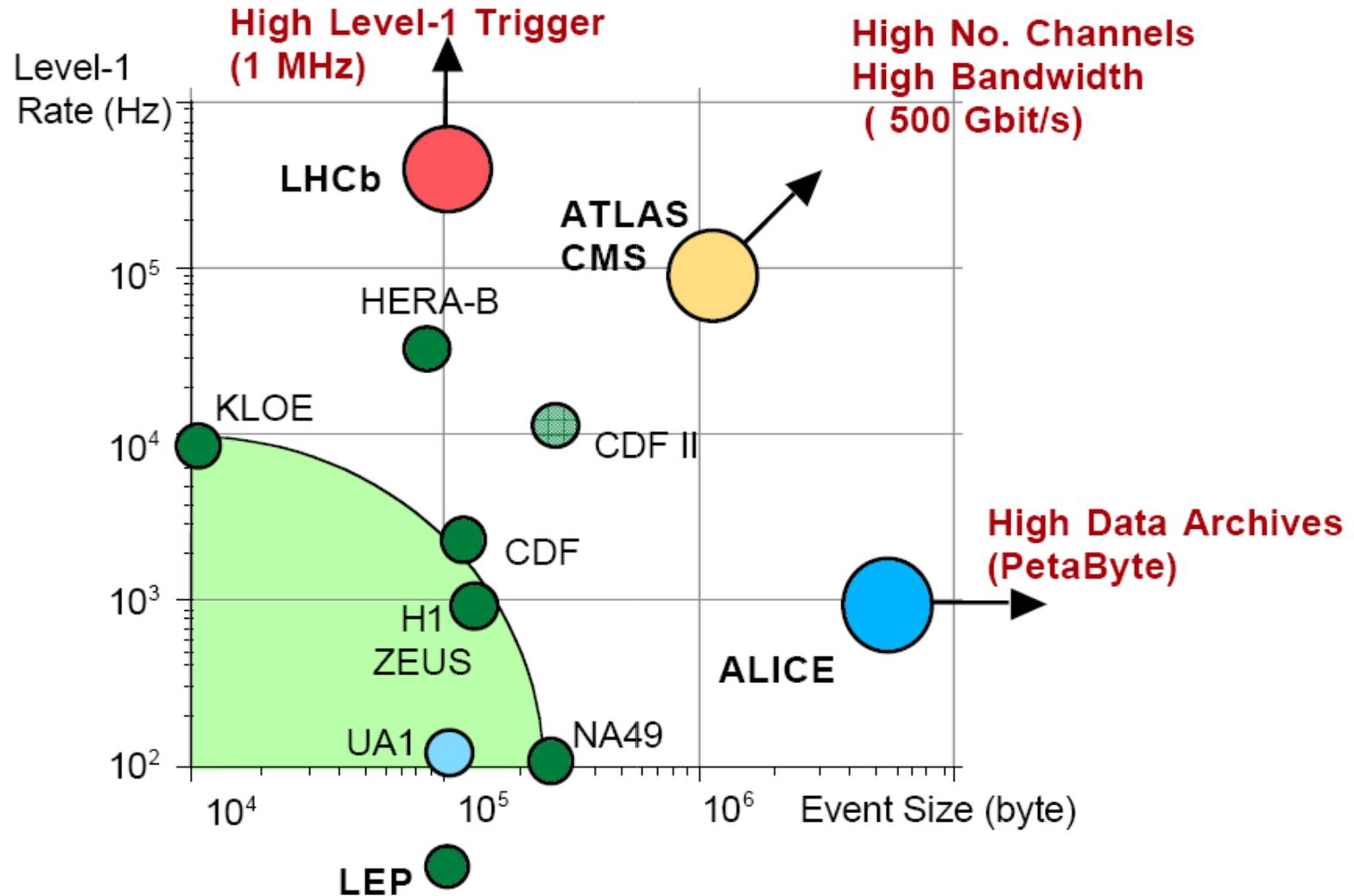
ALICE

1

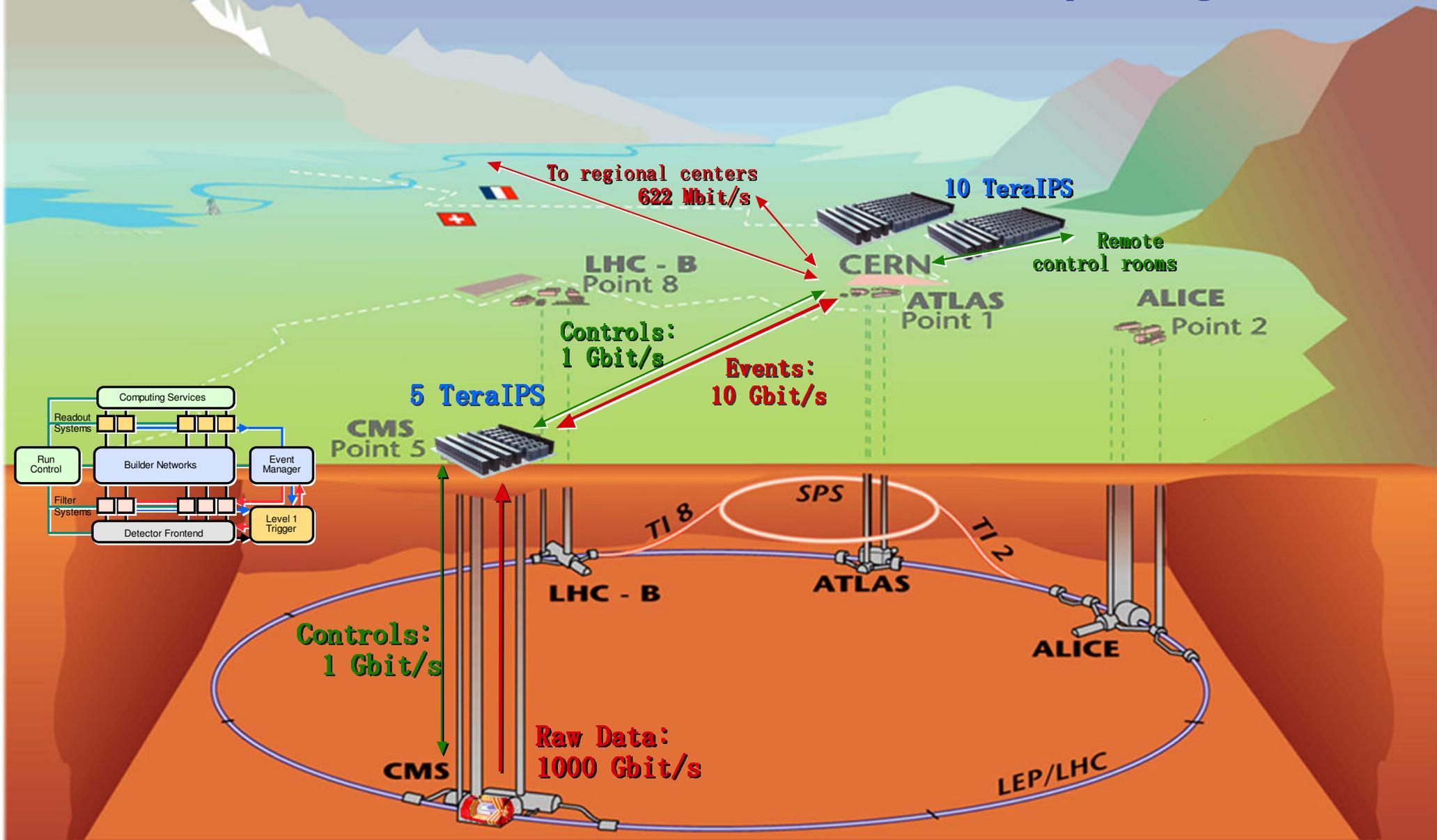
25

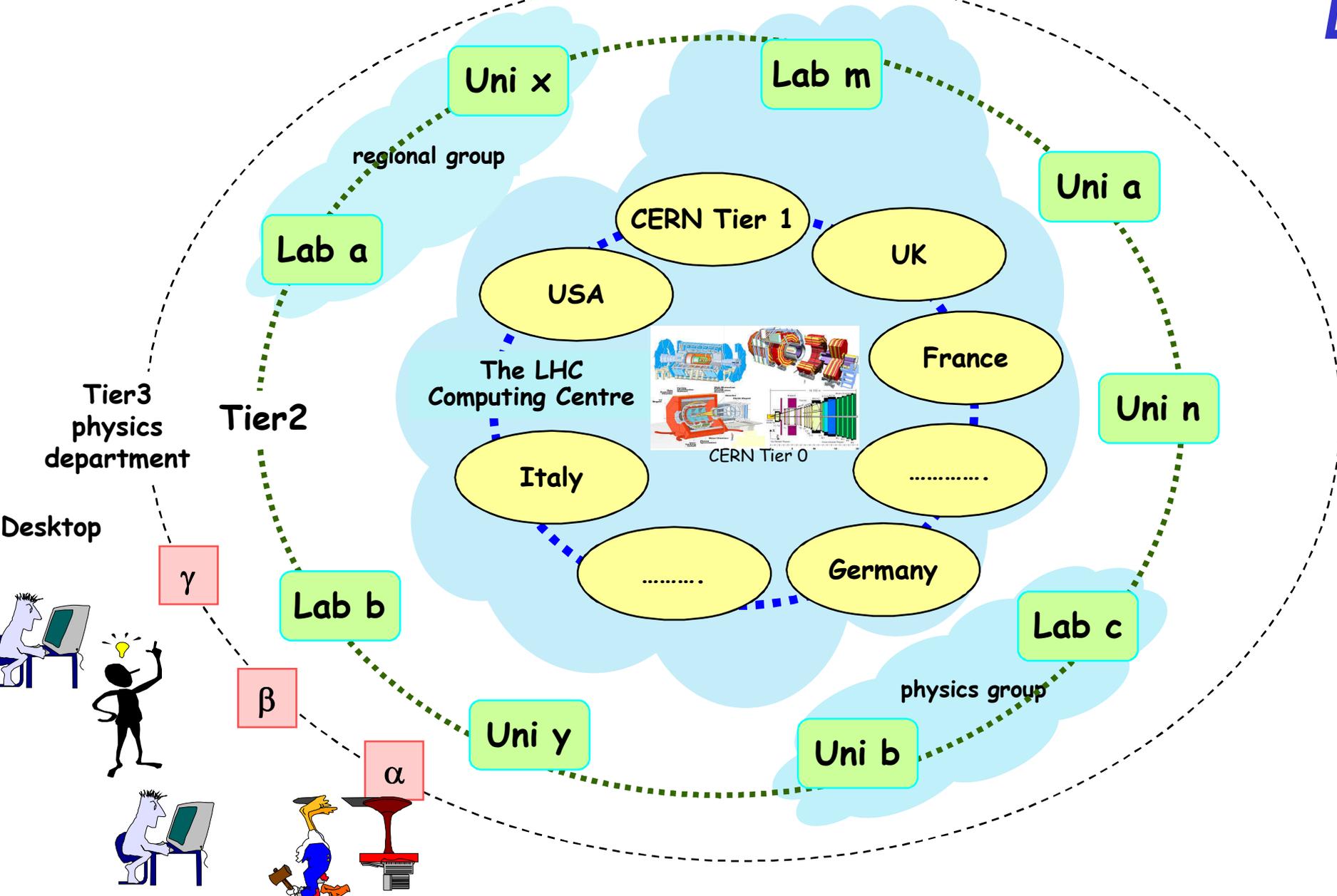
1500

Потоки данных и размер событий

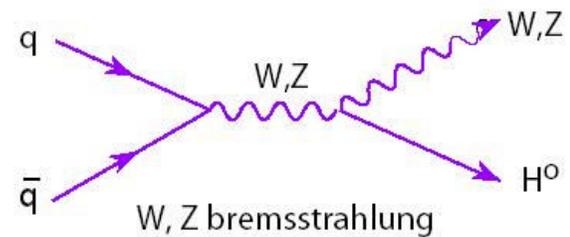
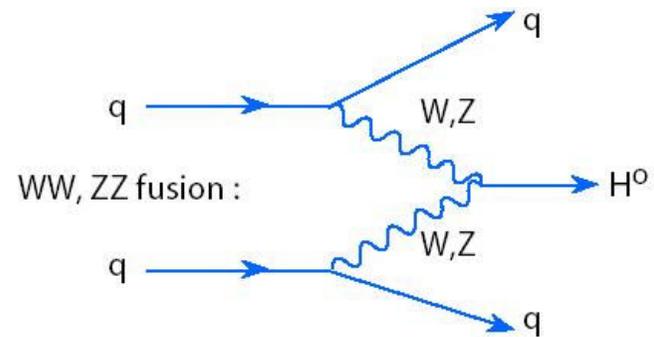
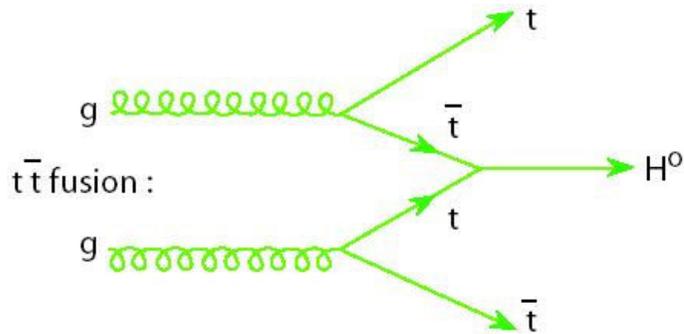
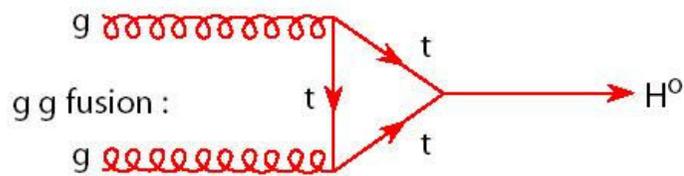


CMS data flow and on(off) line computing



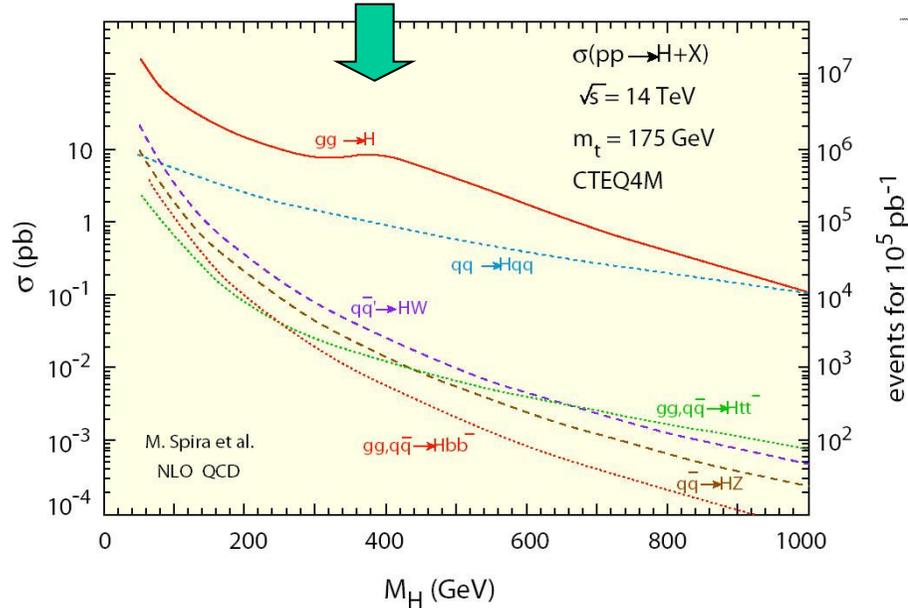


Возможности по открытию: бозон Хиггса

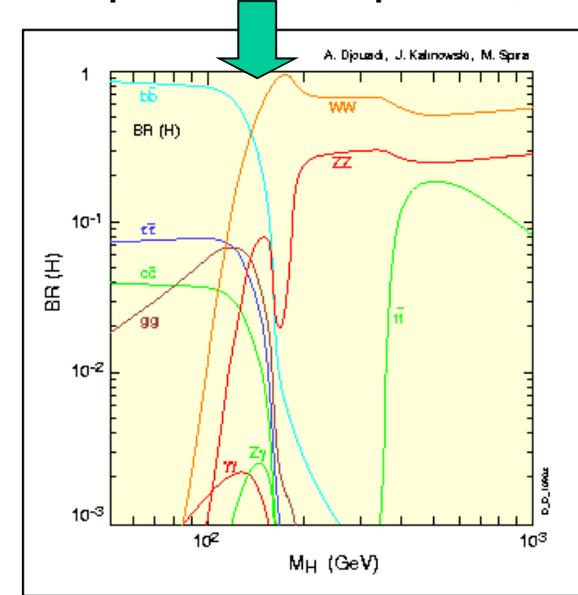


Ограничения на массу бозона Хиггса (LEP): $m_H \geq 114.1 \text{ GeV}$

Ожидаемые сечения рождения бозона Хиггса



Вероятности распада

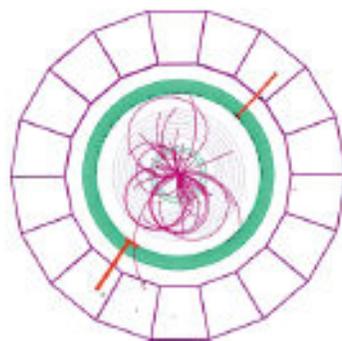
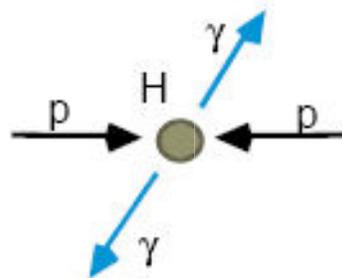


Бозон Хиггса Стандартной модели может быть обнаружен в распадах:

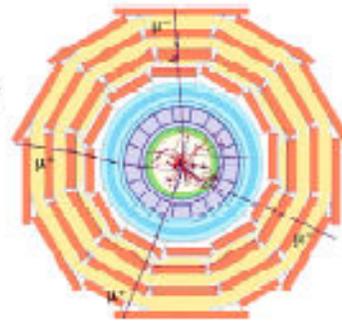
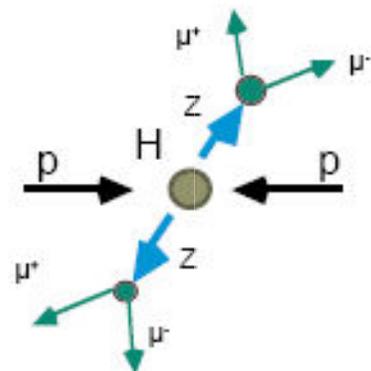
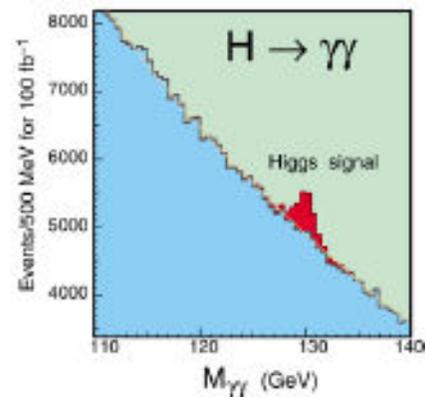
Массовый диапазон	Канал распада	Основной фон
$100 \text{ GeV} \leq m_H \leq 150 \text{ GeV}$	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$\gamma + \text{jet}$ ($\pi \rightarrow \gamma\gamma$)
$90 \text{ GeV} \leq m_H \leq 2 m_W \text{ GeV}$	$H \rightarrow b\bar{b}$ ($t\bar{t}H$)	КХД процессы $b\bar{b}$, сложности с отбором
$2 m_W \leq m_H \leq 300 \text{ GeV}$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	ZZ^* , $Z\gamma$, $t\bar{t}$, $Zb\bar{b}$
$m_H \approx 1 \text{ TeV}$	$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu + 2\text{jet}$ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l + 2\text{jet}$	очень чистый канал с небольшим фоном, но редкие события

Бозон Хиггса СМ может быть открыт в диапазоне масс до 1 ТэВ

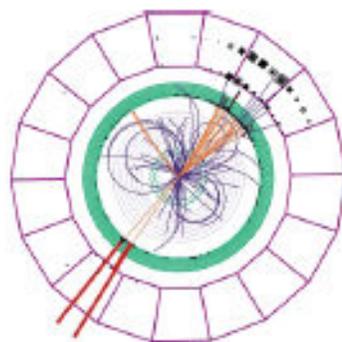
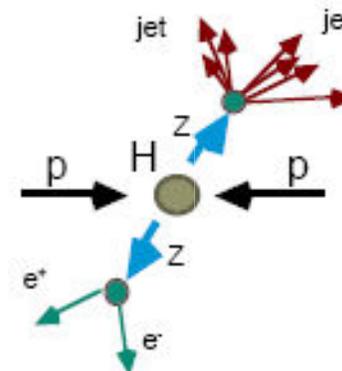
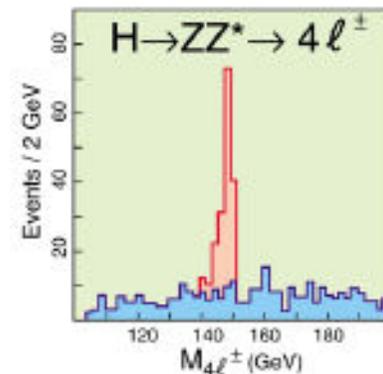
Ожидаемая картина (моделирование)



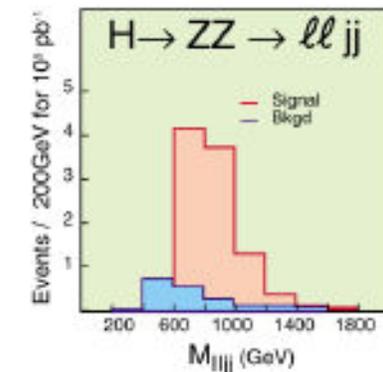
$M_{H_{\text{gg}}} = 100 \text{ GeV}$



$M_{H_{\text{gg}}} = 150 \text{ GeV}$



$M_{H_{\text{gg}}} = 800 \text{ GeV}$

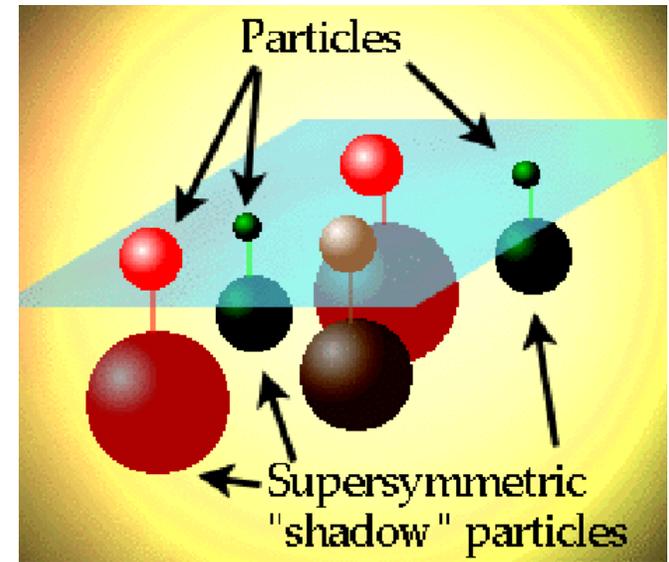


Возможности по открытию:
суперсимметрия

SUSY (симметрия бозон-фермион)

$$Q|boson\rangle = |\text{fermion}\rangle$$

$$Q|\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$$



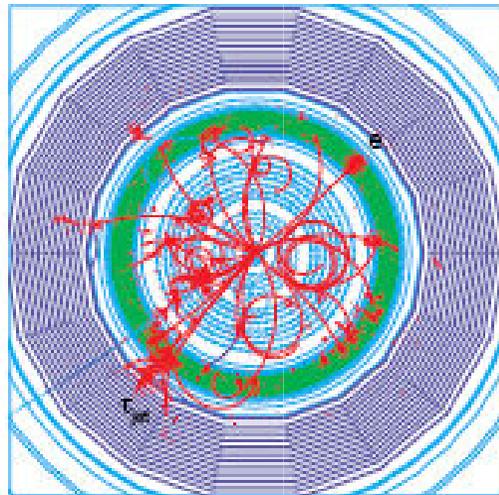
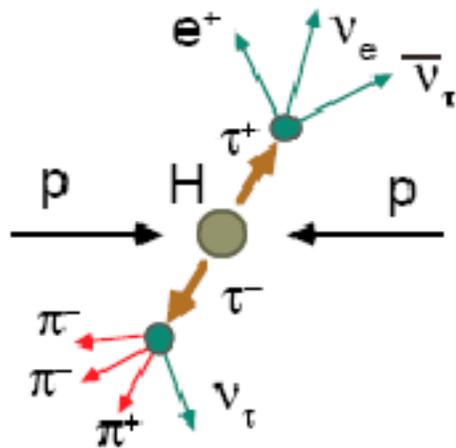
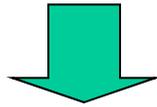
Новые частицы - суперпартнеры частиц Стандартной модели

Одна из возможных реализаций -
Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)

Хиггсы MSSM (h , H - нейтральный скаляр, A - neutral псевдоскаляр, H^\pm - заряженный скаляр) + суперпартнеры бозонов Хиггса

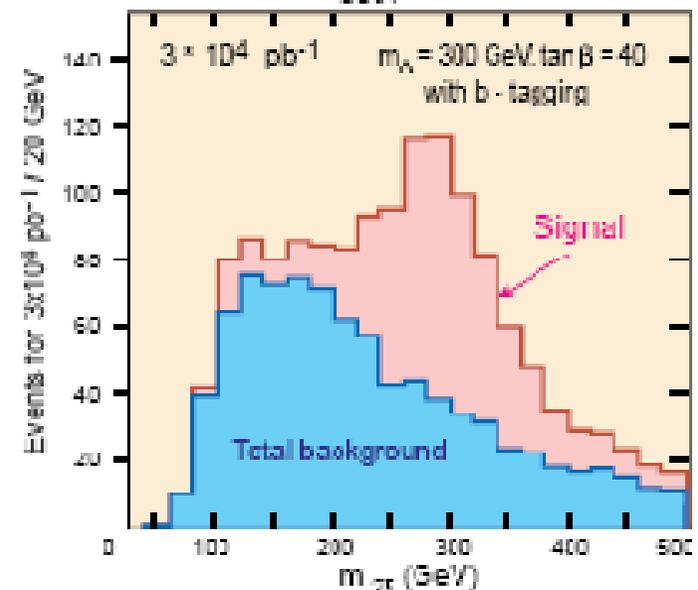
Бозоны Хиггса в $MSSM$ могут быть обнаружены

- по таким же каналам распада, как и бозон Хиггса SM
- по **новым** каналам распада на частицы SM



$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e + \tau_{jet}$ ("3-prong")

$\Delta^0, H^0, h^0 \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e/\mu + \tau_{jet} + E_{\tau}^{miss}$
in $b\bar{b}H_{SM}$ final states



- по **новым** каналам распада на **новые** частицы (не SM)

Резюме по бозону Хиггса

MSSM дает ограничения на массу легчайшего бозона Хиггса:

$$80 \text{ GeV} < m_h < 120 \text{ GeV}$$

при $m_t = 175 \text{ ГэВ}$



(помним об ограничении LEP: 114.1 ГэВ)

если мы не обнаружим легкого бозона Хиггса



не существует низкоэнергетической ($\sim \text{ТэВ}$) реализации варианта SUSY по крайней мере в минимальной варианте (MSSM)

Суперчастицы

“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: $\tilde{b}(\tilde{y})$	8 1 1	0 3 1	0 0 0
Matter L_i \square_i	sleptons $\begin{cases} \tilde{L}_i = (\tilde{\nu}, \tilde{e})_L \\ \tilde{\epsilon}_i = \tilde{e}_R \end{cases}$	leptons $\begin{cases} L_i = (\nu, e)_L \\ \epsilon_i = e_R \end{cases}$	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

Возможные массы частиц в MSSM

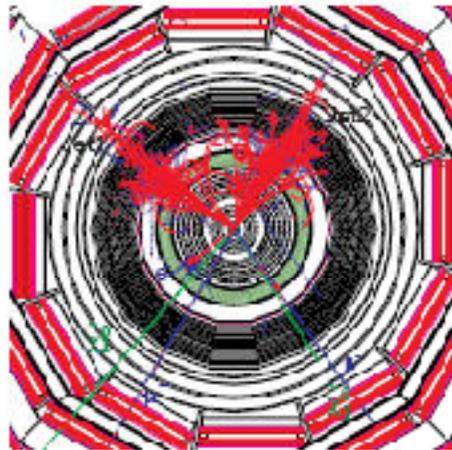
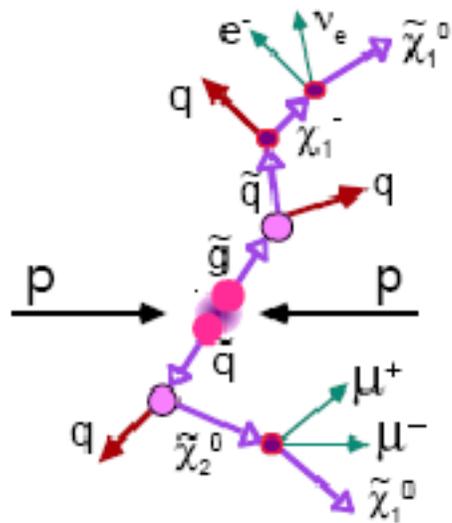
SUSY masses, GeV		
	low $\tan \beta$ (1.71)	high $\tan \beta$ (35)
h	95	119
H	1344	565
A	1340	565
H [±]	1344	571
$\tilde{\chi}_1^0(\tilde{b}), \tilde{\chi}_2^0(\tilde{w}^3)$	214,413	170,322
$\tilde{\chi}_3^0(\tilde{H}_1), \tilde{\chi}_4^0(\tilde{H}_2)$	1028,1016	481,498
$\tilde{\chi}_1^\pm(\tilde{w}^\pm), \tilde{\chi}_2^\pm(\tilde{H}^\pm)$	413,1026	322,499
\tilde{g}	1155	950
\tilde{e}_L, \tilde{e}_R	303,270	663,621
$\tilde{\nu}_L$	290	658
\tilde{t}_1, \tilde{t}_2	279,403	537,634
\tilde{q}_L, \tilde{q}_R	1028,936	1040,1010
\tilde{b}_1, \tilde{b}_2	953,1010	835,915
\tilde{t}_1, \tilde{t}_2	727,1017	735,906

	low $\tan \beta$	high $\tan \beta$
$\tan \beta$	1.71	35
m_0	200 GeV	600 GeV
$m_{1/2}$	500 GeV	400 GeV
$\mu(0)$	1084 GeV	-558
$A(0)$	0	0
μ_{GUT}^{-1}	24.8	
M_{GUT}	1.6×10^{16} GeV	

Каналы распада частиц MSSM

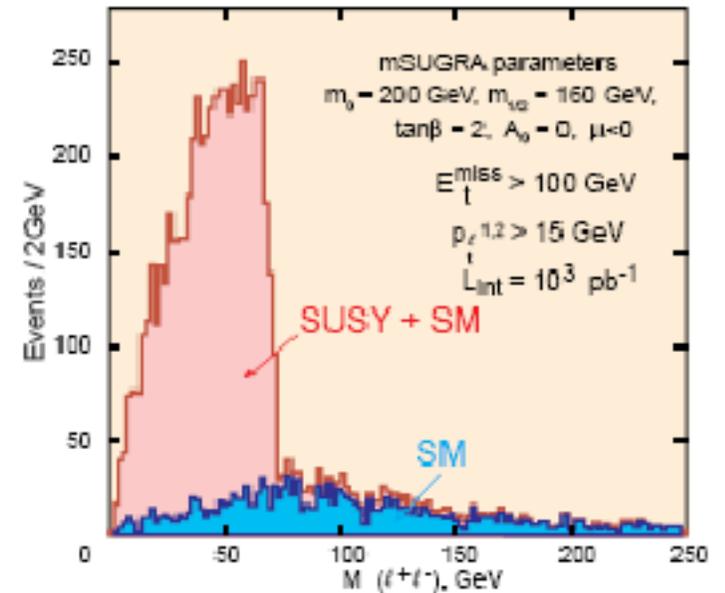
Sparticle	Decay mode	Observables
squarks	$\tilde{q}_{L,R} \rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0$	jet + photino
	$\tilde{q}_L \rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm$	jet + chargino
	$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{g}$	jet + gluino
	$\tilde{t}_1 \rightarrow c + \chi_1^0$	2 collinear jets + \cancel{E}_T
	$\tilde{t}_1 \rightarrow b + \chi_1^+$	2 b jets + 2 leptons + \cancel{E}_T
	$\tilde{t}_1 \rightarrow b + \chi_1^0 f f'$	4 jets + \cancel{E}_T
sleptons	$\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\chi}_i^0$	lepton + photino
	$\tilde{l}_L \rightarrow \nu_L + \tilde{\chi}_i^\pm$	neutrino + chargino
gluino	$\tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{\gamma}$	2 jets + photino
	$\tilde{g} \rightarrow g + \tilde{\gamma}$	jet + photino
chargino	$\tilde{\chi}_i^\pm \rightarrow e + \nu_e + \tilde{\chi}_i^0$	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)

Ожидаемая картина (моделирование)



SUSY event with
3 leptons + 2 Jets signature

Inclusive $\ell^+\ell^- + E_t^{\text{miss}}$ final states



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

Возможности по открытию:
ЭКЗОТИКА

Что ищем?

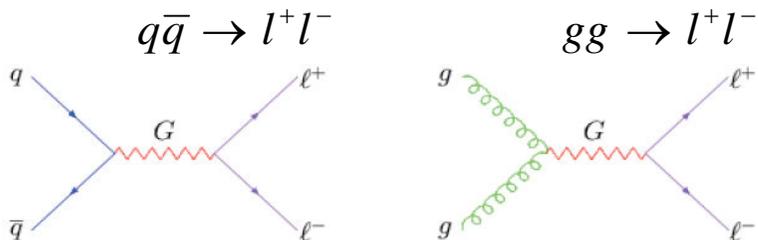
- Дополнительные измерения

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

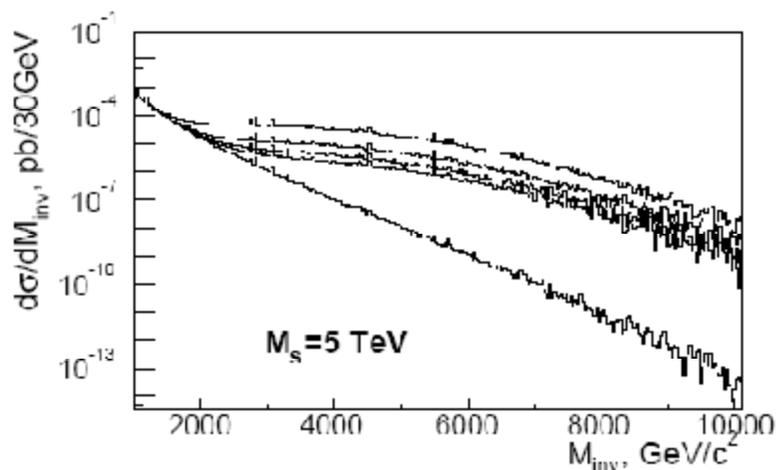
ADD Model

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

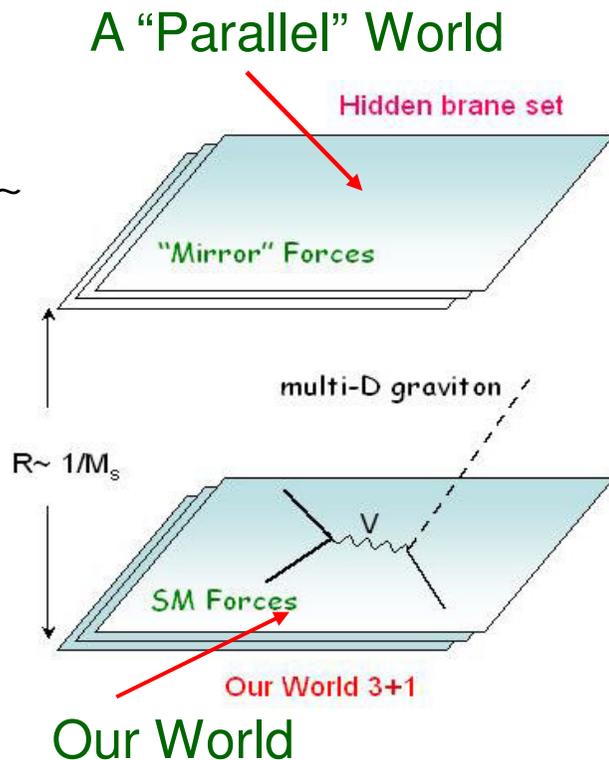
Вклад гравитонов в спектр части СМ
 (виртуальное рождение)



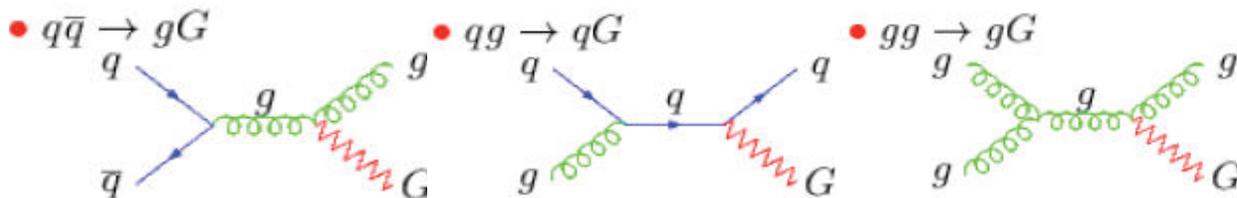
Превышение числа пар лептонов



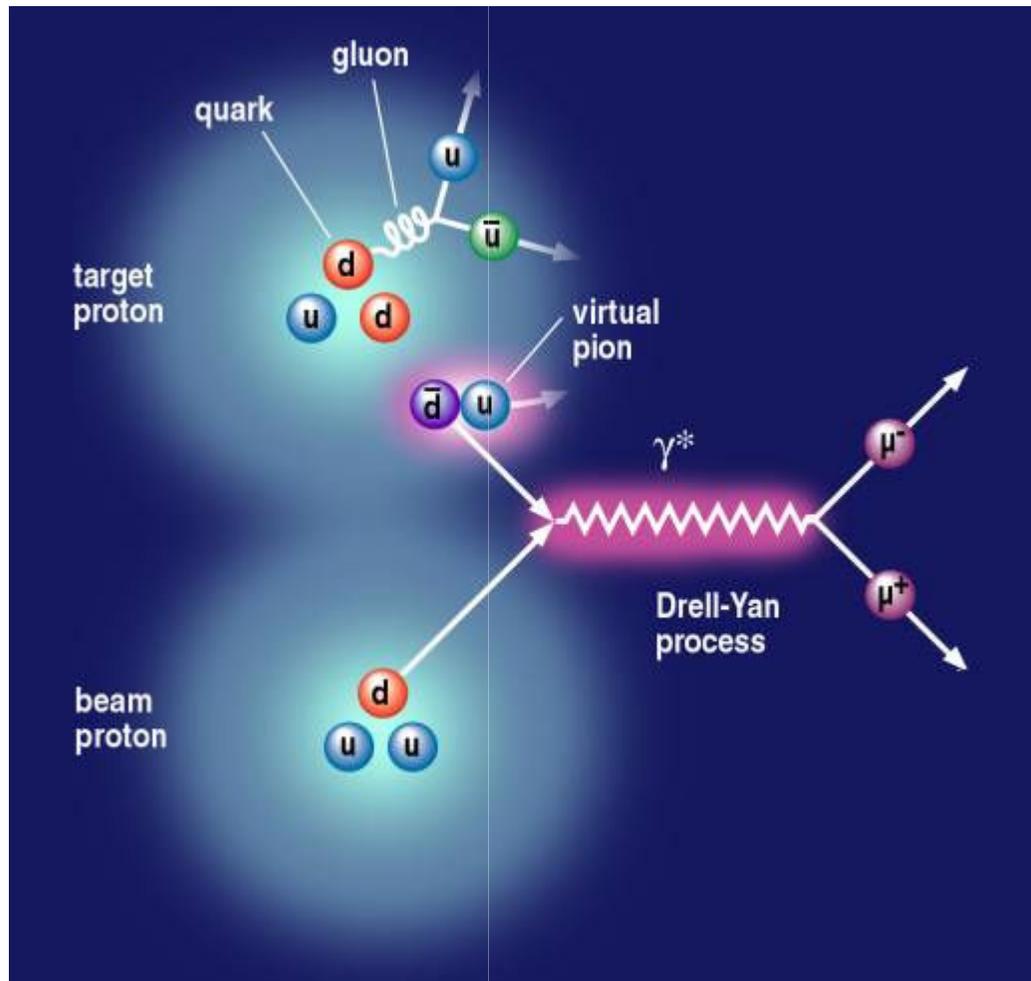
$$R \sim M^{-1} \left(\frac{M_{Pl}}{M} \right)^{2/n} \sim 10^{32/n} \times 10^{-17} \text{ sm}$$



Прямое рождение гравитонов



струи + недостающая E_T ,
 γ + недостающая E_T

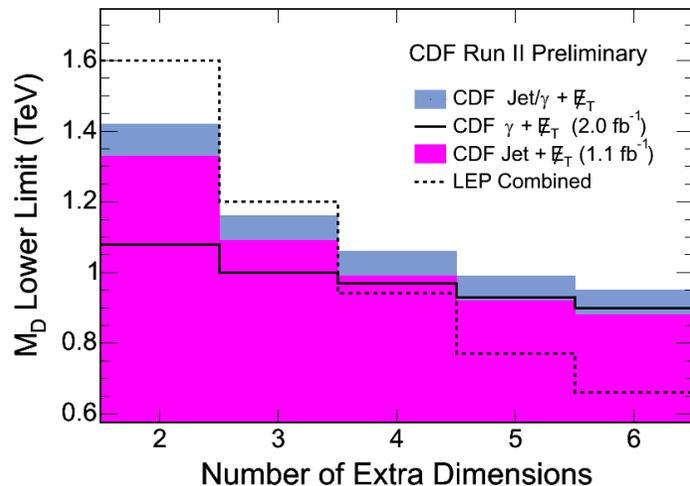


ADD: существующие ограничения

- из измерения гравитационного потенциала
случай $n = 1$ исключен проверкой закона Ньютона до $R < 0.19 \text{ mm}$
- из данных по суперновым звездам SN1987 (гравитационное излучение ускоряет остывание звезд): $M_D > 30 \text{ TeV}$ ($n = 2$) , 4 TeV ($n = 3$)
- из данных по диффузному гамма-фону $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$:
 $M_D > 110 \text{ TeV}$ ($n = 2$) , 5 TeV ($n = 3$)

PRL 101:181602 (2008)

PRL 97:171802 (2006)

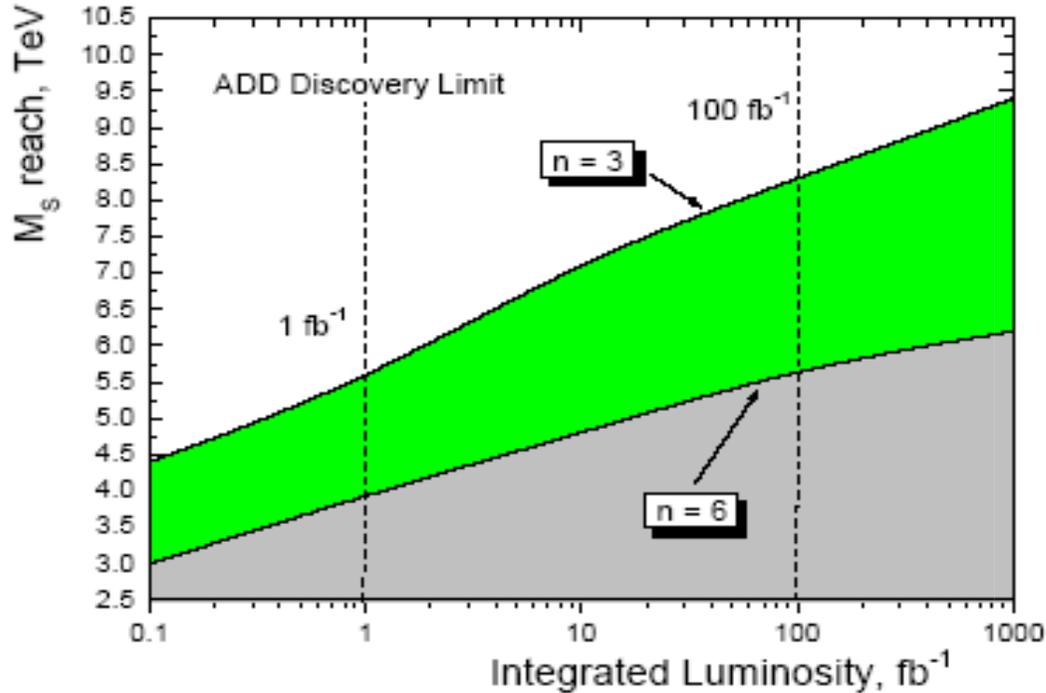


CDF RunII Preliminary, Jet/ γ + E_T		
N LED	σ_{obs}^{95} fb	M_D^{obs} GeV
2	26.3	1420
3	38.7	1160
4	46.9	1060
5	52.7	990
6	56.7	950

R (mm)
$< 3.5 \times 10^{-1}$
$< 3.6 \times 10^{-6}$
$< 1.1 \times 10^{-8}$
$< 3.5 \times 10^{-10}$
$< 3.4 \times 10^{-11}$

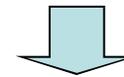
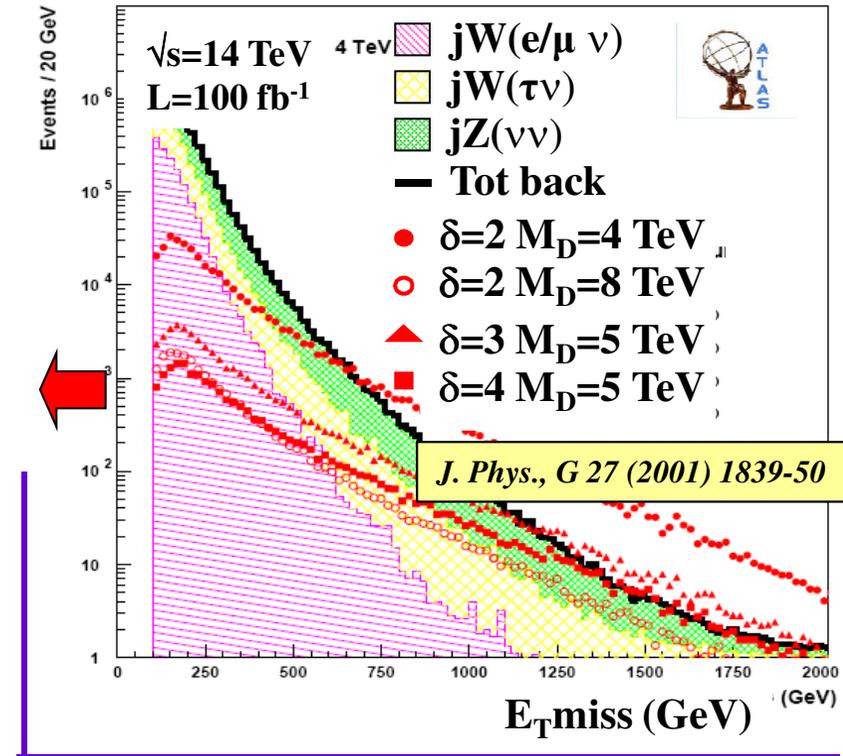
Ожидания LHC

Виртуальное рождение гравитонов



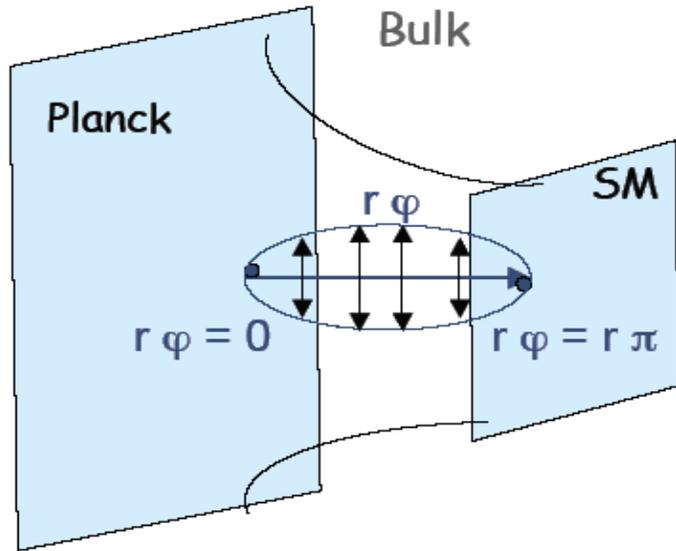
1 fb ⁻¹ :	3.9-5.5 TeV for n=6..3
10 fb ⁻¹ :	4.8-7.2 TeV for n=6..3
100 fb ⁻¹ :	5.7-8.3 TeV for n=6..3
300 fb ⁻¹ :	5.9-8.8 TeV for n=6..3

Прямое рождение гравитонов

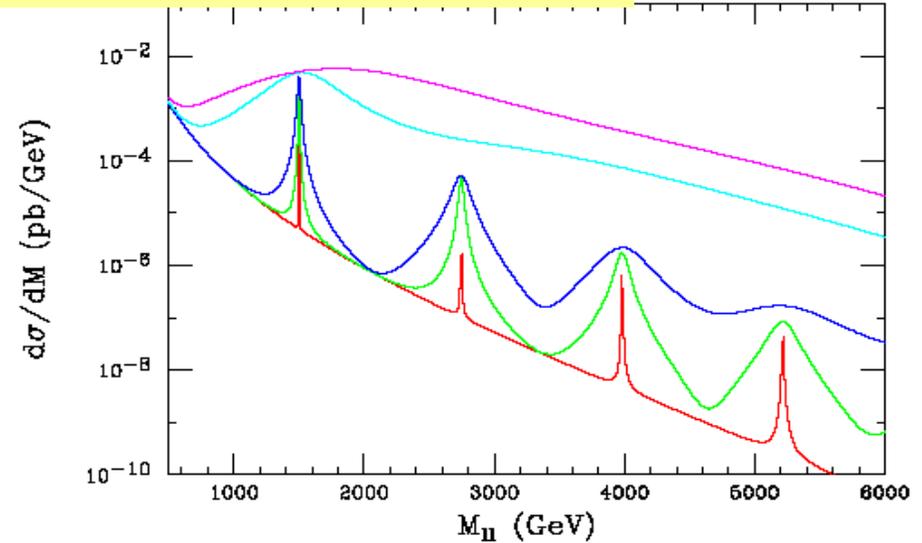


$M_D = 7.7, 6.2, 5.2$ TeV
for $n = 2, 3, 4$

RS1 Model



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



5D пространство с кривизной
две 3(brane)+1(дополнительное) +
время!

Предсказывает существование
гравитонного состояния ($s=2$)

Сигнал:

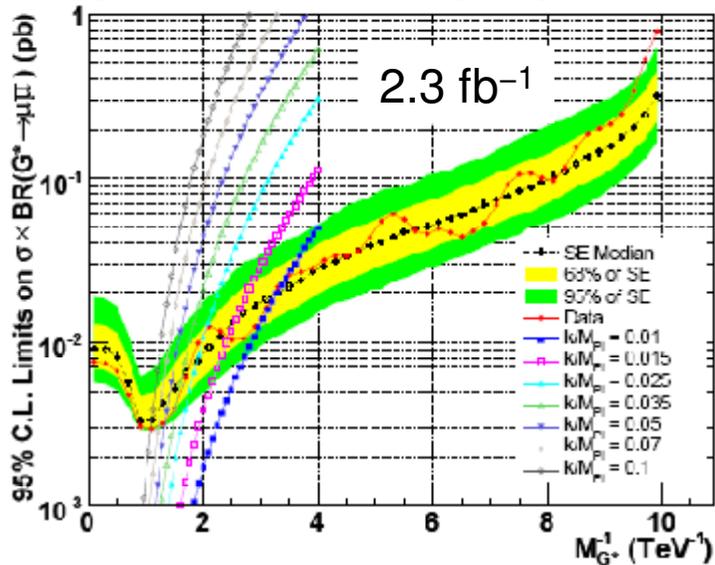
Узкие массивные резонансы в спектрах
пар ситруй, лептонов, фотонов

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

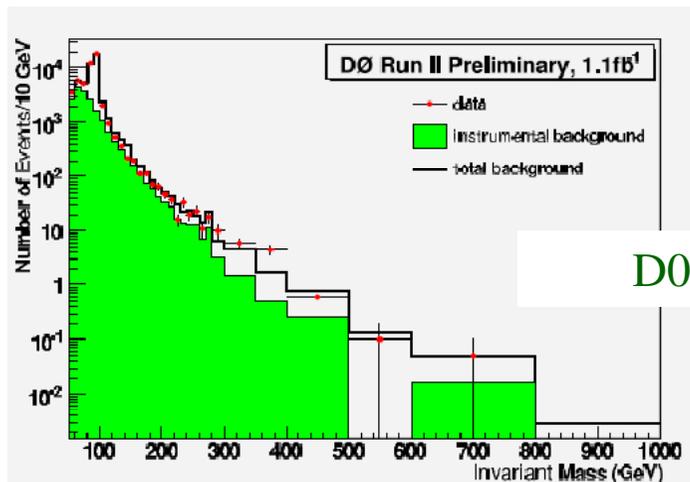
RS1: существующие ограничения

CDF: PRL 102, 091805 (2009)

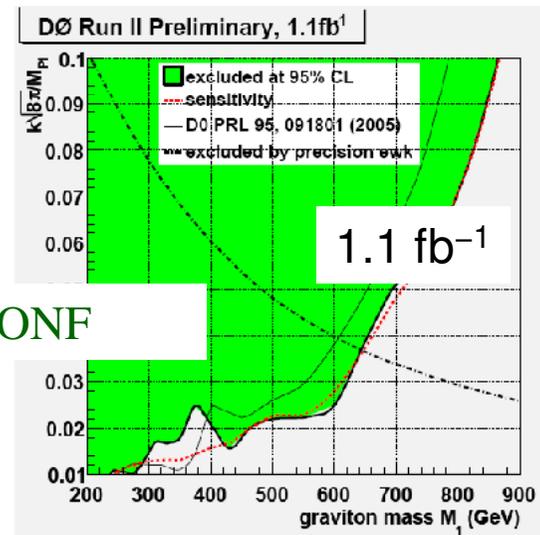
http://www-cdf.fnal.gov/physics/exotic/r2a/20081021.dimuon_resonance/



Z' model	Z' mass limit	RS graviton k/M_{Planck}	graviton mass limit
Z'_I	789	0.01	293
Z'_{sec}	821	0.015	409
Z'_N	861	0.025	493
Z'_ψ	878	0.035	651
Z'_χ	892	0.05	746
Z'_η	982	0.07	824
Z'_{SM}	1030	0.1	921

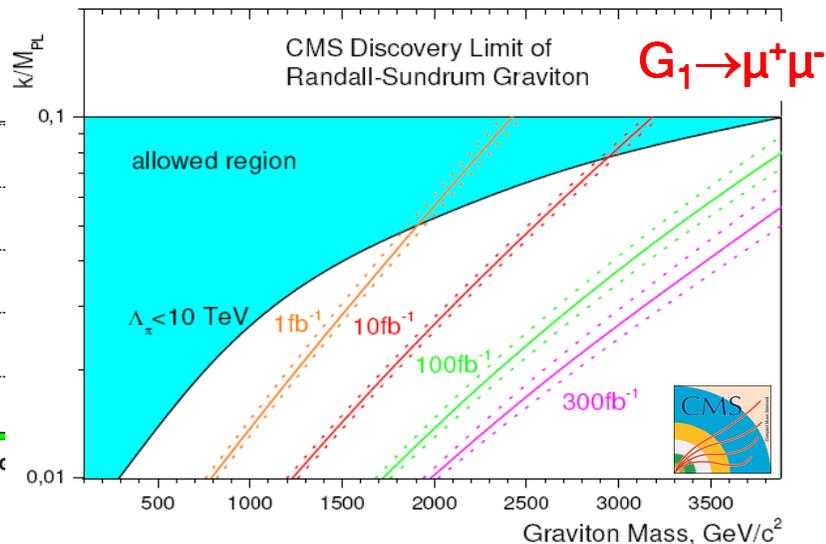
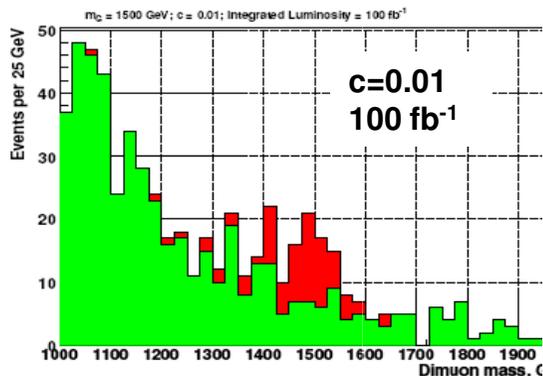
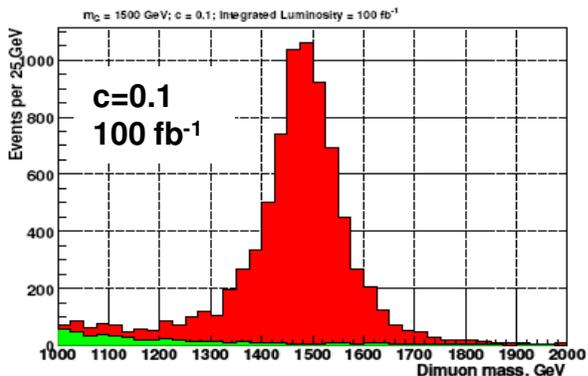


D0: D0note 5195-CONF



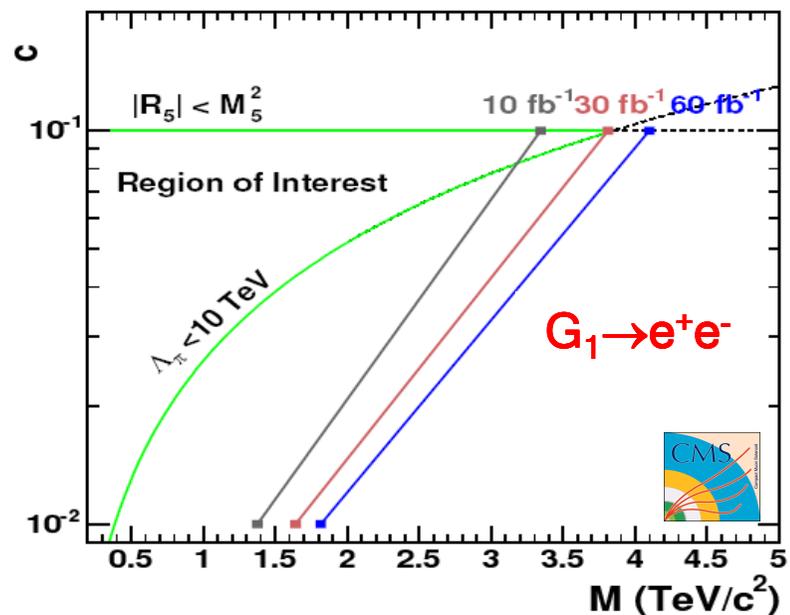
RS1: что ожидается на LHC?

Спектр пар лептонов



Многие другие модели предсказывают подобные сигналы и имеют примерно такой же предел открываемости по массе

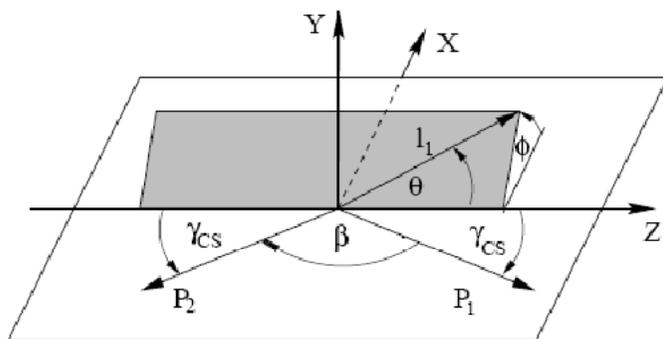
Как можно их разделить?



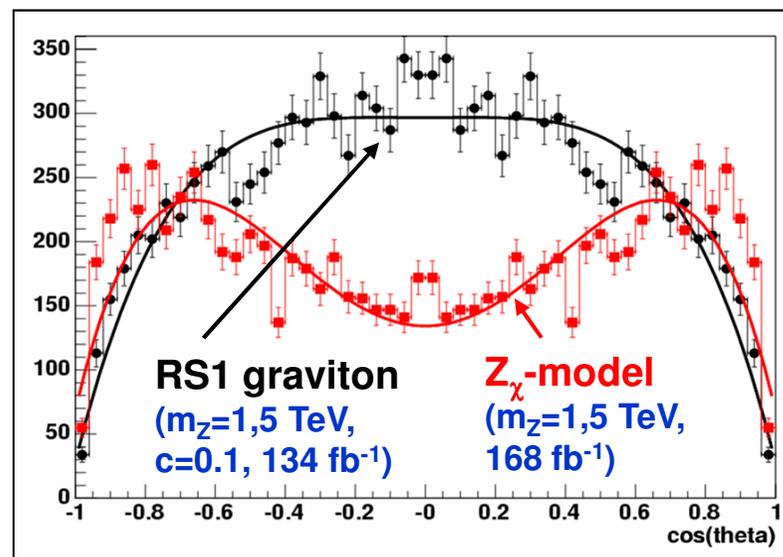
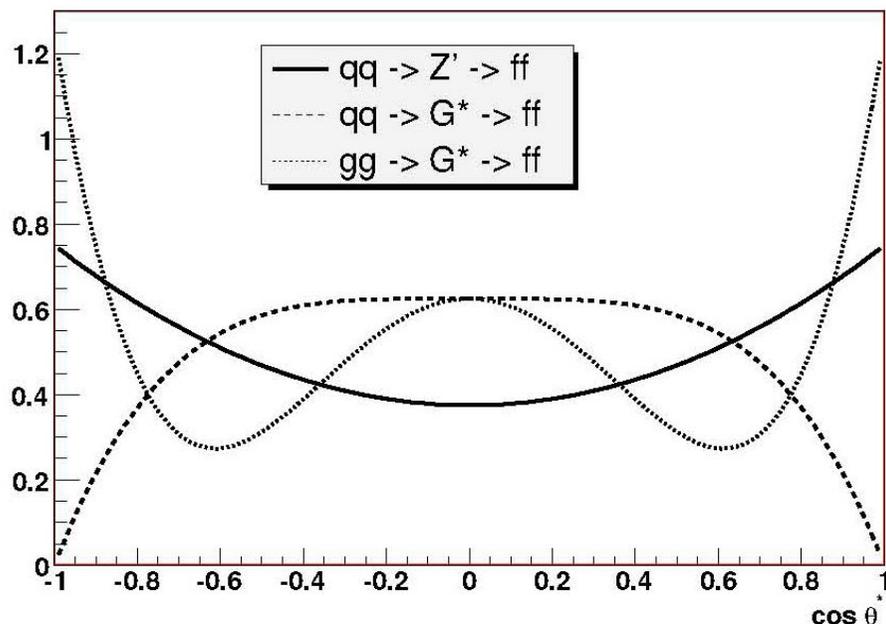
Разделение состояний со Spin=1 и Spin=2

Spin-1 States: дополнительный калибровочный бозон Z' , возбужденное состояние Z_{KK}

Spin-2 States: RS1-гравитон



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$	$P_q = \frac{5}{8} (1 - 3 \cos^2 \theta^* + 4 \cos^4 \theta^*)$
$gg \rightarrow G^* \rightarrow f\bar{f}$	$ 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$	$P_1 = \frac{3}{8} (1 + \cos^2 \theta^*)$



Резюме по Экзотике

Эксперименты на LHC способны обнаружить сигналы от "новой" физики: новые объекты с массами до нескольких ТэВ или события с потерянной энергией до ТэВ

Возможности по открытию:
кварк-глюонная плазма

Asymptotic Freedom



Gross



Politzer

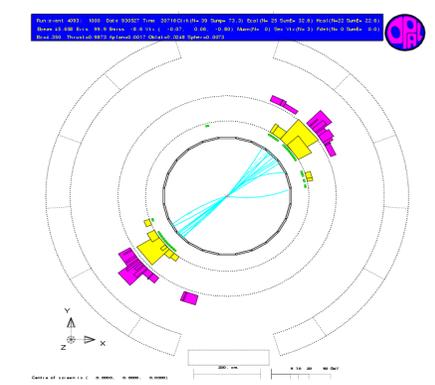
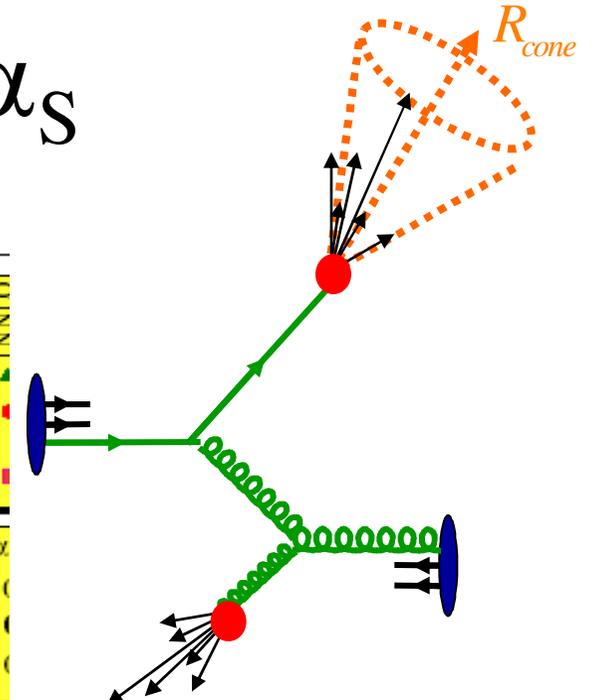
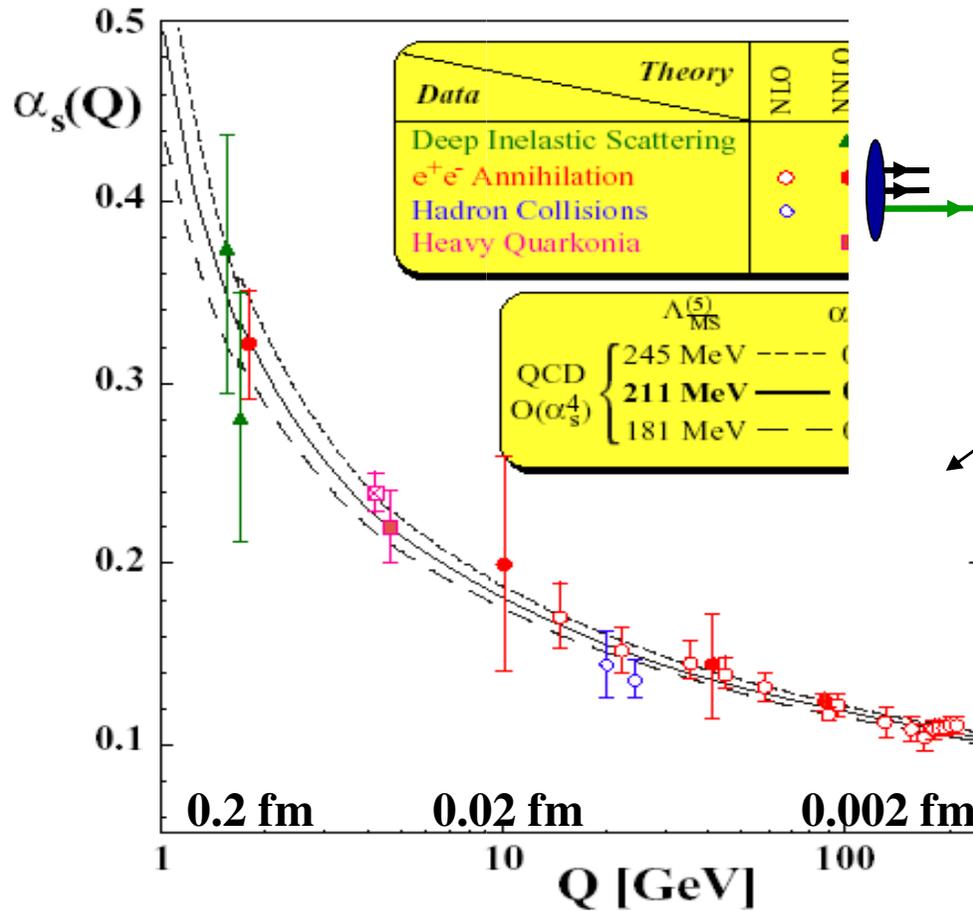
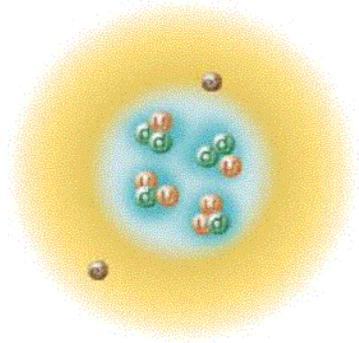
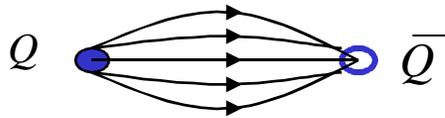


Wilczek



Бегущая α_s

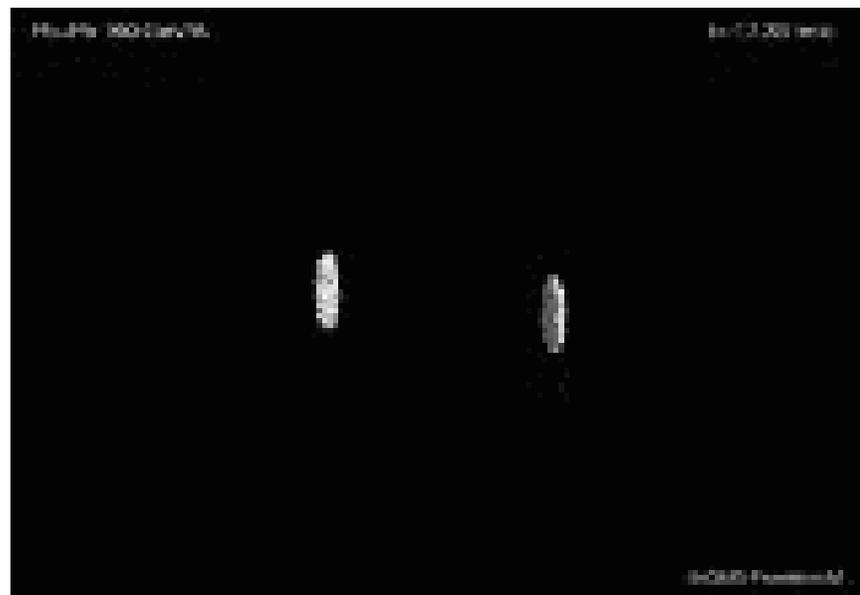
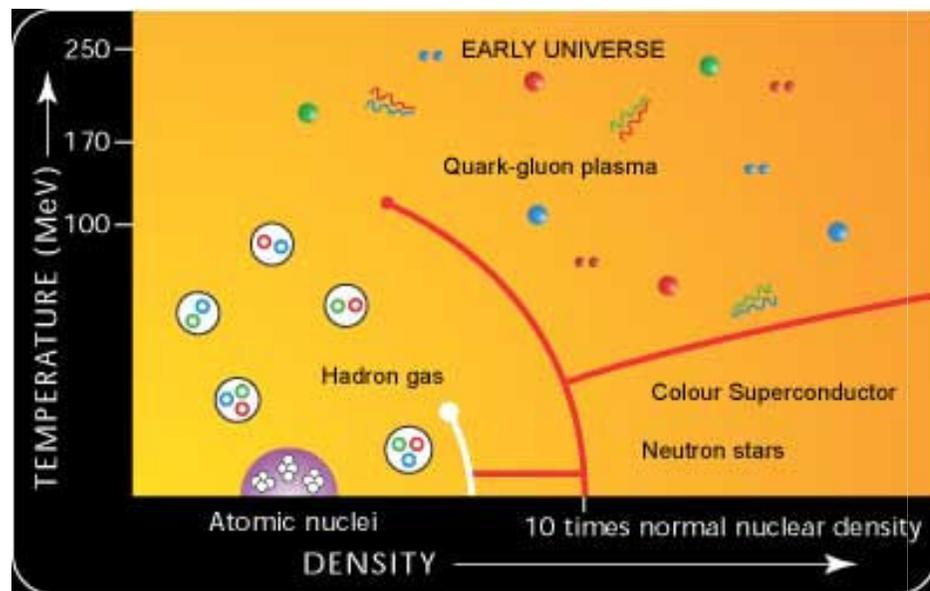
Confinement



Кварк-глюонная плазма

полностью равновесная система свободных кварков и глюонов
(при высоких температурах/плотностях энергии среды)

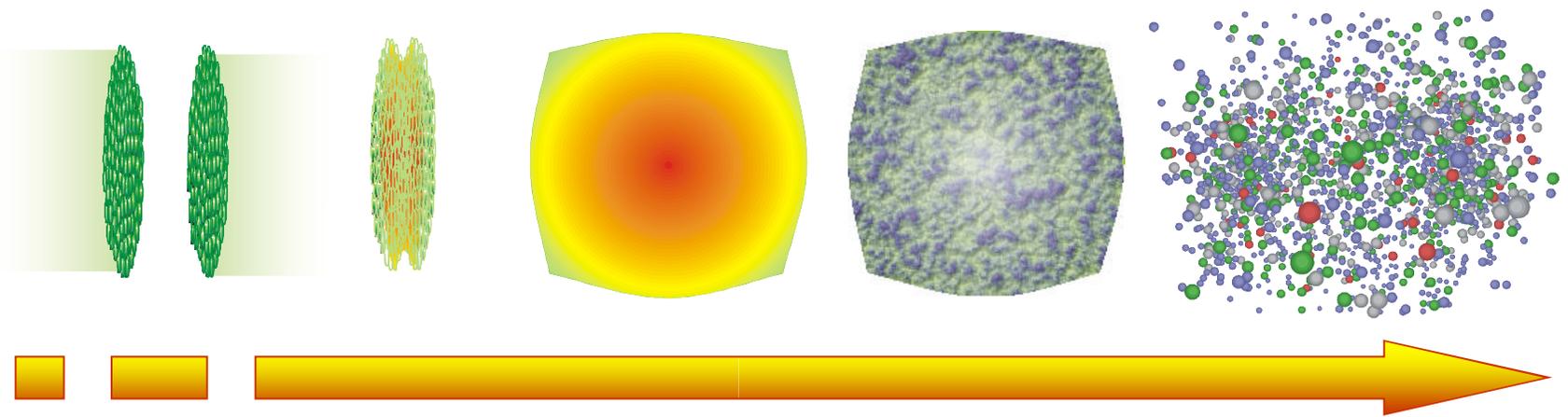
- термальное равновесие ($p_x = p_y = p_z$)
- химическое равновесие (соотношение числа кварков и глюонов не изменяется во времени)



Точка фазового перехода: $T \sim 170 \text{ МэВ}$ $\varepsilon \sim 1.0 \text{ ГэВ/фм}^3$

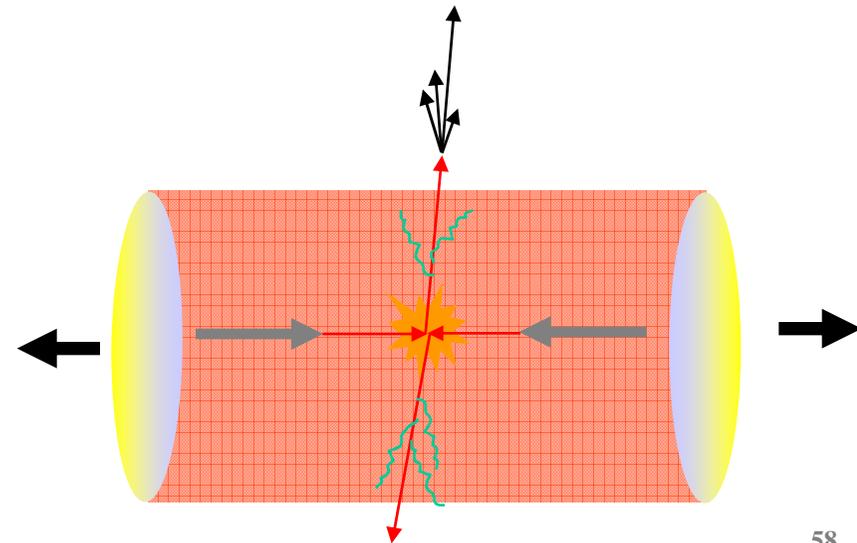
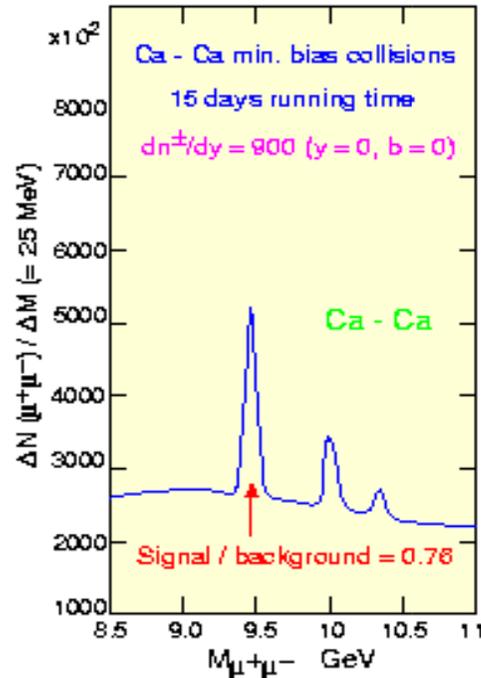
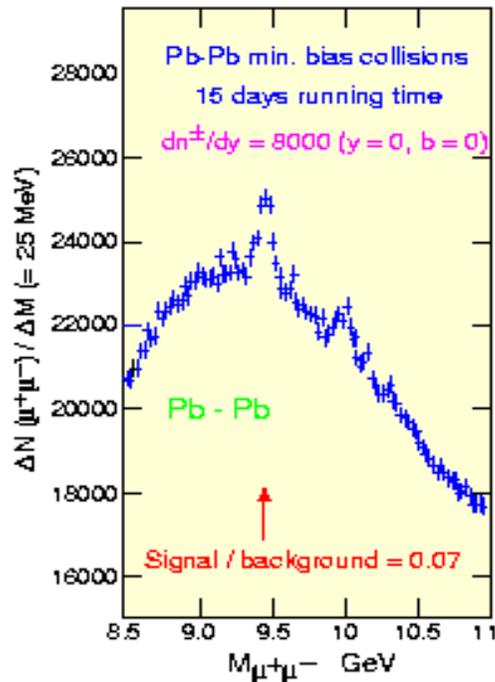
Поиск и изучение свойств КГП в столкновениях ультрарелятивистских ядер

В релятивистских соударениях тяжелых ионов возможно формирование сверхплотного состояния КХД-материи в квазимакроскопических объемах (по сравнению с характерными адронными масштабами).



Сигналы кварк-глюонной плазмы

Подавление (плавление) тяжелых резонансов: J/ψ (с анти-с)-пара и Υ (b анти-b)-пара



Подавление вероятности рождения струй

ГОТОВНОСТЬ К ДЕТЕКТОРОВ
работе

10 Sep, 9:50 Первое событие на LHC (splash-event)

Run 62063, Event 1534, Orbit 9563911, BX 655

5.1 / 0.6 fps

Run # 62063, event # 1534

mzanetti@fuval-C2F11-20: /nfshome0 CMSSW Visualisation - [CMSSW (3D) daqshift@SCX5SCR26:/tmp

Applications Actions Wed Sep 10, 10:15 AM

Updated by Roberto Saban

10 Sep 2008 09:38

Event	Shortcuts
Init Event Processor	
Reinit Event Processor	
Next Event	Ctrl+N
Previous Event	Ctrl+P
Auto Events	Ctrl+A
Goto Event...	Ctrl+G
Rewind	Ctrl+R
Skip...	
Auto Print	

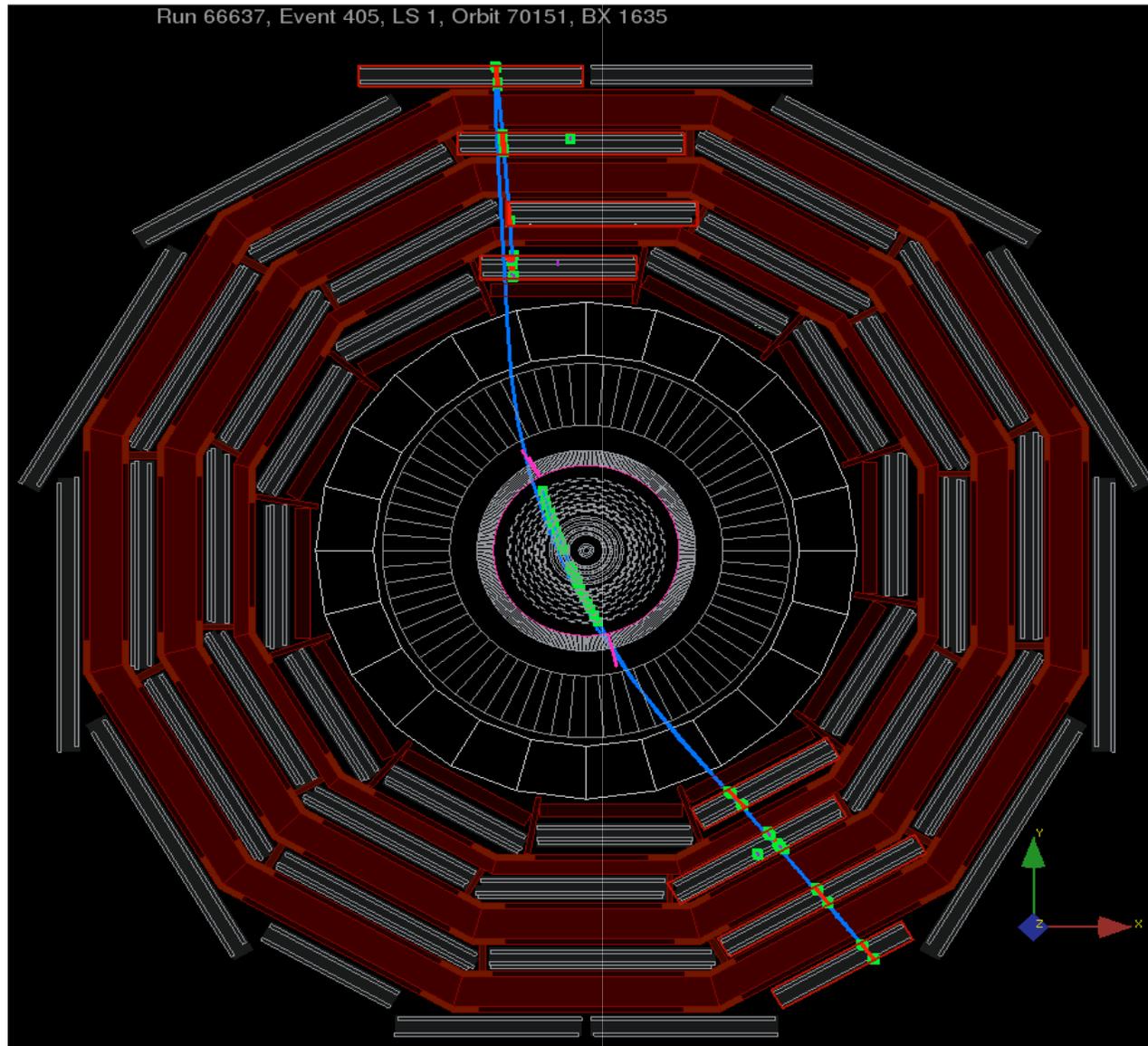
POINT 1 Atlas
POINT 2 Alice
POINT 3 Momentum Cleaning
POINT 4 RF
POINT 5 CMS
POINT 6 Dump
POINT 7 Betatron Cleaning
POINT 8 LHCb

Sector 45, Sector 58, Sector 01, Sector 19, Sector 08, Sector 12, Sector 23, Sector 34

Beam 1, Beam 2

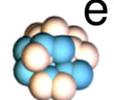
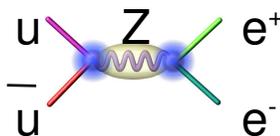
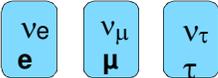
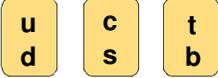
T12, T18

Космический мюон в CMS



Дополнительные
слайды

Short history and new frontiers

	10^{-10} m	≤ 10 eV	>300000 Y	1900....	Quantum Mechanics Atomic Physics
				1940-50	Quantum Electro Dynamics
	10^{-15} m	MeV - GeV	≈ 3 min	1950-65	Nuclei, Hadrons Symmetries, Field theories
	10^{-16} m	\gg GeV	$\approx 10^{-6}$ sec	1965-75	Quarks. Gauge theories
	10^{-18} m	≈ 100 GeV	$\approx 10^{-10}$ sec	1970-83 SPS	ElectroWeak Unification, QCD
<div data-bbox="134 825 576 1063" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>6 Leptons </p> <p>6 Quarks </p> <p>3 "Colors" each quark </p> </div>				1990 LEP	3 families
				1994 Tevatron	Top quark
Origin of masses The next step...	10^{-19} m	$\approx 10^3$ GeV	$\approx 10^{-12}$ sec	2005 LHC	Higgs ? Supersymmetry ?
Proton Decay ?	10^{-32} m	$\approx 10^{16}$ GeV	$\approx 10^{-32}$ sec	Underground Labs	GRAND Unified Theories ?
The Origin of the Universe	10^{-35} m	$\approx 10^{19}$ GeV (Planck scale)	$\approx 10^{-43}$ sec	??	Quantum Gravity? Superstrings ?

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

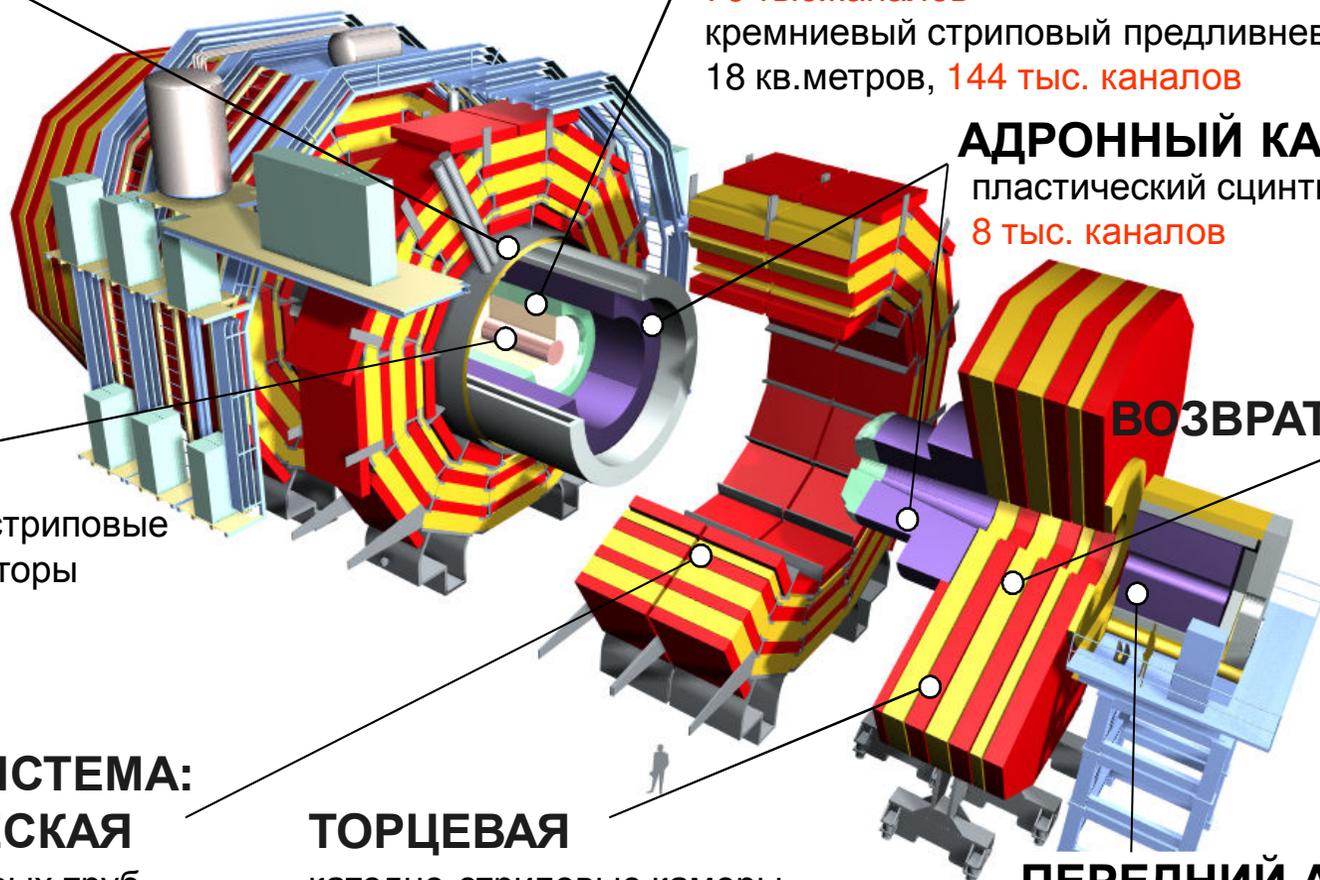
Резистивные планарные камеры для триггера - RPC - 760 камер

ТОРЦЕВАЯ

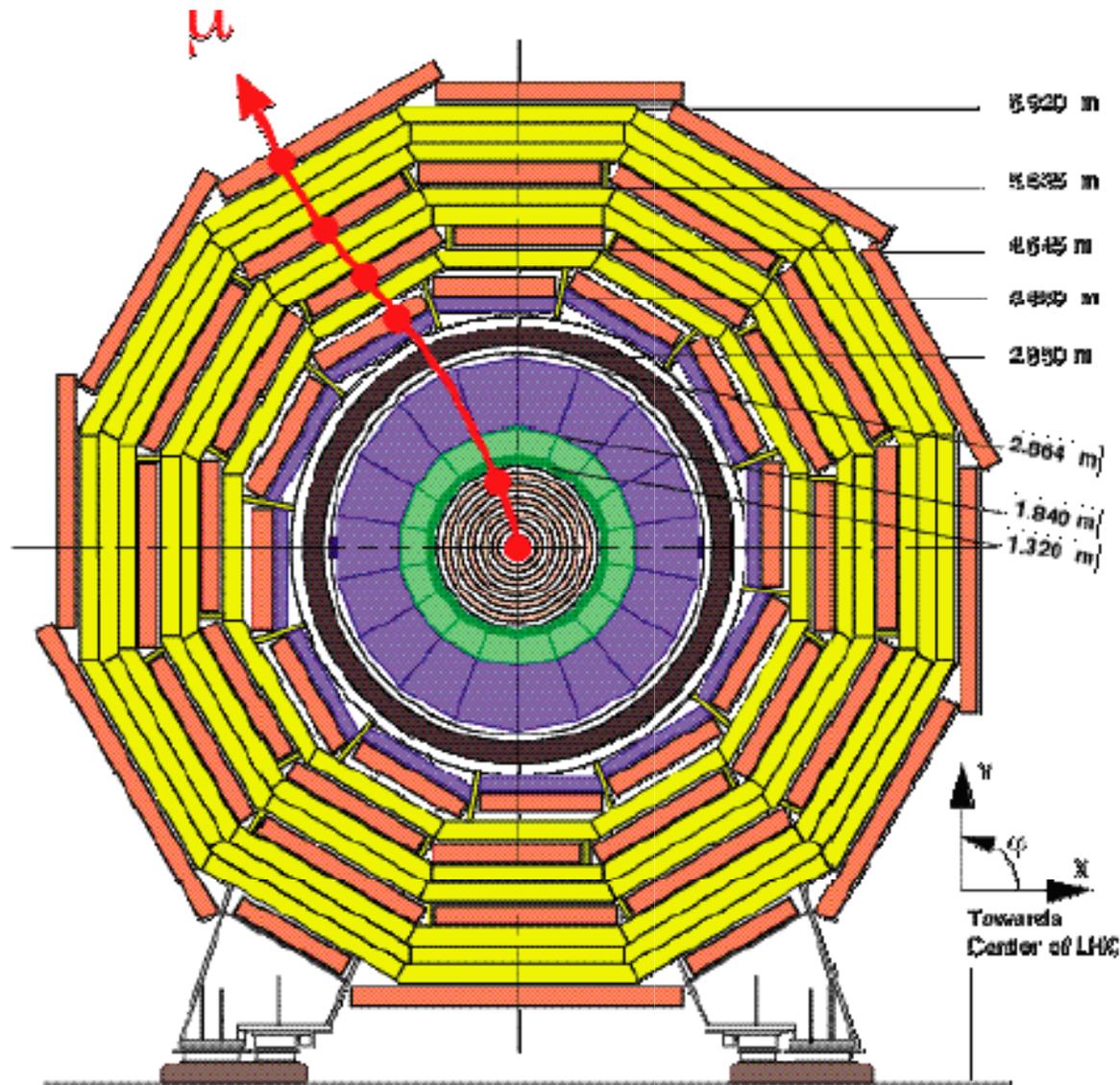
катодно-стриповые камеры
540 камер
310 тыс. каналов

ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

кварцевое волокно/железо
2 тыс. каналов



Поперечный разрез детектора CMS



Transverse View

CMS-TR-00079

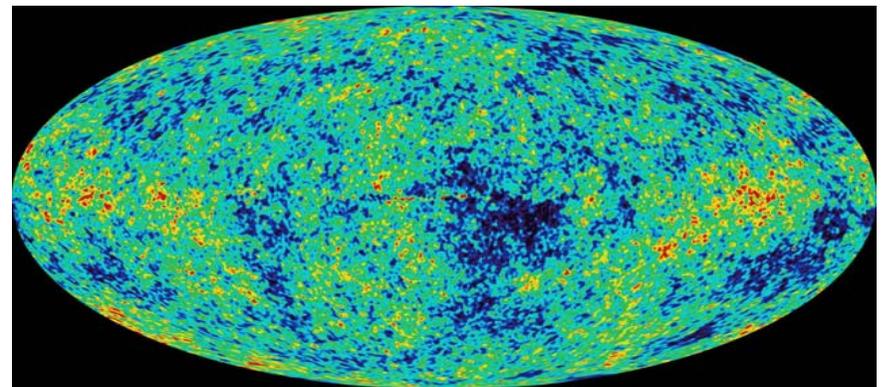
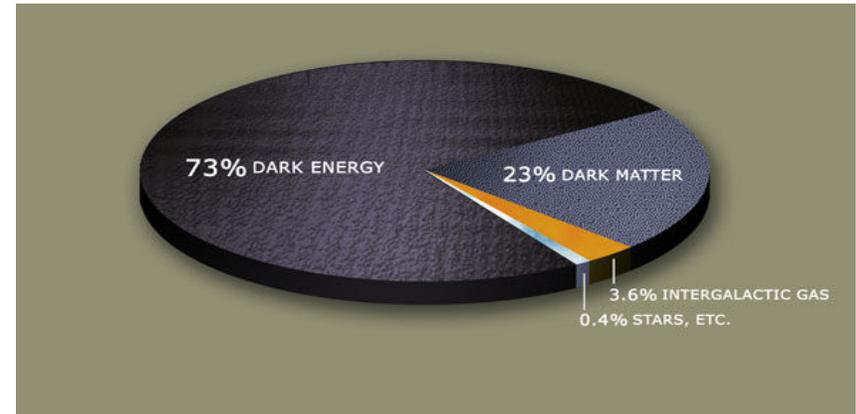
Мотивация 3: “открытые” вопросы СМ?

- ❑ Свободные параметры (константы, число поколений и пр.) не могут быть зафиксированы самой СМ
- ❑ Проблема иерархии - большой разрыв между масштабом электрослабых взаимодействий (10^3 GeV) и масштабом Великого объединения (10^{16} GeV) scales
- ❑ СМ не описывает гравитацию
- ❑ СМ не решает космологические проблемы (как и почему была образована Вселенная, ее эволюцию и пр.)



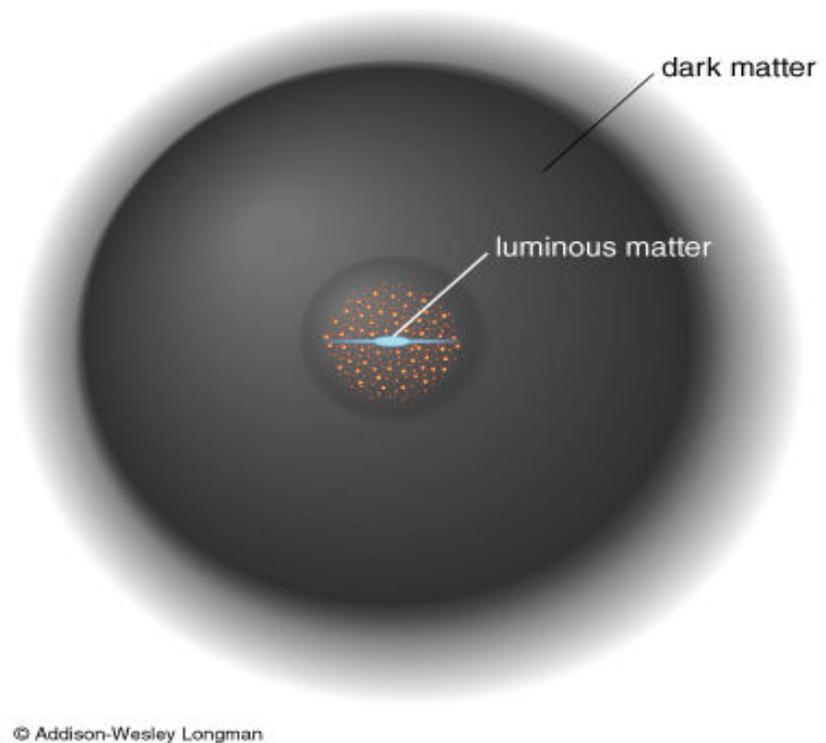
The search for Dark Matter

- **Cosmology requires the existence of dark matter**
- **How do we know this?**
 - Galactic rotation curves
 - Collision of cluster galaxies
 - Cosmic microwave background temperature fluctuations



What is Dark Matter?

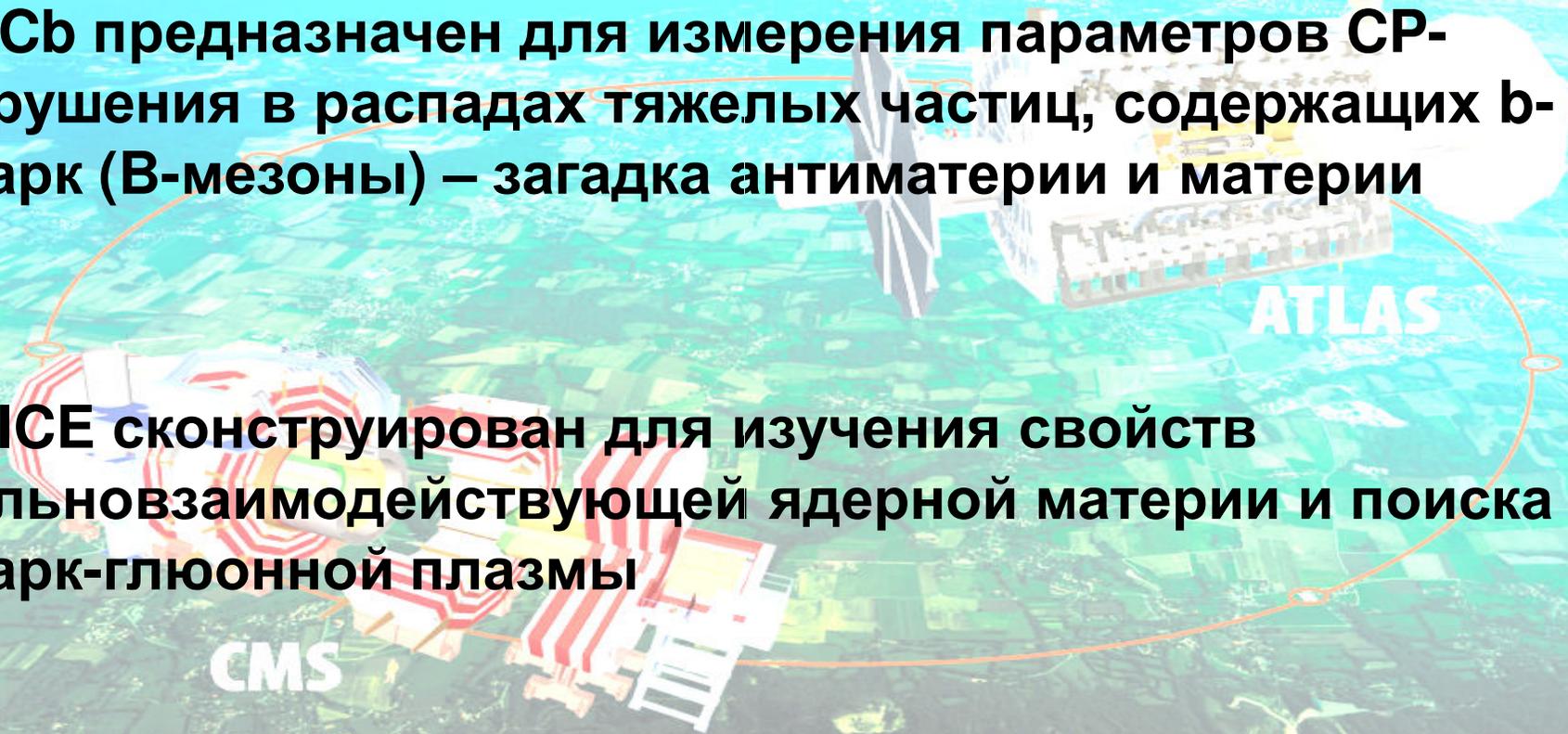
- **Properties of simplest Dark Matter**
 - Must be stable (have immutable qualities)
 - Density 1 particle per hand
 - Z_2 charge invariance with an odd charge
 - R-parity
- **Possible Candidates**
 - Lightest Supersymmetric Particle (LSP)
 - Lightest Kaluza-Klein
 - Technibaryons
 - Singlet Fermion
 - Gravitons
 - WIMP



ATLAS и CMS – многоцелевые экспериментальные установки, нацеленные на решение всего спектра физических задач LHC

LHCb предназначен для измерения параметров CP-нарушения в распадах тяжелых частиц, содержащих b-кварк (B-мезоны) – загадка антиматерии и материи

ALICE сконструирован для изучения свойств сильновзаимодействующей ядерной материи и поиска кварк-глюонной плазмы



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)

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_L lightest neutrino*	(0-0.13)×10 ⁻⁹	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	(0.009-0.13)×10 ⁻⁹	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	(0.04-0.14)×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 $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ 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 $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ 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 , labeled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_L , ν_M , and ν_H 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 $\eta_c = c\bar{c}$ 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.

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

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

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.39	-1			
W^+	80.39	+1			
Z^0 Z boson	91.188	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 π^+ (u \bar{d}), kaon K^+ (s \bar{u}), B^0 (d \bar{b}), and η_c (c \bar{c}). Their charges are +1, -1, 0, 0 respectively.

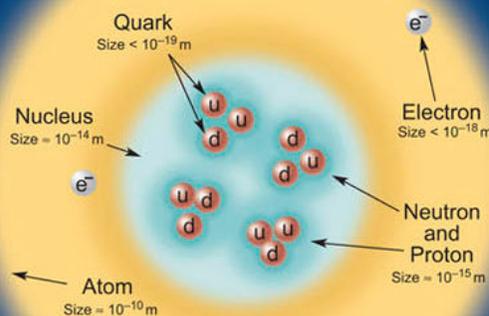
Visit the award-winning web feature [The Particle Adventure at ParticleAdventure.org](http://TheParticleAdventure.org)

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

©2006 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see

CPEPweb.org

Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

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 (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	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 $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

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?