



# Физика элементарных частиц и Большой адронный коллайдер – материя, силы, симметрии

Владимир Шевченко

*Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»*

Гинзбурговская лекция по физике  
5 октября 2012 года, Москва

.

В презентации использованы материалы коллабораций **ATLAS**, **CMS**, **LHCb** и **ALICE**, материалы групп SKMfitter и Ufit, материалы из презентаций и лекций **А.И.Голутвина**, **G.Dissertori**, **T.Nakada**, **R.Forty**, **V.Gibson**, публичные материалы с сайтов коллабораций и с сайта ЦЕРН

**<http://cern.ch>**

## Часть 1. Теория

- *в поисках «кирпичей» мироздания*
- *основные идеи Стандартной модели*
- *симметрии и их нарушение*

## Часть 2. Эксперимент

*Большой адронный коллайдер –  
флагман физики высоких энергий*

# 1. Теория

Дом построен из кирпичей...

Футбольная команда состоит из игроков...

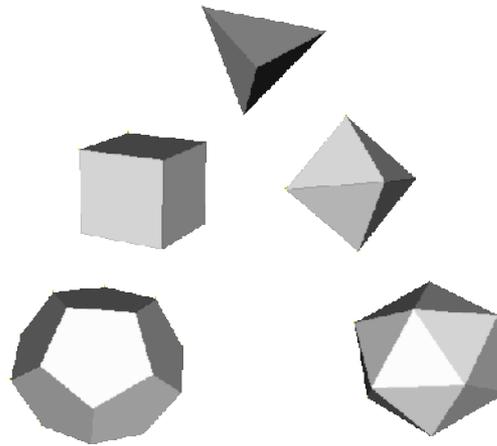
Слово сложено из букв...

**А каковы «элементарные» кирпичики,  
из которых сделан наш мир?**

# Четыре элемента

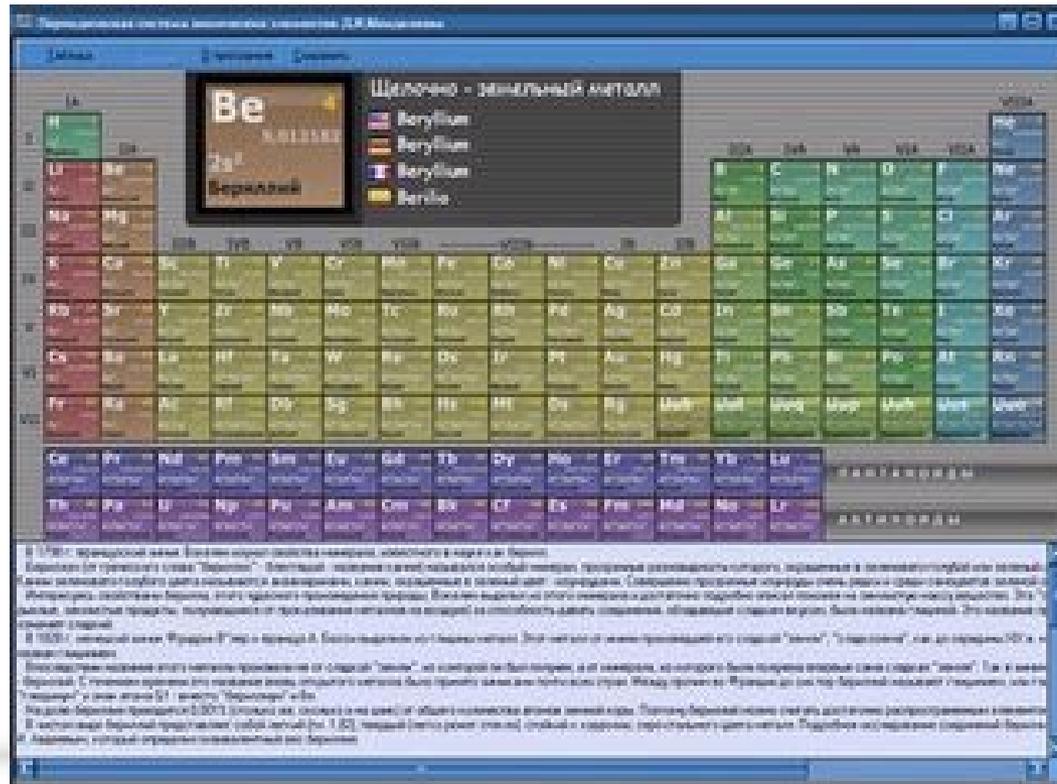


# Пять Платоновых тел



Атомистическая картина Демокрита (Democritus) – V век до Рождества Христова. В XVIII веке Лавуазье (Lavoisier), Дальтон (Dalton) и другие формулируют **атомную гипотезу**

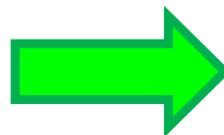
В 1868 году *Д.И.Менделеев* записывает свою периодическую таблицу, в которую включает 63 известных тогда элемента. К 1896 году было открыто уже 77 атомов и все они считались элементарными.



В 1897 году Дж.Дж.Томпсон (J.J.Thompson) открывает первую субатомную частицу – *электрон*, а в 1911 году Э.Резерфорд (E. Rutherford) открывает планетарную структуру атома, и простейшее ядро атома водорода – *протон*.

Развивая идеи М.Планка (M.Planck, 1900), принципы квантовой механики были поняты во второй половине 20-х годов XX века, а в 1932 году Чадвик (Chadwick) открывает *нейтрон* – второй компонент ядер атомов.

**Квантование  
электронных орбит  
+  
принцип Паули 1925**



**Периодичность  
химических  
свойств**

Глядя на таблицу Менделеева, Холмс мог бы дойти до алгебры Грассмана!

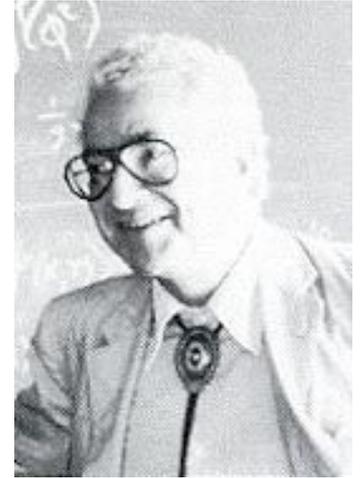
Кроме того, у каждой частицы есть ее *античастица* – частица с той же массой и спином, но противоположным зарядом.

Например, античастица электрона –

*позитрон*

была открыта в 1932 году *Андерсоном*  
(*Anderson*).

В 50-е годы было открыто множество новых  
сильновзаимодействующих нестабильных  
частиц (*адронов*, от hadros – сильный).

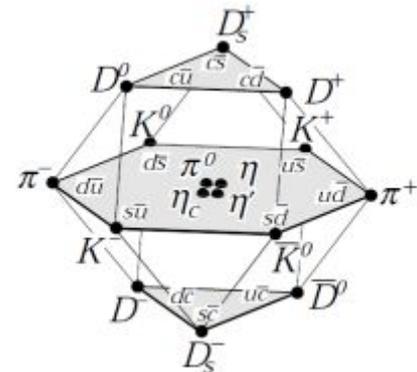


«Периодическая система» для них была  
предложена *М. Гелл-Манном (M. Gell-Mann)*  
в 1961 году и получила название  
«восьмеричный путь».

Вскоре после этого была сформулирована кварковая  
картина – представление о элементарных компонентах  
протона, нейтрона и других адронов – *кварках*.

Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark.

*James Joyce, Finnegans Wake*



Какими характеристиками обладают частицы?

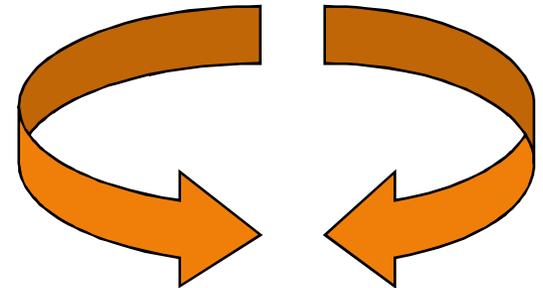
Масса



Заряды

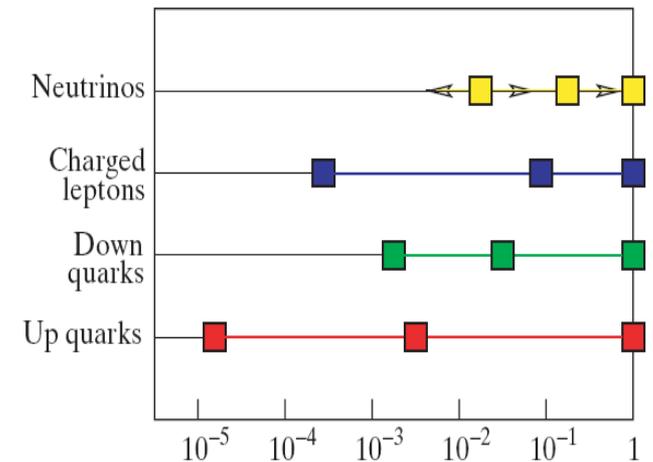
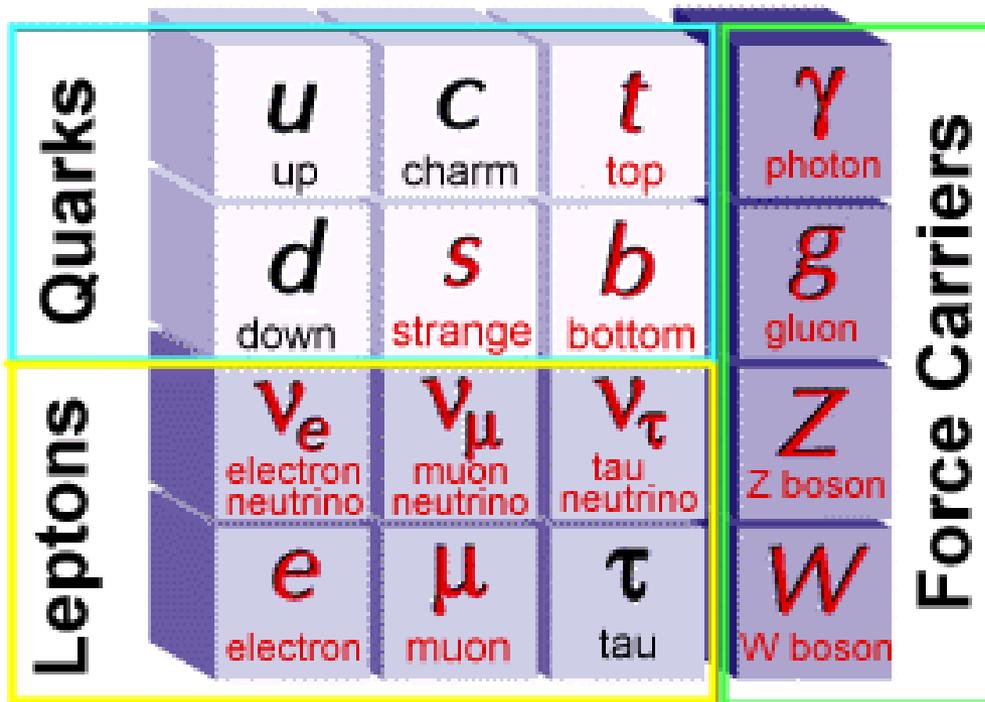


Спин



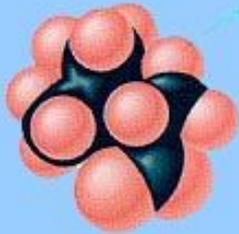
# Зоопарк Стандартной Модели

## Elementary Particles



I II III  
Three Families of Matter

$10^{-9}$  m



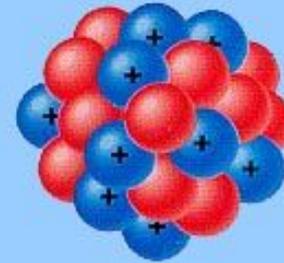
Molecule

$10^{-10}$  m



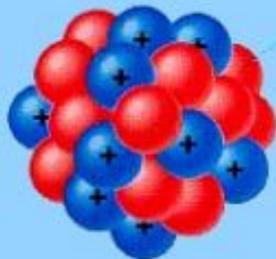
Atom

$10^{-15} - 10^{-14}$  m



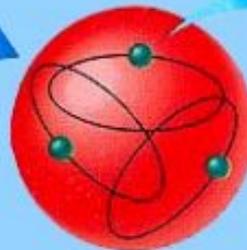
Nucleus

$10^{-15} - 10^{-14}$  m



Nucleus

$10^{-15}$  m



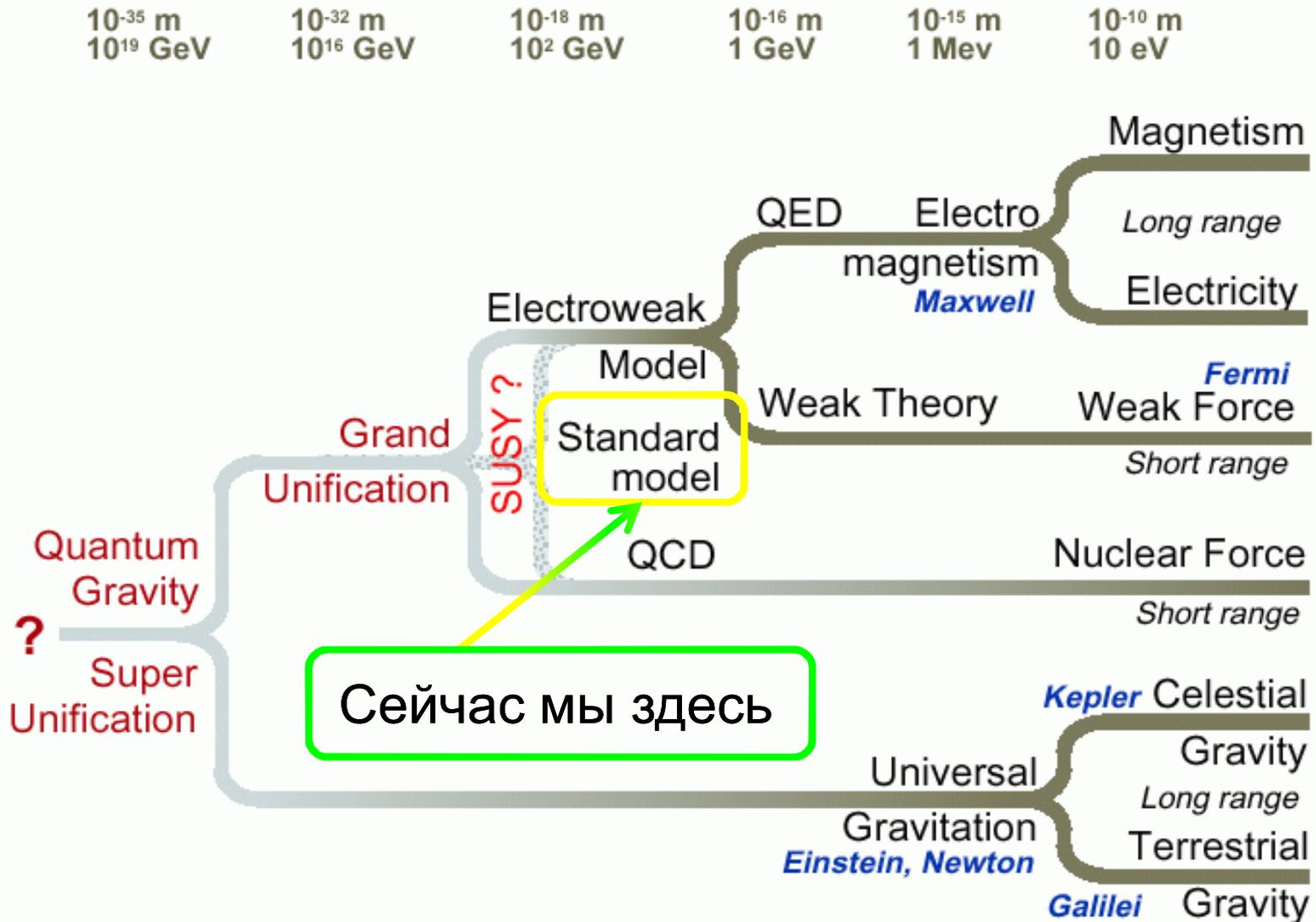
Neutron (or proton)

Less than  $10^{-18}$  m



Quark

# Масштабы и процессы



Открытие и формулировка Стандартной Модели –  
возможно, самый выдающийся результат  
человеческого интеллекта за всю его историю



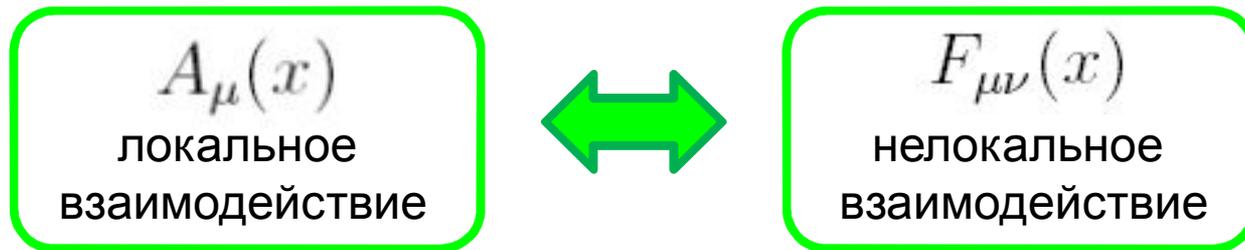
Что же нас восхищает и что не устраивает в  
Стандартной Модели?

# *Основные идеи Стандартной модели*

## Калибровочная инвариантность

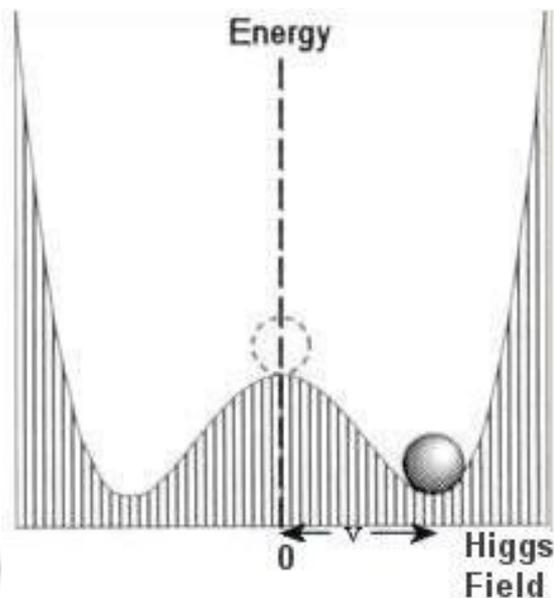
В теории имеется внутренняя симметрия относительно принадлежащих некоторой группе преобразований полей. Различные конфигурации динамических переменных описывают один и тот же набор физических наблюдаемых.

Теория локальна в терминах ненаблюдаемых вектор-потенциалов, и нелокальна в терминах наблюдаемых напряженностей



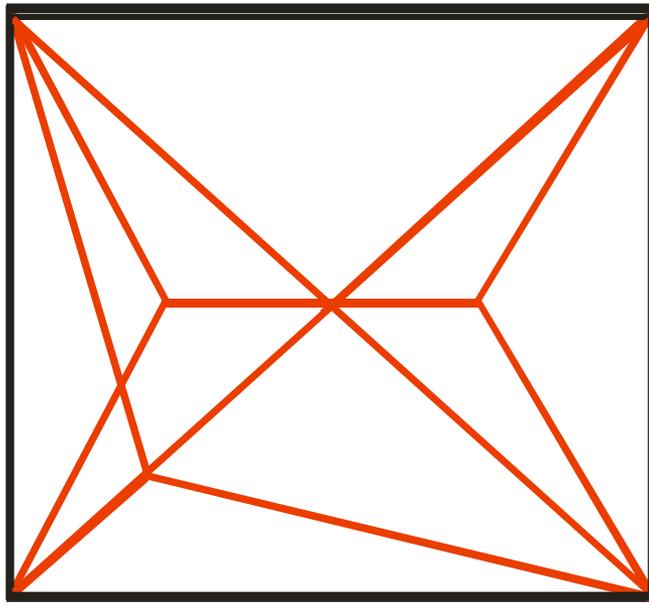
## Спонтанное нарушение симметрии

Симметрия уравнения **не всегда** есть симметрия решения. Если решение реализует экстремум некоторой величины, то этот экстремум может достигаться на конфигурации с нарушенной симметрией.



*Й.Намбу (Y.Nambu)*

Элементарный пример:  
задача о непрозрачном квадрате



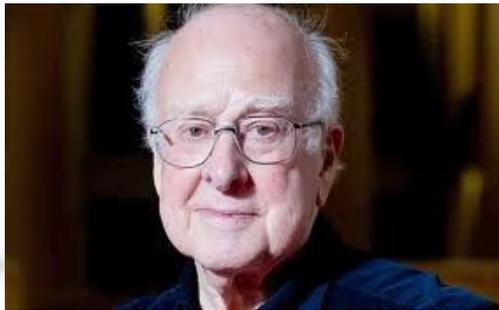
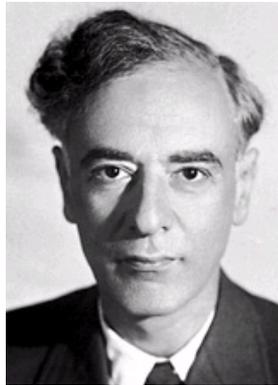
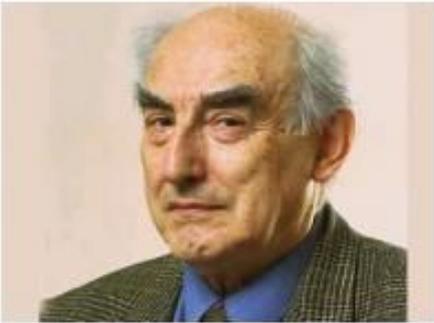
$$2\sqrt{2} \approx 2.82$$

$$1 + \sqrt{3} \approx 2.73$$

$$\sqrt{2} + \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 2.64$$

## Возникновение массы

**I - Механизм  
Гинзбурга-Ландау-Хиггса  
(спонтанное нарушение  
симметрии)**



**II- Размерная  
трансмутация  
(маштабная  
инвариантность  
нарушена  
квантовой аномалией)**

**I – массы заряженных  
лептонов и кварков.**

**II – почти 99% массы  
нуклонов (т.е. и ядер,  
и всей видимой материи).**

кинетическая энергия

$$T = T[\dot{x}]$$

потенциальная энергия

$$U = U[x]$$

$$E = T + U$$

энергия

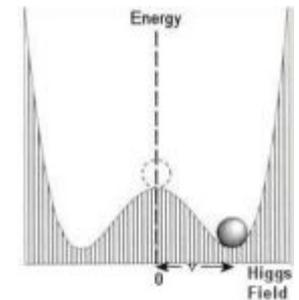
$$S = \int L dt$$

$$S = T - U$$

действие

Выбор вакуума скалярного поля управляет динамикой калибровочного поля

$$L = |(i\partial + A)\Phi|^2 + V(\Phi)$$



- Слабый сектор Стандартной Модели
- Эффективный механизм в электромагнитном секторе в ряде задач физики твердого тела, в первую очередь, в теории сверхпроводимости
- Дуальный мейснеровский сценарий конфайнмента в сильном секторе

# Wikipedia: Unsolved problems in physics (36)

## Классическая физика

### Turbulence

Is it possible to make a theoretical model to describe the statistics of a turbulent flow (in particular, its internal structures)?<sup>[14]</sup> Also, under what conditions do smooth solutions to the Navier-Stokes equations exist?

## Физика Стандартной модели

### Higgs mechanism

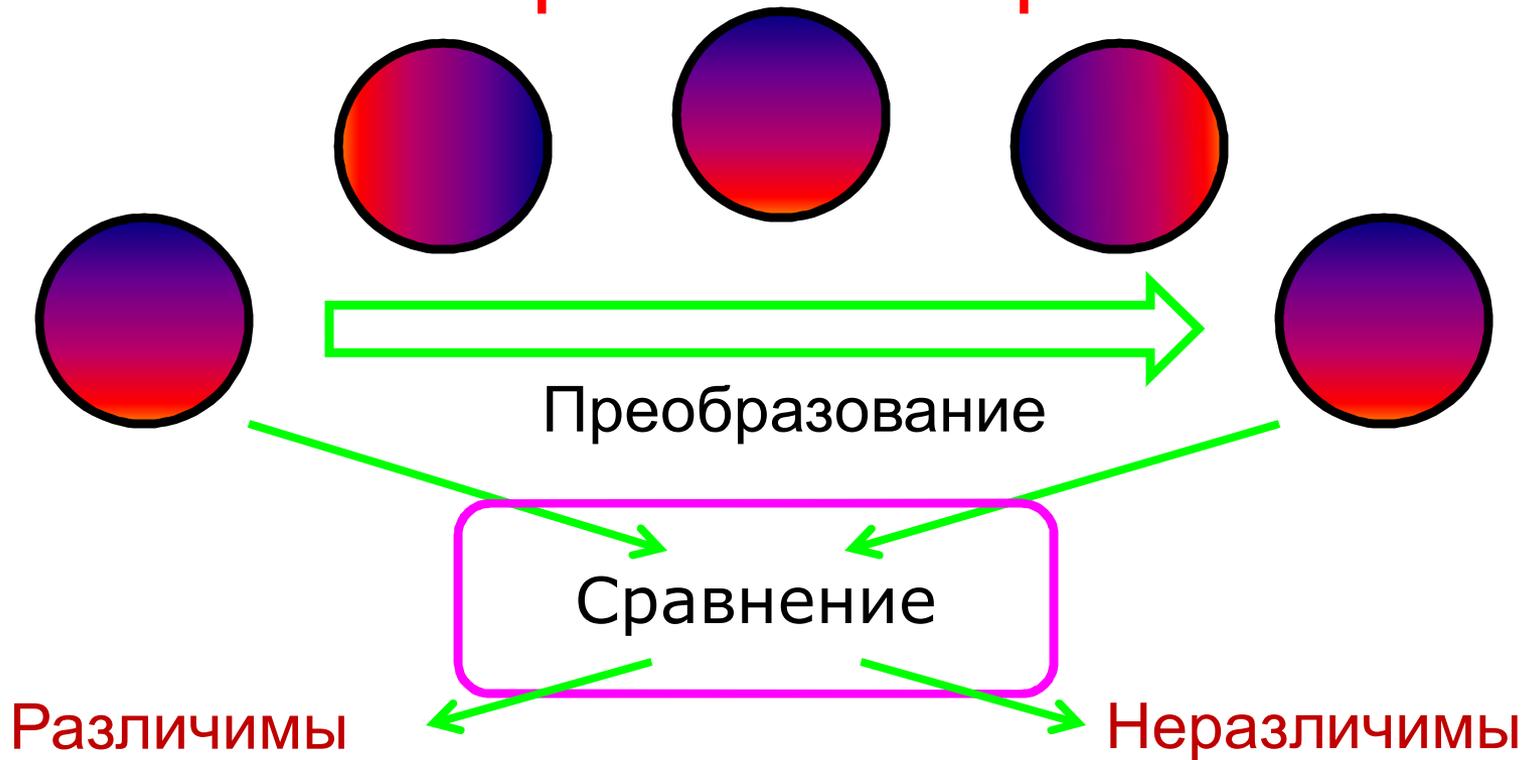
Does the Higgs particle exist? What are the implications if it does not?

### Generations of matter

Are there more than three generations of quarks and leptons? Why are there generations at all?

# *Симметрии и их нарушение*

# Симметрия = инвариантность



Симметрии классифицируются по этому принципу:  
тип преобразования (непрерывный или дискретный) и  
точность сравнения (зависит от наблюдателя или нет)

Максимальная симметрия не особенно интересна..



Истинная гармония  слегка нарушенная симметрия



Конечно, нарушение не должно быть *слишком* сильным..



Помимо непрерывных (локальных и глобальных) симметрий существенную роль играют дискретные симметрии, в частности:

**P** – пространственное отражение  $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$

**T** – временное отражение  $t \rightarrow -t$

**C** – зарядовое сопряжение  $e \rightarrow -e$

В классической физике

**P**  $\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$   $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}$   $\mathbf{j} \rightarrow -\mathbf{j}$   $\mathbf{E} \rightarrow -\mathbf{E}$   $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}$

**C**  $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}$   $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}$   $\mathbf{j} \rightarrow -\mathbf{j}$   $\mathbf{E} \rightarrow -\mathbf{E}$   $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$

**T**  $\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$   $\mathbf{L} \rightarrow -\mathbf{L}$   $\mathbf{j} \rightarrow -\mathbf{j}$   $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{E}$   $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$

В квантовой теории поля отдельные преобразования **C**, **P**, **T**, парные комбинации **CP**, **CT**, **TP**, и **CPT** имеют **различный** статус.

Именно, для любой локальной Лоренц-инвариантной квантовой теории поля имеет место

**CPT** теорема

J.Schwinger, 1951

G.Lüders, W.Pauli, 1954

Физически, **CPT** теорема означает, что античастицы и их взаимодействия неотличимы от частиц, движущихся вдоль тех же мировых линий в 3+1 пространстве-времени в противоположных направлениях.

*В частности, масса любой частицы строго равна массе ее античастицы (экспериментально проверено для K-мезонов на уровне 1 к  $10^{18}$ ).*

**C**, **P**, **T** подобного кинематического статуса не имеют

Наш мир

Зазеркалье



90%



10%



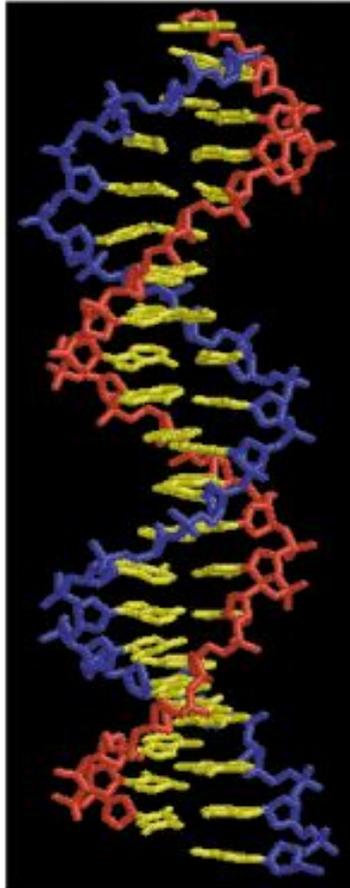
10%



90%

Наш мир  $\neq$  Зазеркалью: P-четность нарушена

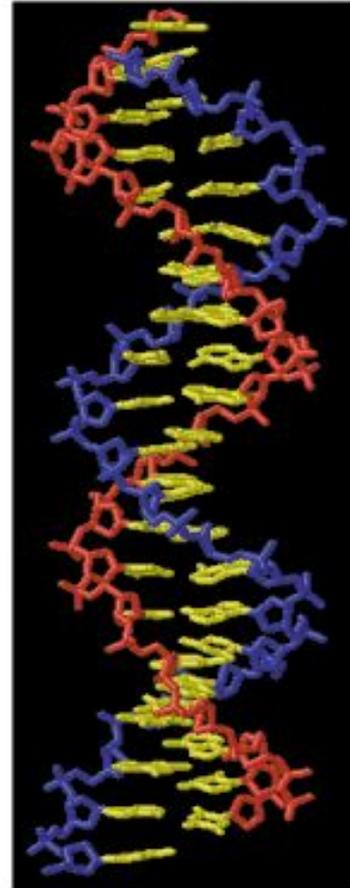
Наш мир



ДНК



Зазеркалье



P-четность нарушена на 100%

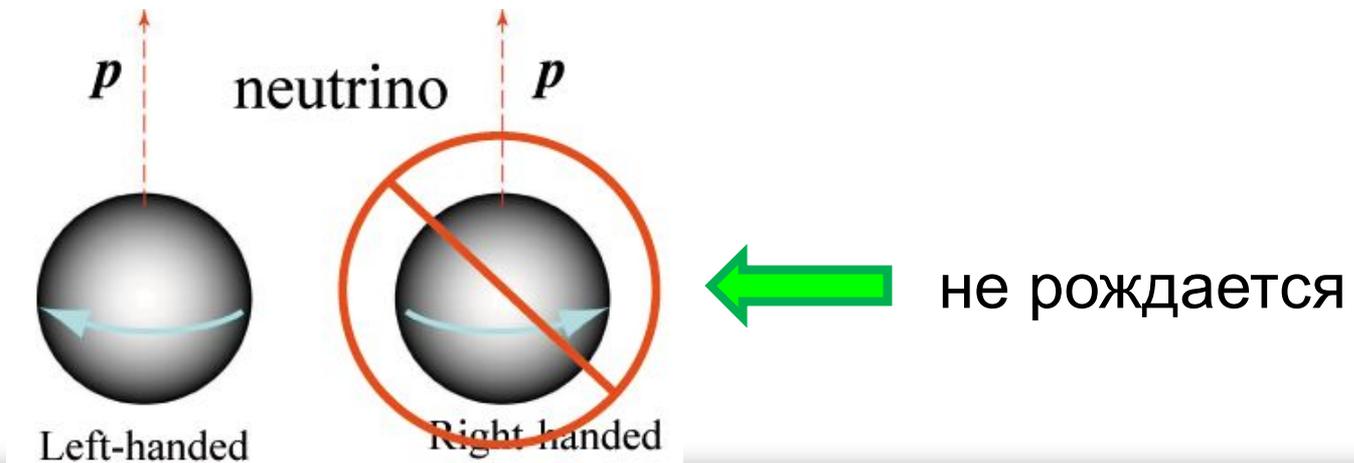
# P-четность в мире элементарных частиц

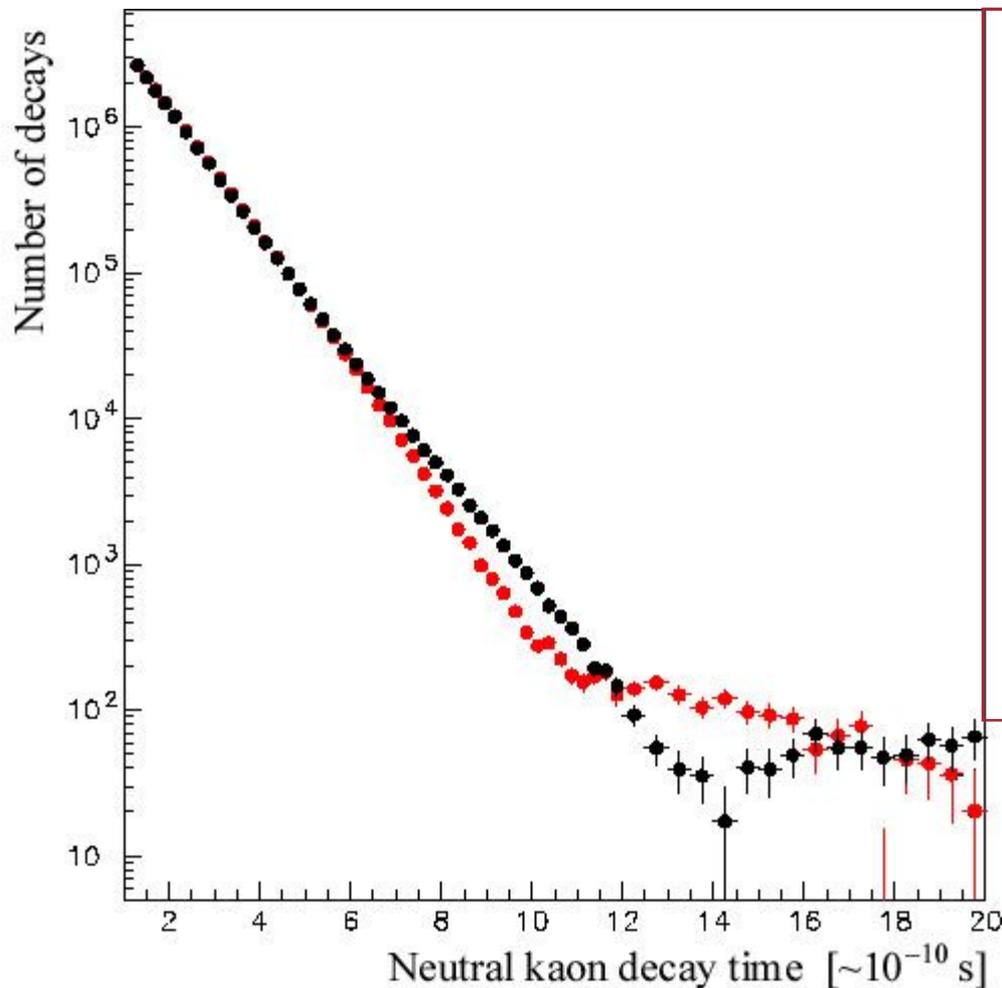


T.D.Lee, C.N.Yang, 1956



C.S.Wu, 1957





*распределение  
времен распада  
нейтрального каона*

$\neq$

*распределение  
времен распада  
нейтрального анти-  
каона*

**CP violation**

Согласно **CPT** теореме это означает нарушение инвариантности относительно обращения времени.

1. Термодинамическая стрела времени



2. Космологическая стрела времени



3. Причинная стрела времени



4. Психологическая стрела времени



5. Квантовомеханическая стрела времени



6. Электрослабая стрела времени – фаза СКМ

# Важный общий вывод



Может быть  
нарушена  
«жестко»  
(на уровне  
законов)

СИММЕТРИЯ

ДИНАМИКА  
как  
нарушение  
симметрии



А может быть  
нарушена  
«спонтанно»  
(на уровне  
состояний)

# *Теперь поговорим о волнах...*



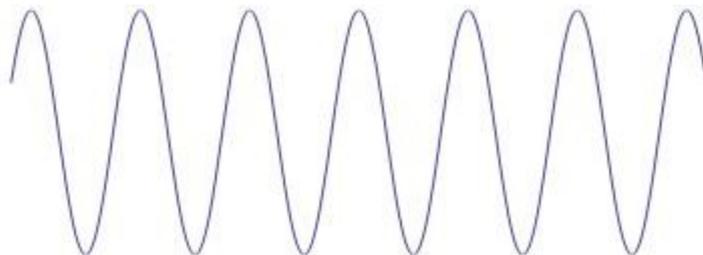
На первый взгляд, между волнами и частицами мало общего. Однако, уже более 300 лет назад люди впервые задались вопросом, является ли свет потоком особых «светоносных» частиц –

*c o r p u s c u l u s*

или же волной особой природы.

# Монохроматическая волна

$\cos(x)$

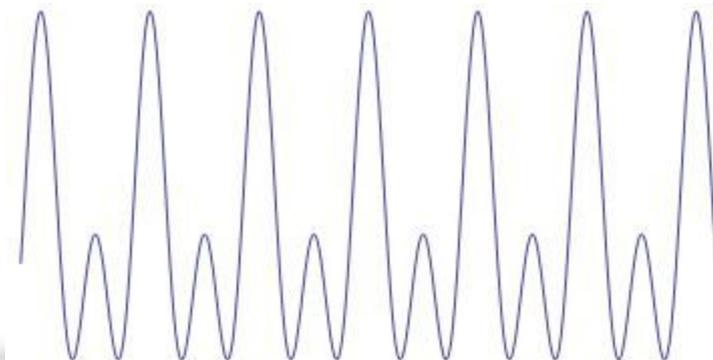


$\sin(x)$

Многие волны обладают свойством

*суперпозиции*

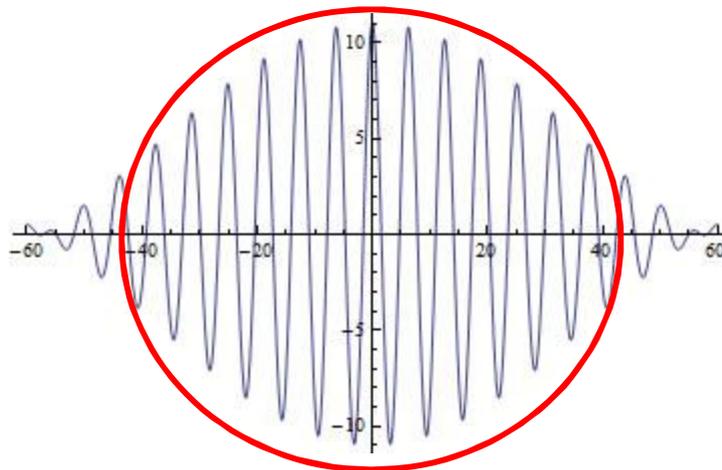
$$\cos(x) + \cos(2x) =$$



Суперпозиция большого числа волн с близкими частотами формирует *волновой пакет*

$$\begin{aligned} &\cos(0.95x) + \cos(0.96x) + \cos(0.97x) + \cos(0.98x) + \\ &+ \cos(0.99x) + \cos(x) + \cos(1.01x) + \cos(1.02x) + \\ &+ \cos(1.03x) + \cos(1.04x) + \cos(1.05x) \end{aligned}$$

=



Волновой пакет во многих отношениях похож на частицу

Квантовая механика ставит в соответствие каждой частице особую волну – *волну де Бройля* (*L.de Broglie, 1924*)

Длина этой волны очень просто связана с импульсом частицы  $p$ :

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$$

где  $\hbar$  - фундаментальная константа Природы, известная как *постоянная Планка* (*M. Planck, 1900*)

$\hbar$  имеет размерность *действия*

$$[\hbar] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{сек}} =$$

= импульс · длина = энергия · время

*Поэтому если мы хотим изучать физику малых времен /расстояний, мы должны быть готовы вложить много энергии...*

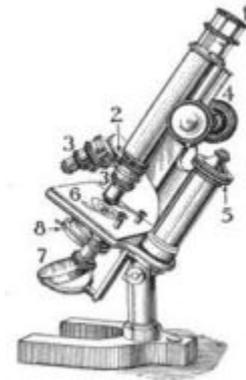
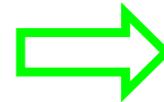
Высокие энергии создаются с помощью специальных физических приборов – ускорителей (в т.ч. коллайдеров)

Ответы на некоторые из тех  
вопросов, которые есть к  
Стандартной модели,  
физики надеются найти на  
Большом адронном коллайдере

## а именно:

- как возникает **масса** кварков?
- как **взаимодействуют** кварки?
- **существуют ли** частицы, кроме уже известных?
- почему нарушена **симметрия** между частицами и античастицами, то есть почему наш мир построен только из частиц, а античастиц во Вселенной нет?

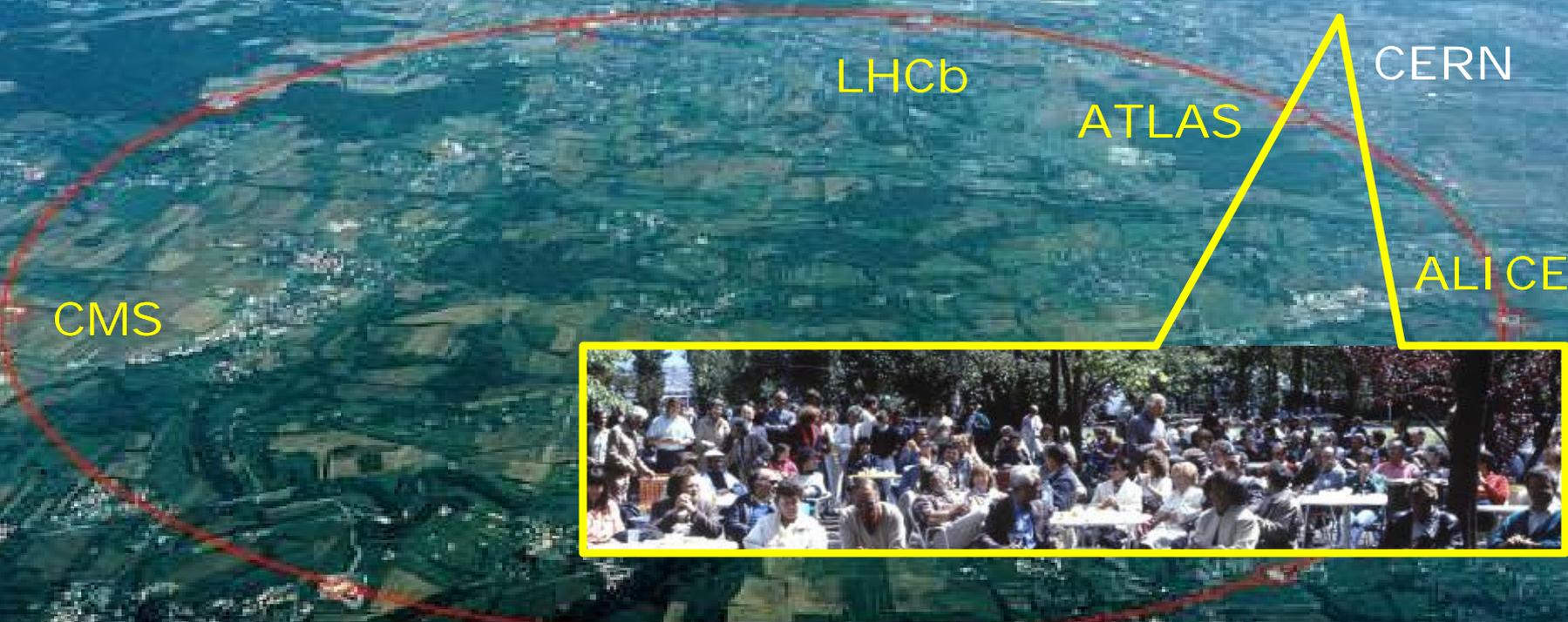
Промышленные ускорители частиц, как правило, используются в качестве молотков. Ускорители физики элементарных частиц (и, в частности, Большой адронный коллайдер) – выполняют функцию микроскопа, а не молотка.



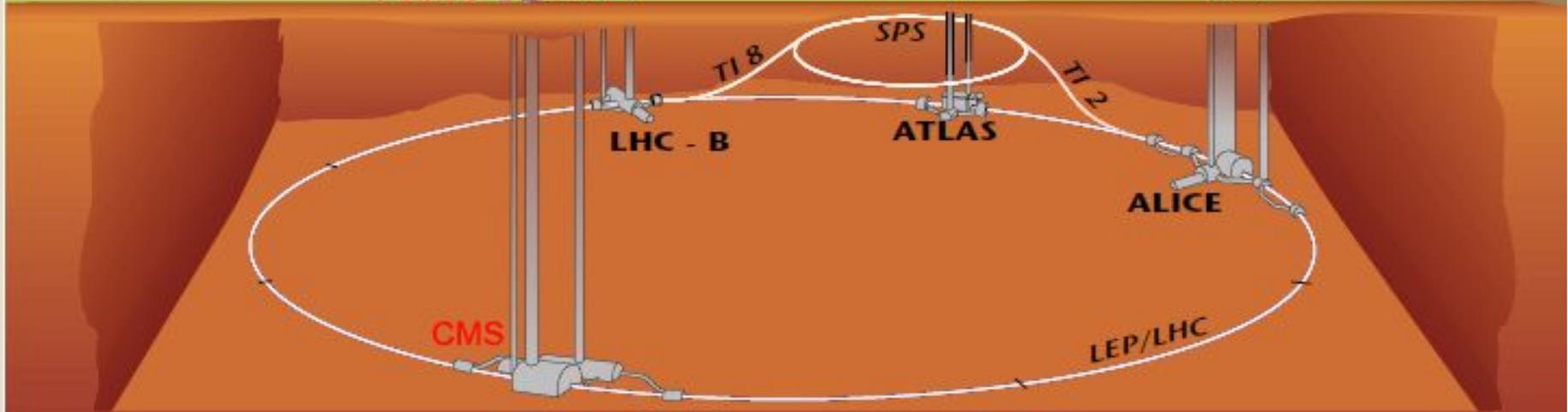
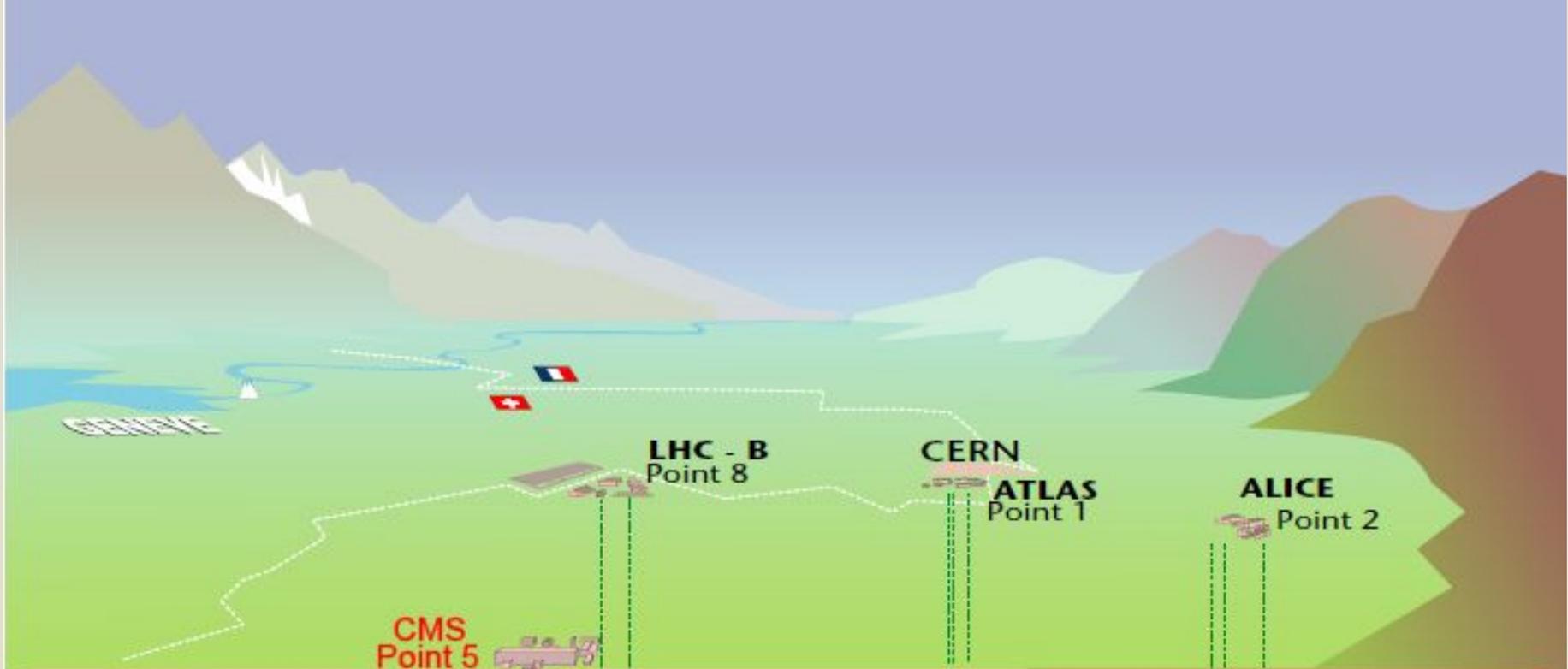
Необходимо добиться максимально возможного пространственно-временного разрешения

Jet d' Eau  
140 m

Mont Blanc,  
4808 m

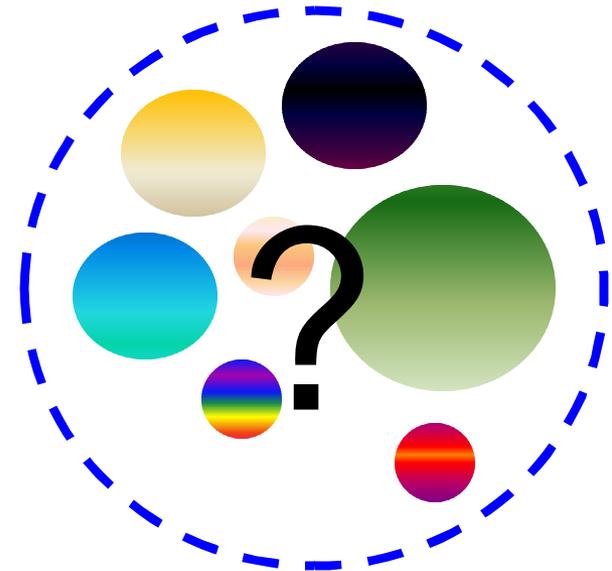
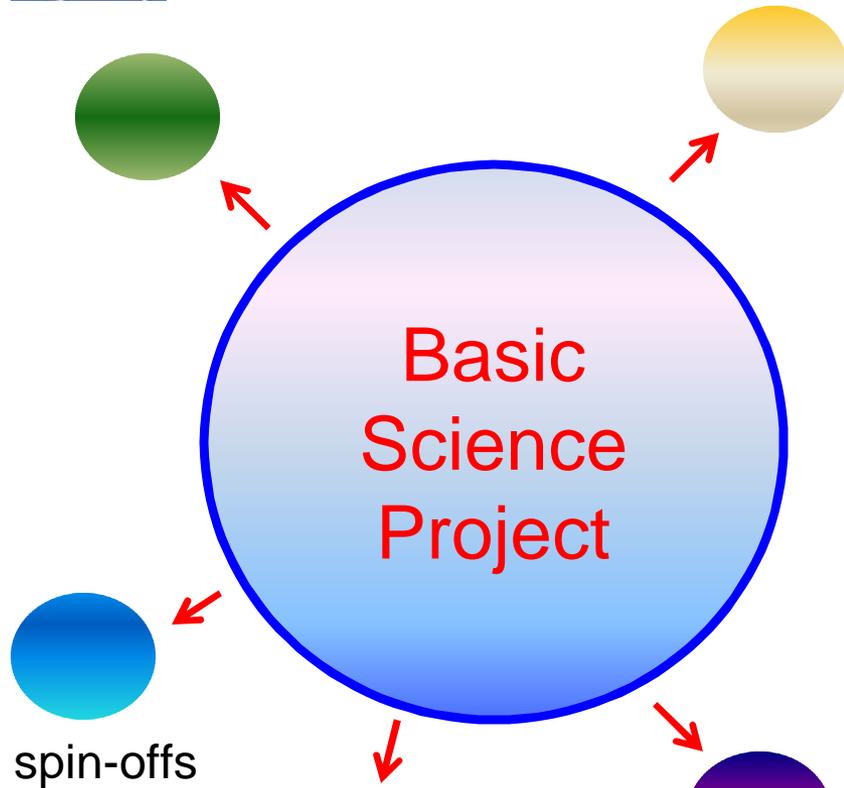


**CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)  
founded 29 September 1954**





# Парадигма ЦЕРН vs Парадигма Сколково



Ecosystem made of many business-oriented projects

# World Wide Web

The WorldWideWeb (W3) is a wide-area [hypermedia](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents.

Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#) , [Policy](#) , November's [W3 news](#) , [Frequently Asked Questions](#) .

## [What's out there?](#)

Pointers to the world's online information, [subjects](#) , [W3 servers](#), etc.

## [Help](#)

on the browser you are using

## [Software Products](#)

A list of W3 project components and their current state. (e.g. [Line Mode](#) ,[X11 Viola](#) , [NeXTStep](#) , [Servers](#) , [Tools](#) , [Mail robot](#) , [Library](#) )

## [Technical](#)

Details of protocols, formats, program internals etc

## [Bibliography](#)

Paper documentation on W3 and references.

## [People](#)

A list of some people involved in the project.

## [History](#)

A summary of the history of the project.

## [How can I help ?](#)

If you would like to support the web..

## [Getting code](#)

Getting the code by [anonymous FTP](#) , etc.

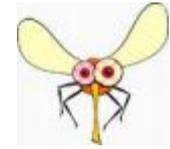
Так выглядела первая web-страница. 1991 г.

# ABC of LHC

- Длина туннеля - 27 километров
- Глубина залегания - от 50 до 175 метров
- Встречные p-p пучки, 2808 банчей,  $1.15 \times 10^{11}$  p/банч
- $v = 0.999999998$  c
- Энергия = 7 ТэВ + 7 ТэВ, светимость  $\sim 10^{34}$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>
- Примерно 600 миллионов столкновений в секунду

Энергия протона в пучке = 7 ТэВ =  $10^{-6}$  Джоуля (J).

Это примерно кинетическая энергия комара:



Почему бы не использовать комаров в физике частиц?

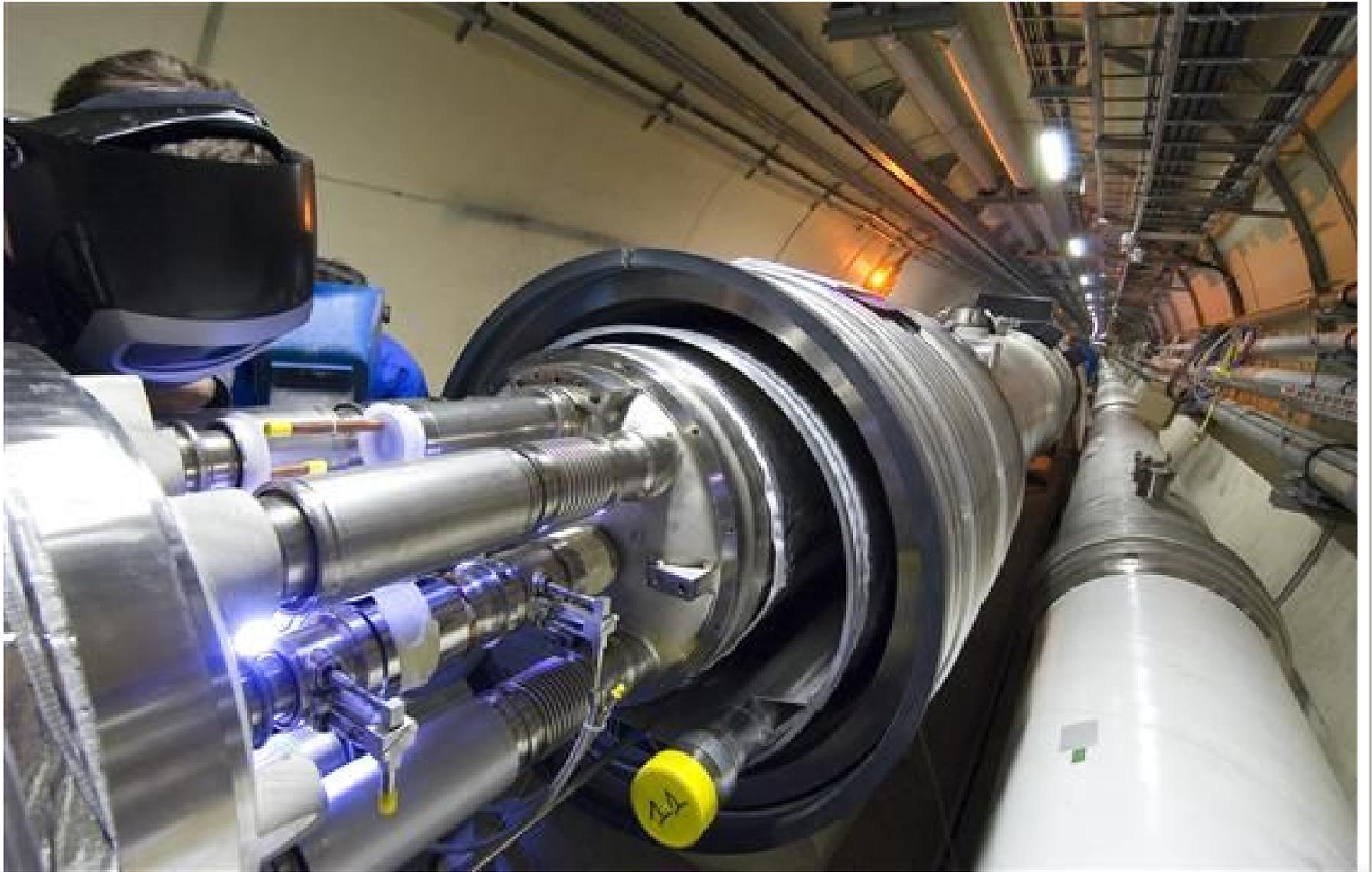
Потому, что число Авогадро =  $6.022 \times 10^{23}$  (mol)<sup>-1</sup>

Энергия комара распределена между  $\sim 10^{22}$  нуклонами.

В то же время полная энергия, запасенная в пучке, равна  $2808$  банчей  $\times 10^{11}$  протонов/банч  $\times 7$  ТэВ/протон  $\sim 400$  МДж

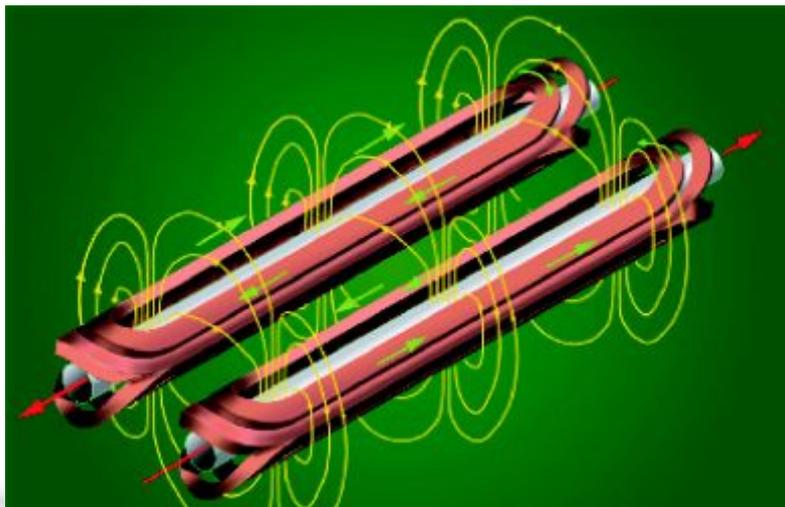
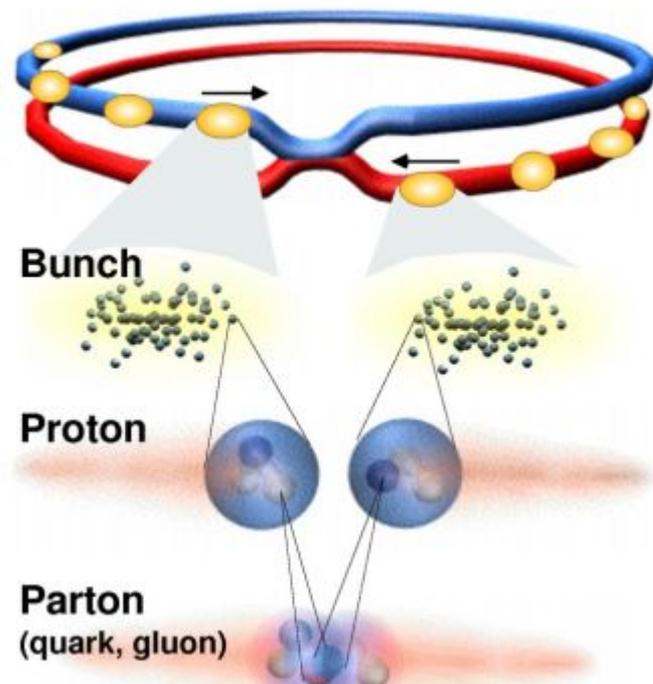
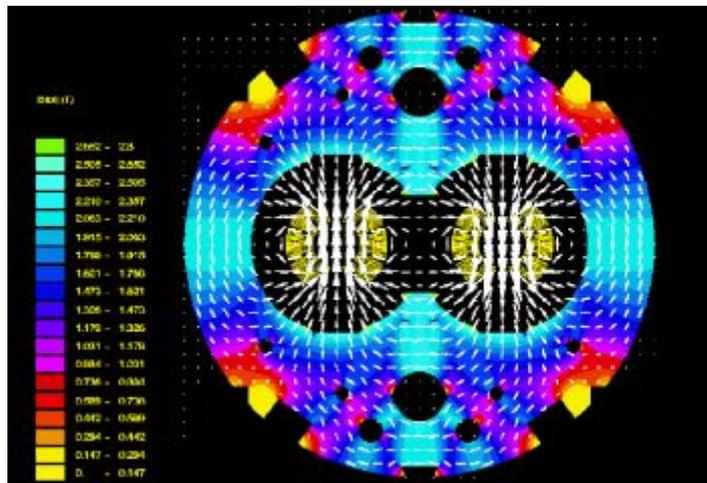
Это энергия взрыва  $\sim 100$  кг тротила или кинетическая энергия тяжелого авианесущего крейсера «Адмирал Кузнецов» на скорости  $8$  узлов.



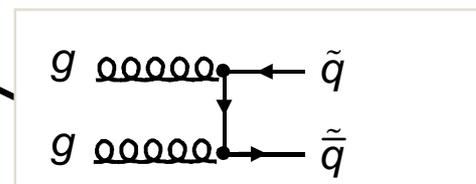
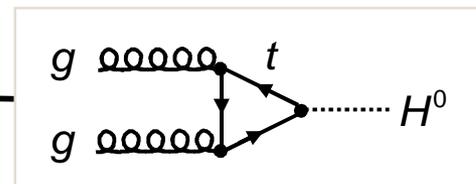
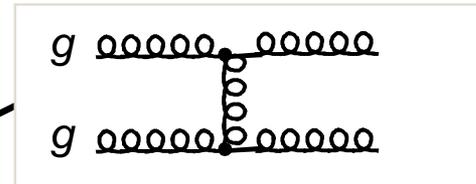
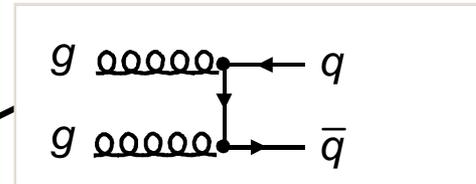
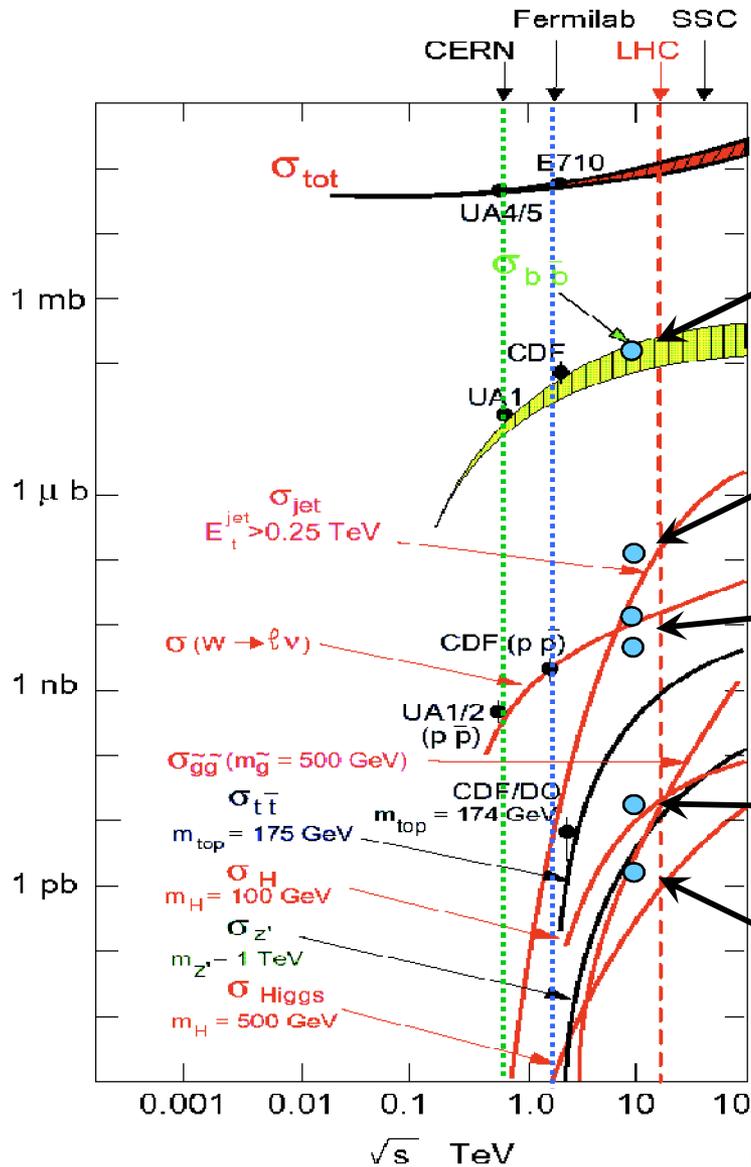




# Пучки

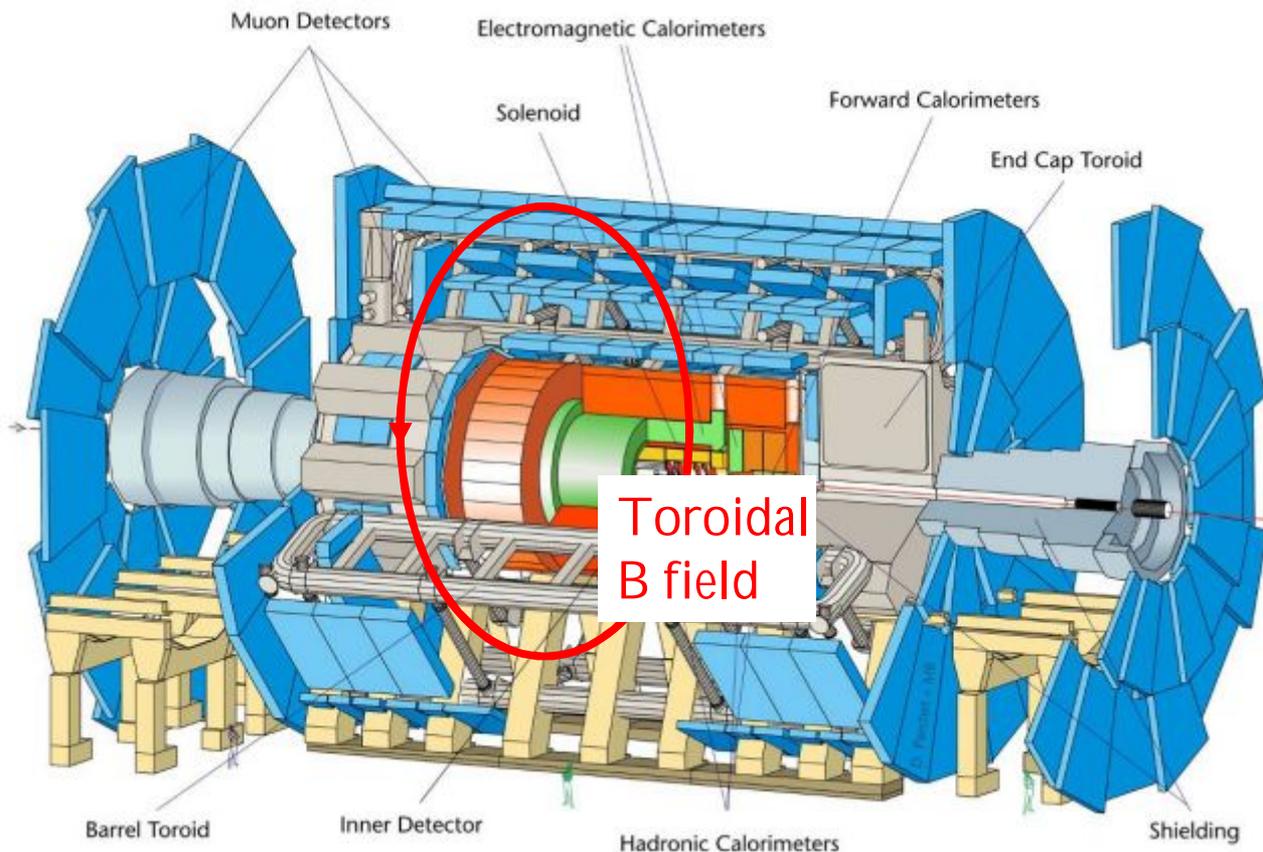


Общая магнитная система  
для обоих пучков



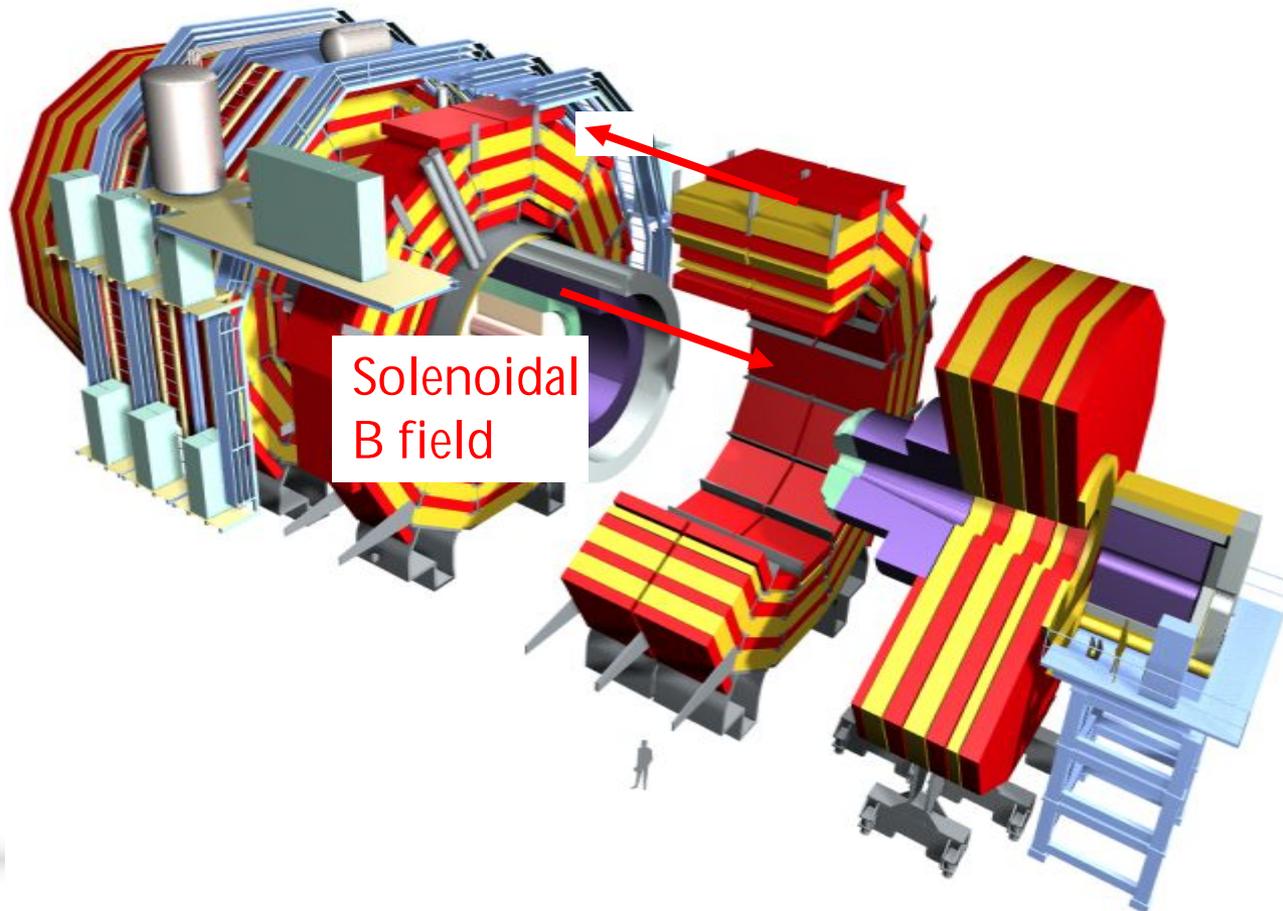
# ATLAS – A Toroidal Lhc ApparatuS

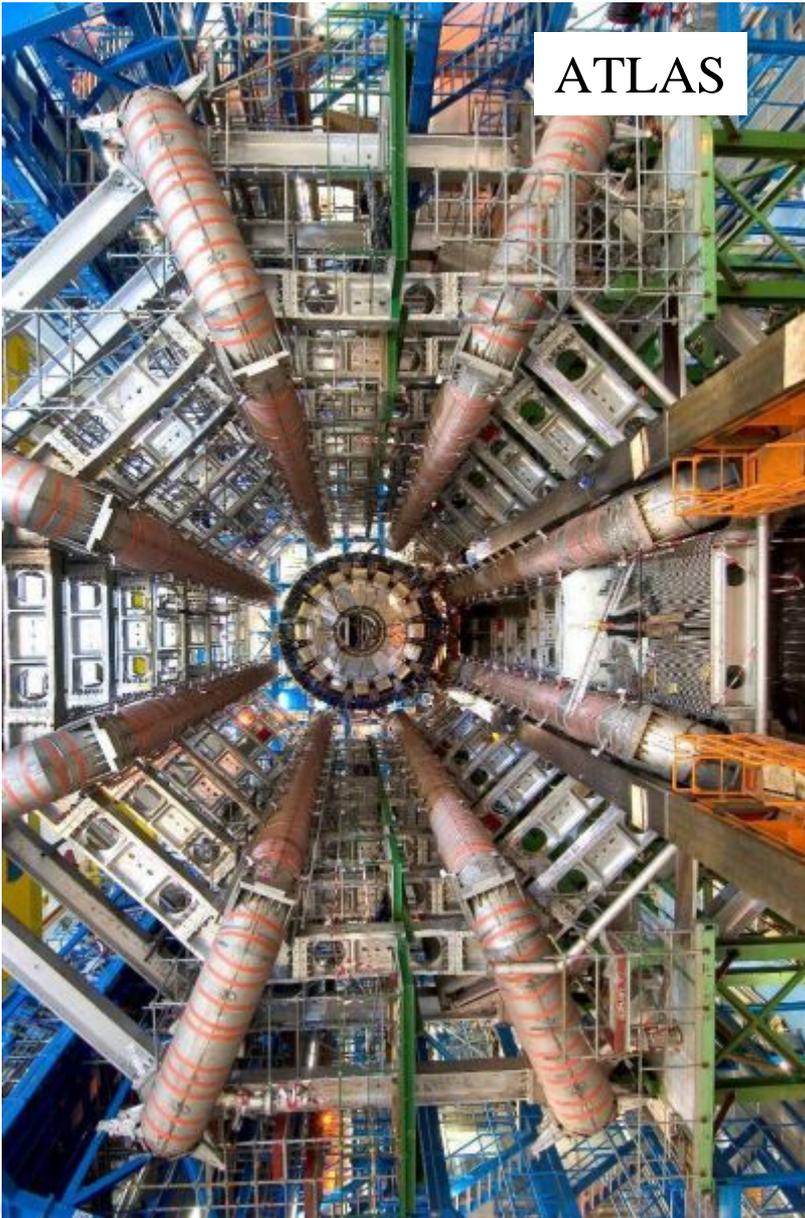
Самый большой детектор в истории физики элементарных частиц – 45 метров и 7000 тонн



# CMS – Compact Muon Spectrometer

21 метр и 12500 тонн



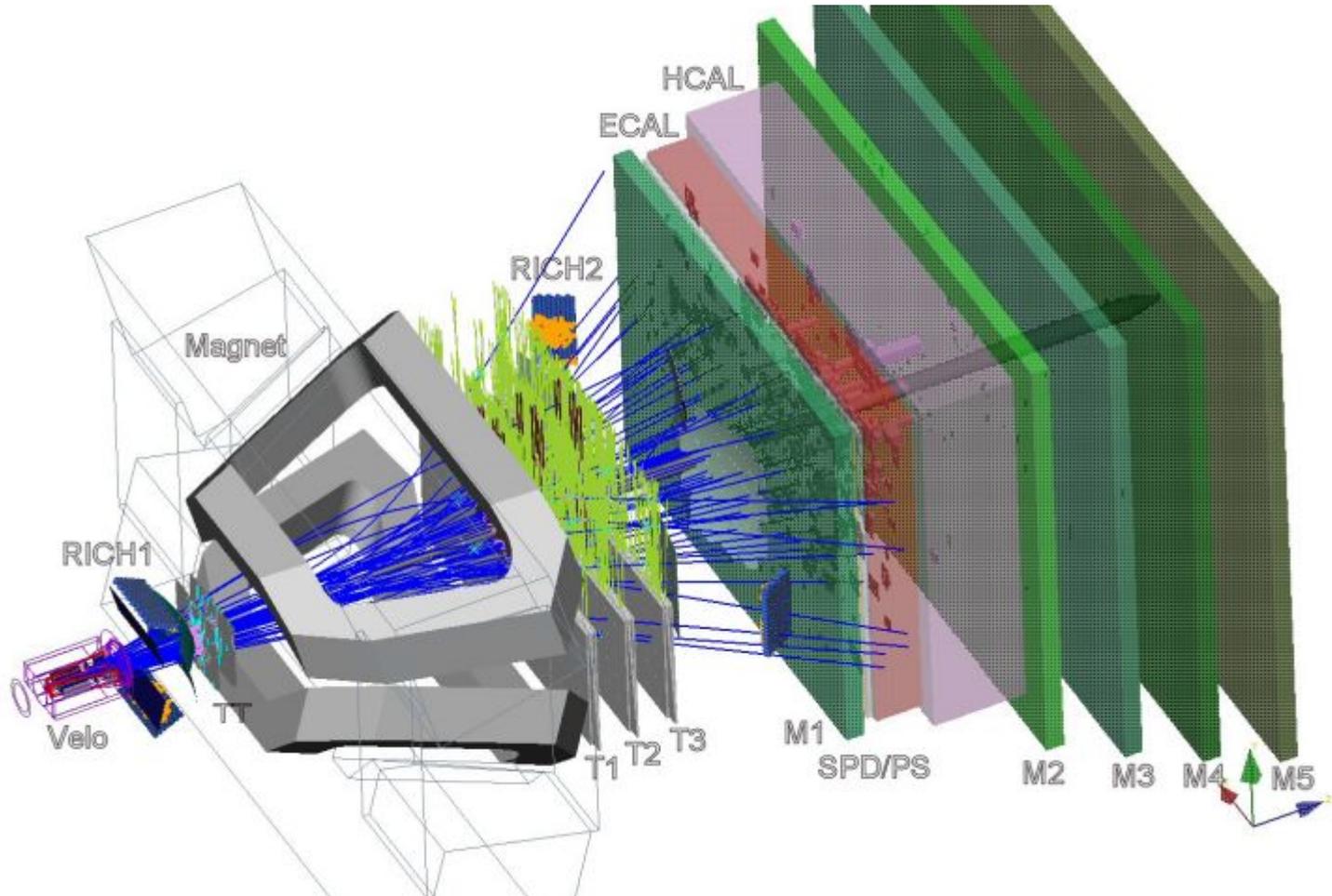


ATLAS



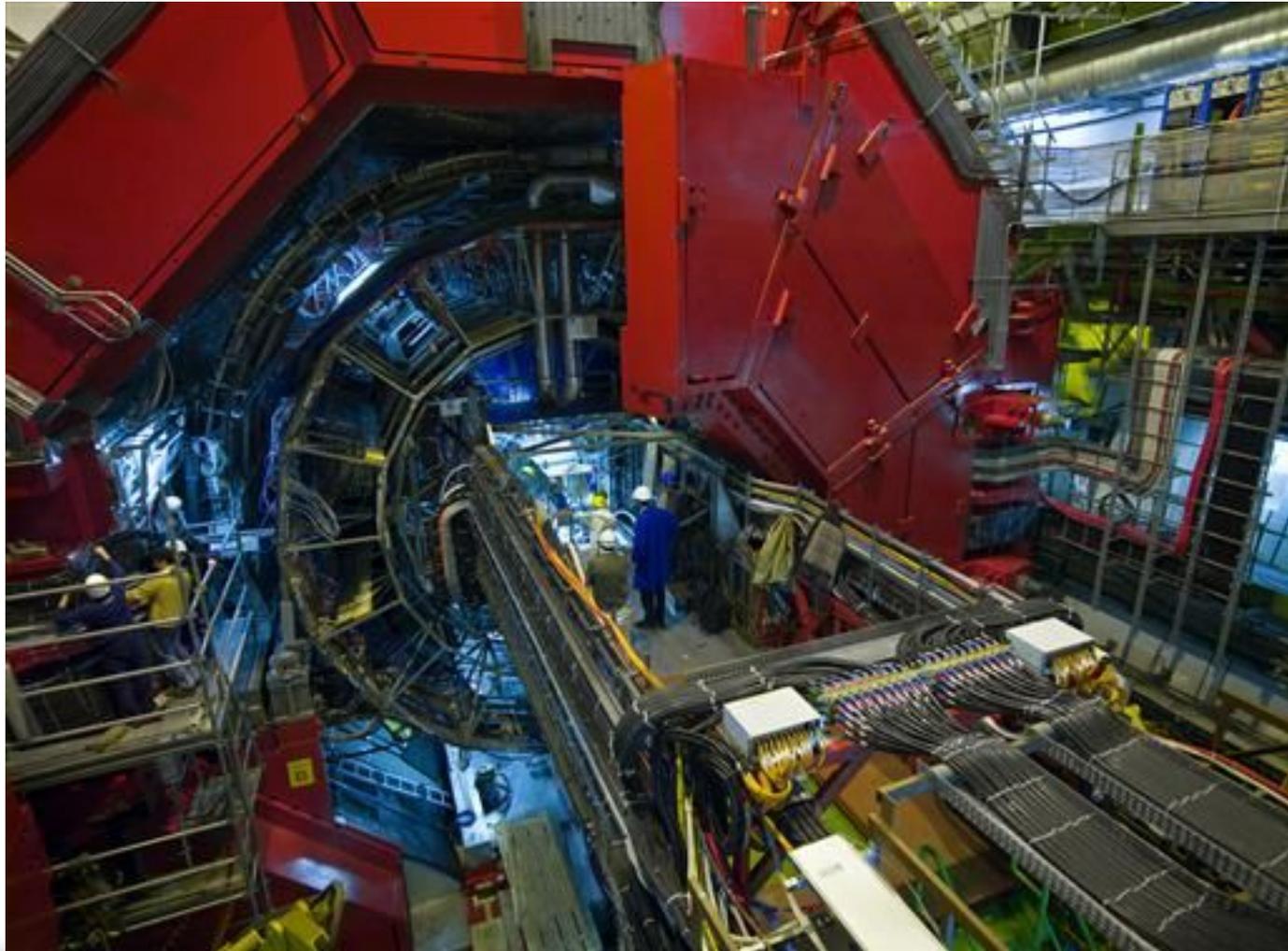
CMS

# LHCb





# ALICE



# Эксперименты LHC и симметрии



General purpose – все с большим  $p_T$

Нарушение электрослабой симметрии: бозон Хиггса или Новая физика?

Пространственно-временные симметрии: дополнительные измерения, черные дыры, КК-состояния?



Суперсимметрия: суперпартнеры? Темная материя?



Загадка аромата

CP-нарушение: новые источники?  
Барионная асимметрия.  
Непрямой поиск суперпартнеров.

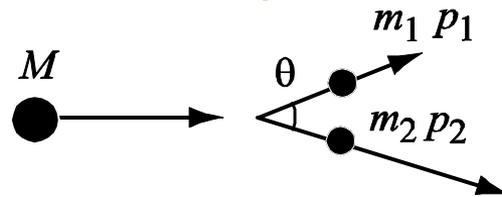


Новое состояние материи

Киральная симметрия: картина восстановления. Деконфайнмент.  
Нарушение P-четности в сильных магнитных полях?

# Реконструкция частиц

- Экспериментально регистрируются продукты pp столкновений – долгоживущие заряженные частицы ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $p$ ,  $K$ ) и нейтральные ( $\gamma$ ,  $n$ )
- Эта информация используется для реконструкции короткоживущих частиц



Например, в двухчастичном распаде:

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos \theta)$$

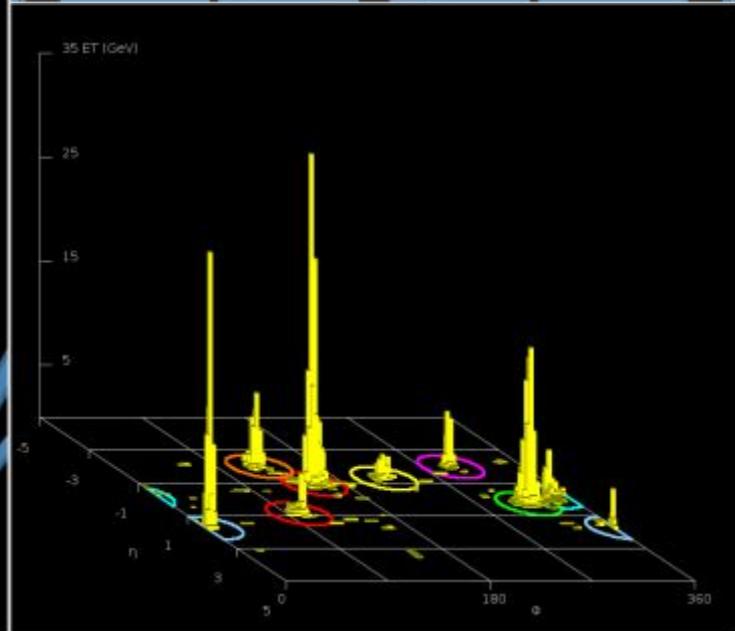
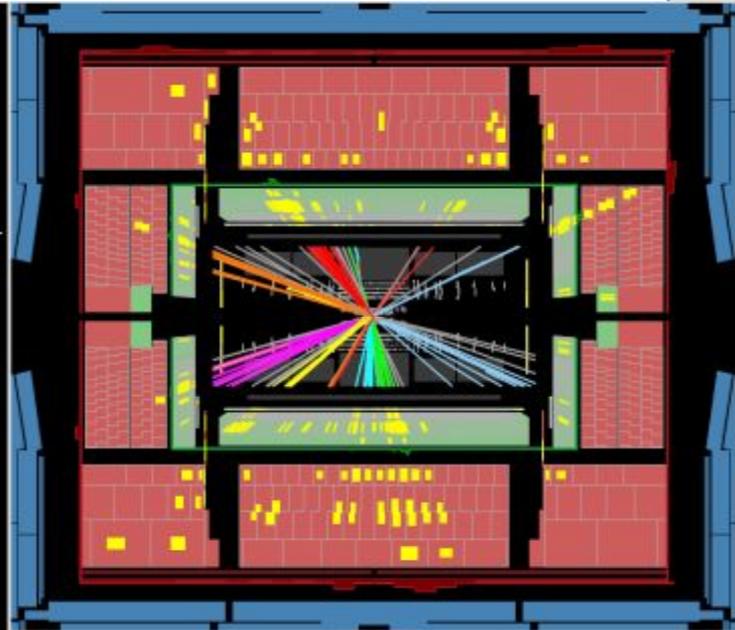
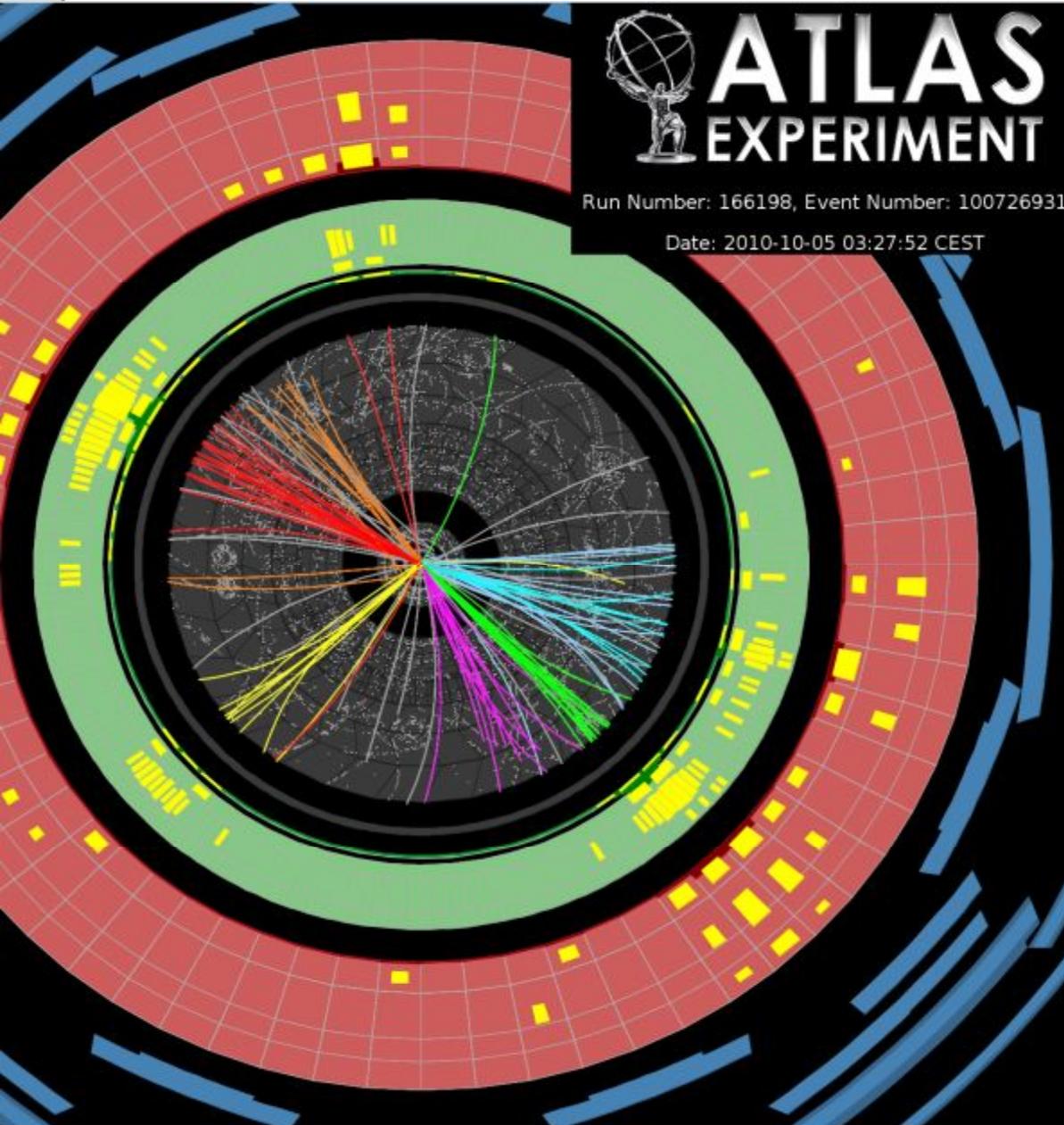
для восстановления массы первичной частицы необходимо знать импульсы продуктов распада, угол между ними и тип частиц (т.е. их массы).

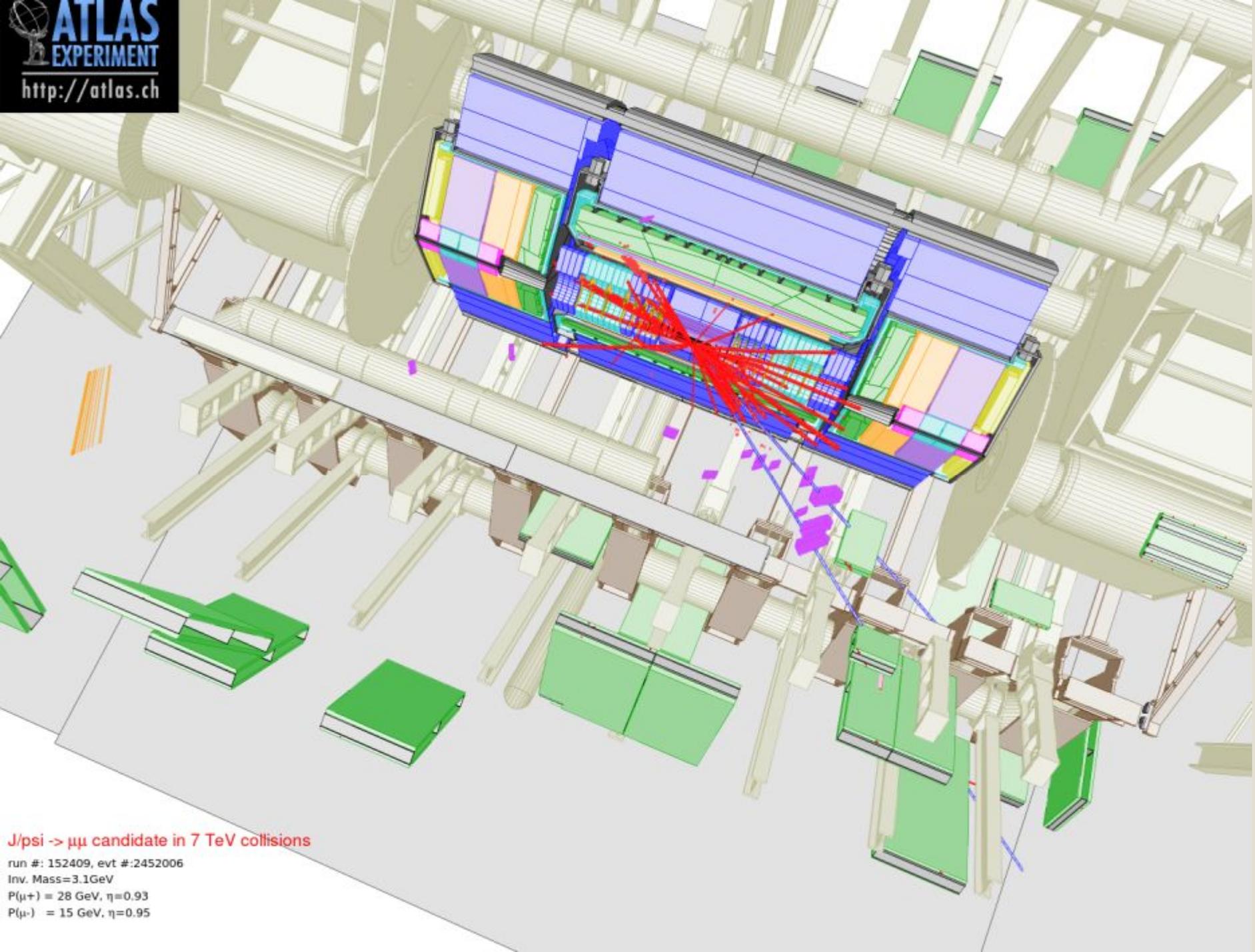


# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 166198, Event Number: 100726931

Date: 2010-10-05 03:27:52 CEST

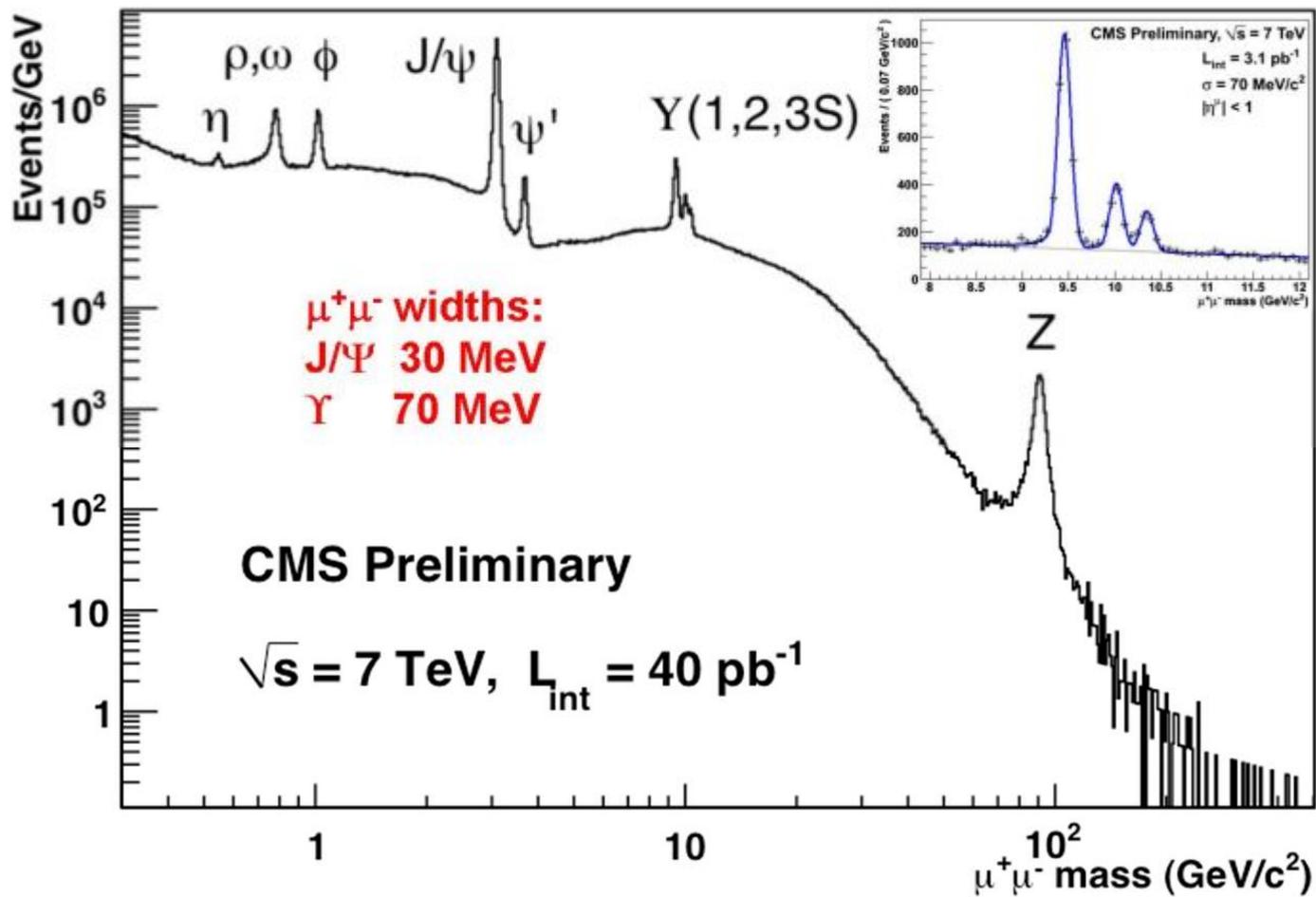


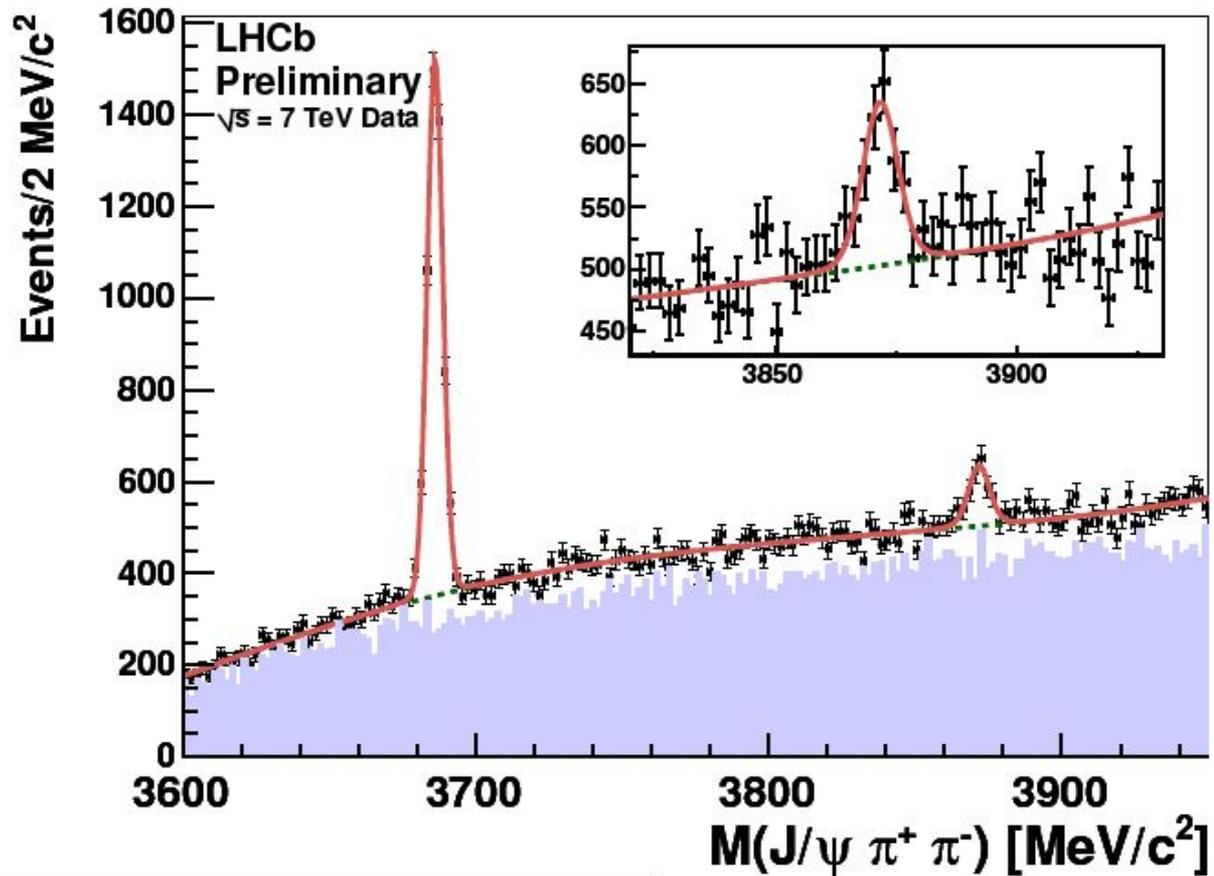


**J/psi ->  $\mu\mu$  candidate in 7 TeV collisions**

run #: 152409, evt #:2452006  
Inv. Mass=3.1GeV  
P( $\mu^+$ ) = 28 GeV,  $\eta=0.93$   
P( $\mu^-$ ) = 15 GeV,  $\eta=0.95$

# Как физики узнают о том, что «что-то есть»

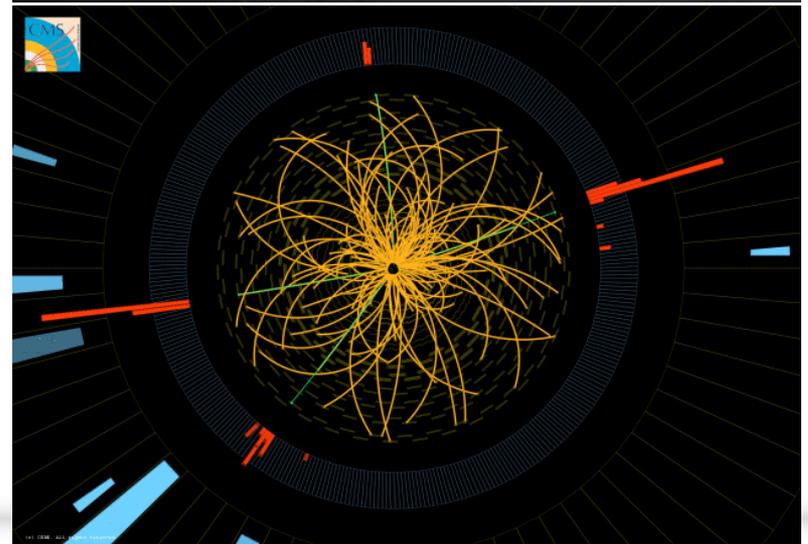
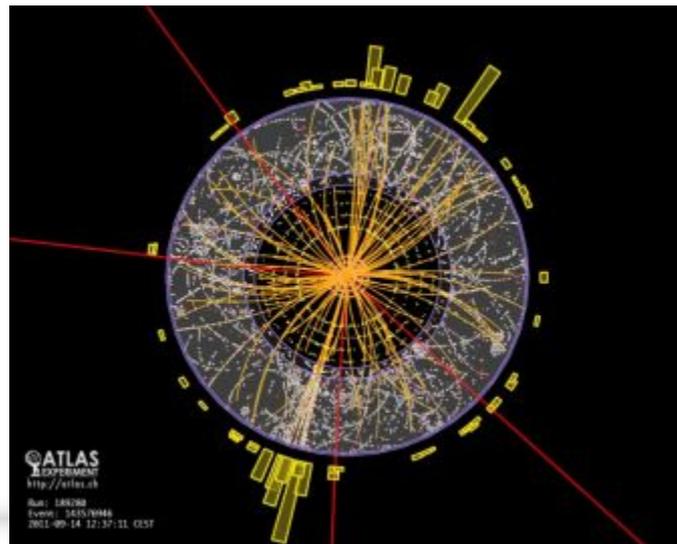
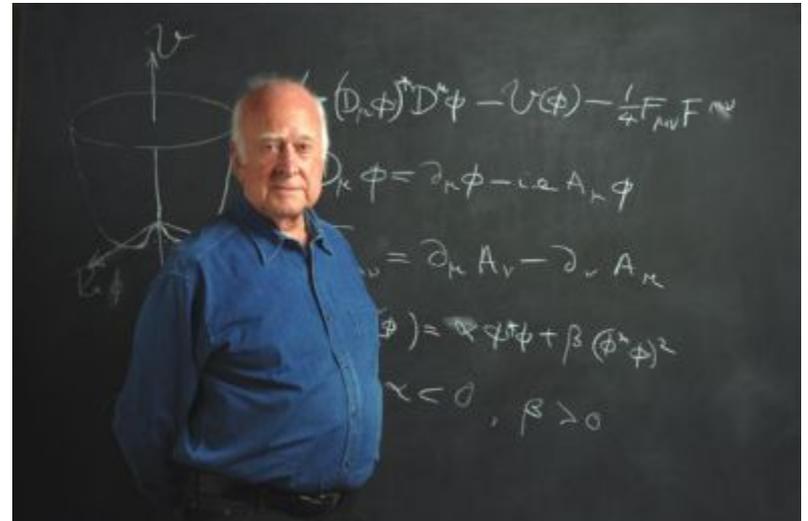
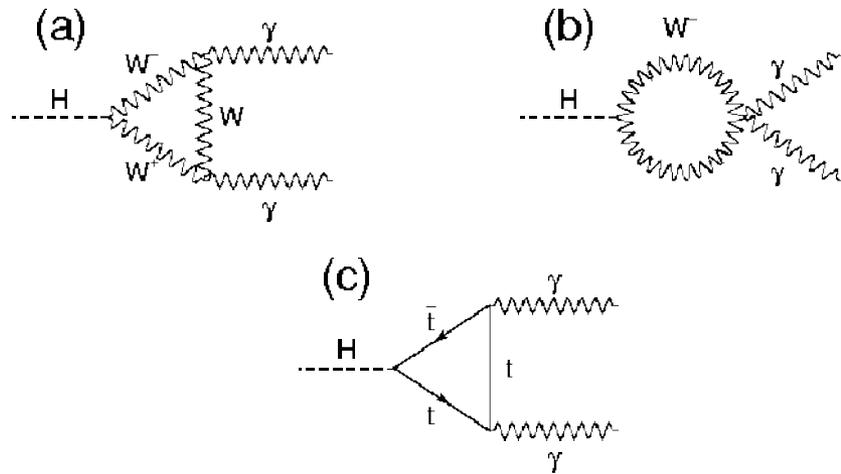




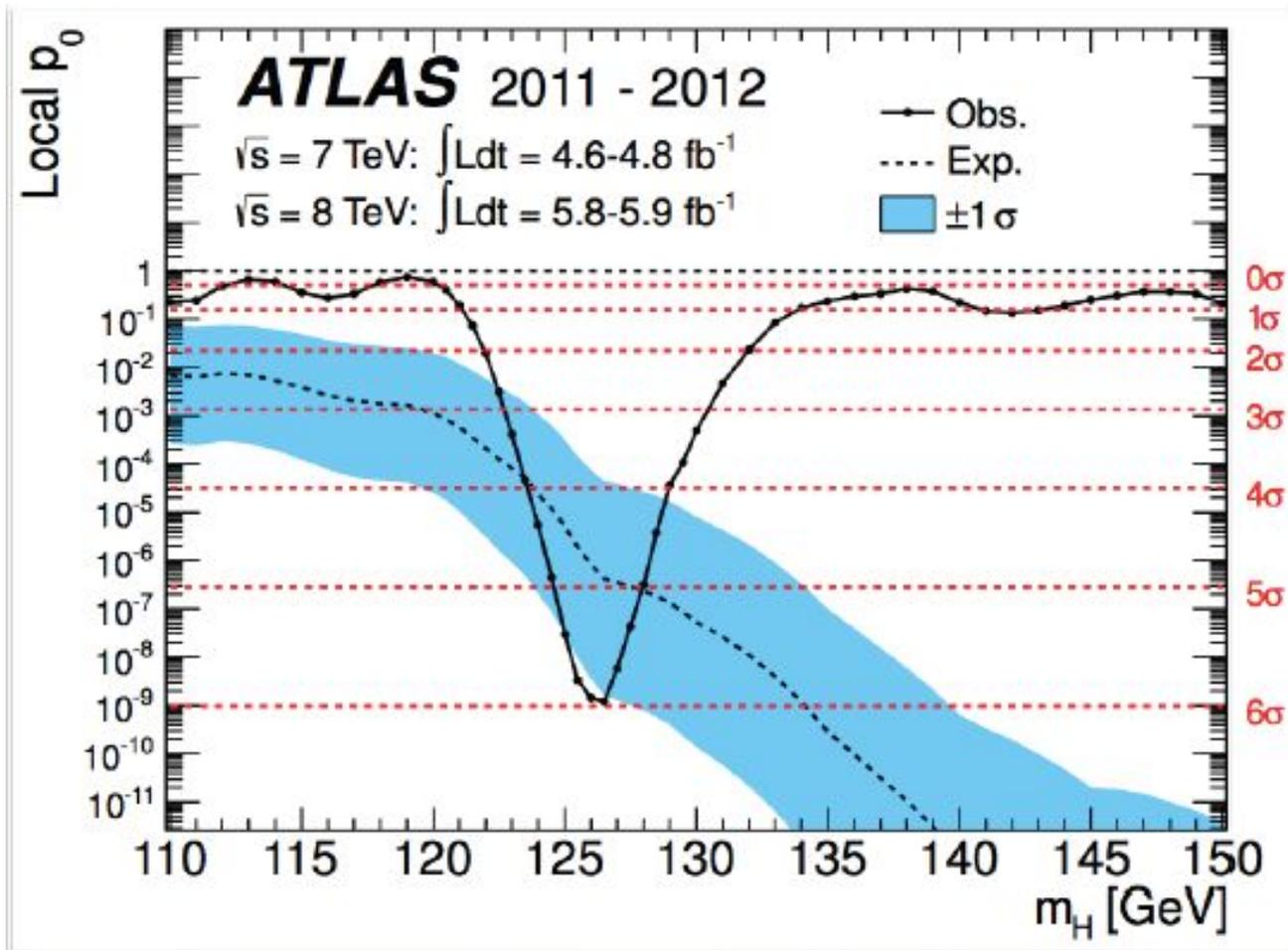
Quantity	$\psi(2S)$	X(3872)
Number of signal events	$3998 \pm 84$	$585 \pm 74$
Mass $M$ [MeV/c <sup>2</sup> ]	$3686.12 \pm 0.06$	$3871.96 \pm 0.46$
Resolution $\sigma$ [MeV/c <sup>2</sup> ]	$2.54 \pm 0.06$	$2.75 \pm 0.54$
Signal-to-noise ratio in $\pm 3\sigma$ window	1.5	0.15
Number of background events	$73\,064 \pm 286$	
Background parameter $c_0$	$8.00 \pm 0.13$	
Background parameter $c_1$ [MeV <sup>-1</sup> c <sup>2</sup> ]	$0.140 \pm 0.003$	

Адронный резонанс  
X(3872)

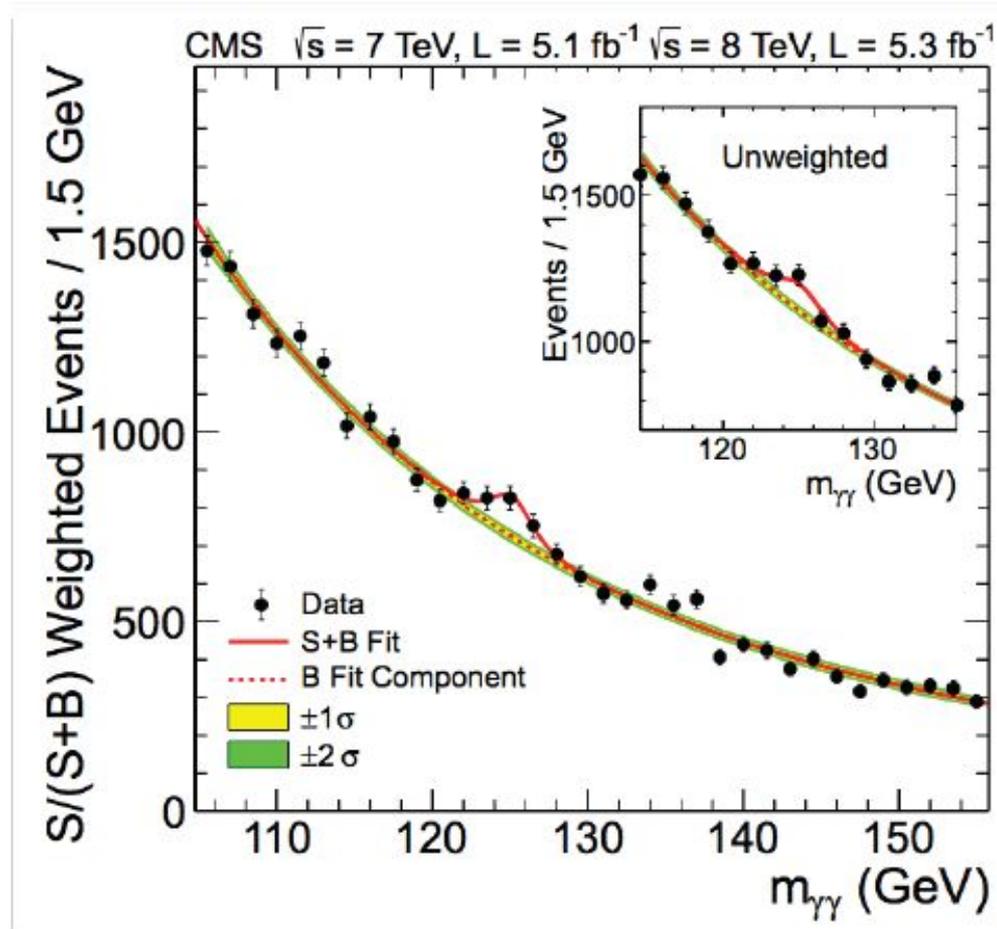
# В поисках бозона Хиггса



# В поисках бозона Хиггса – ATLAS

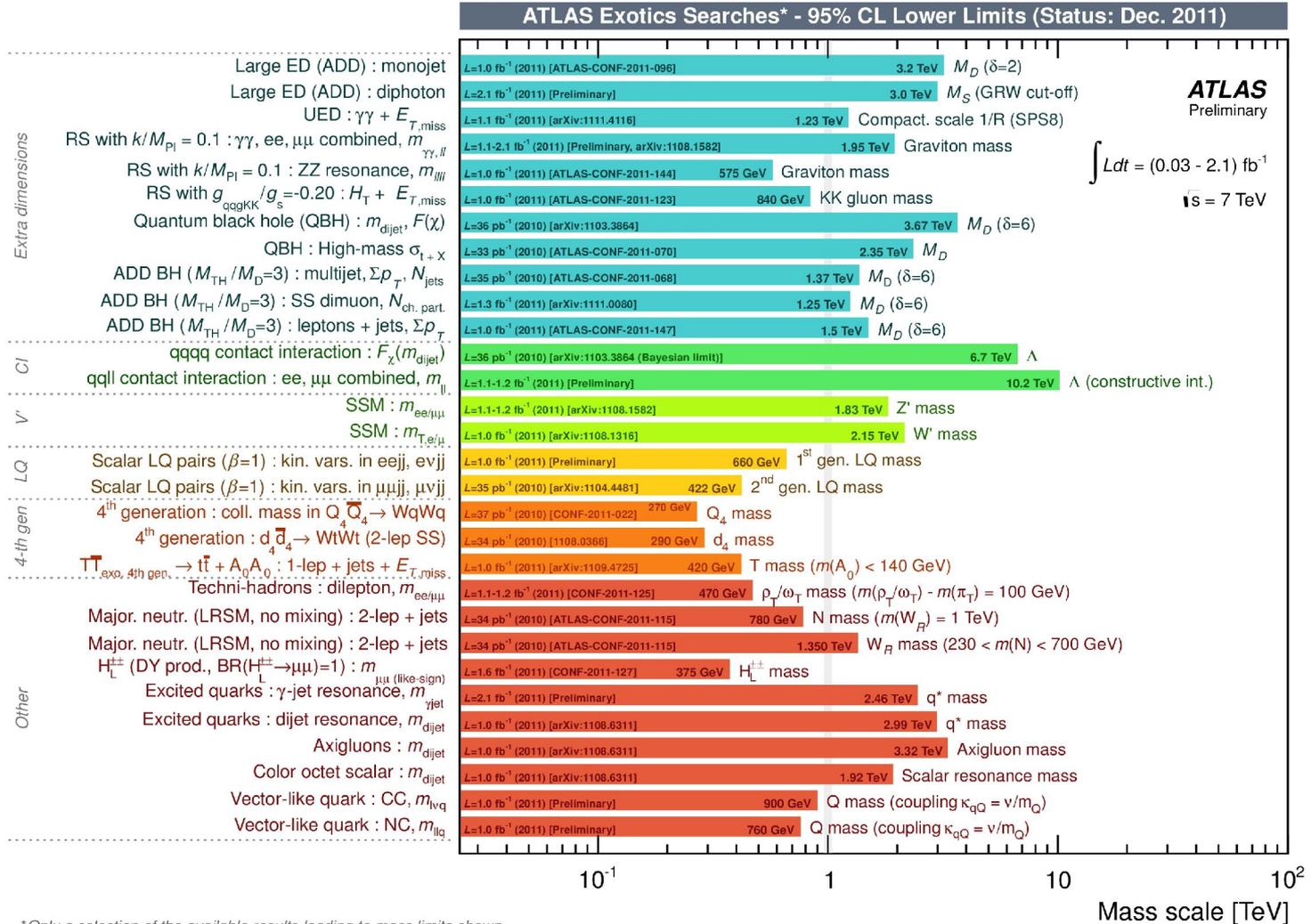


# В поисках бозона Хиггса – CMS



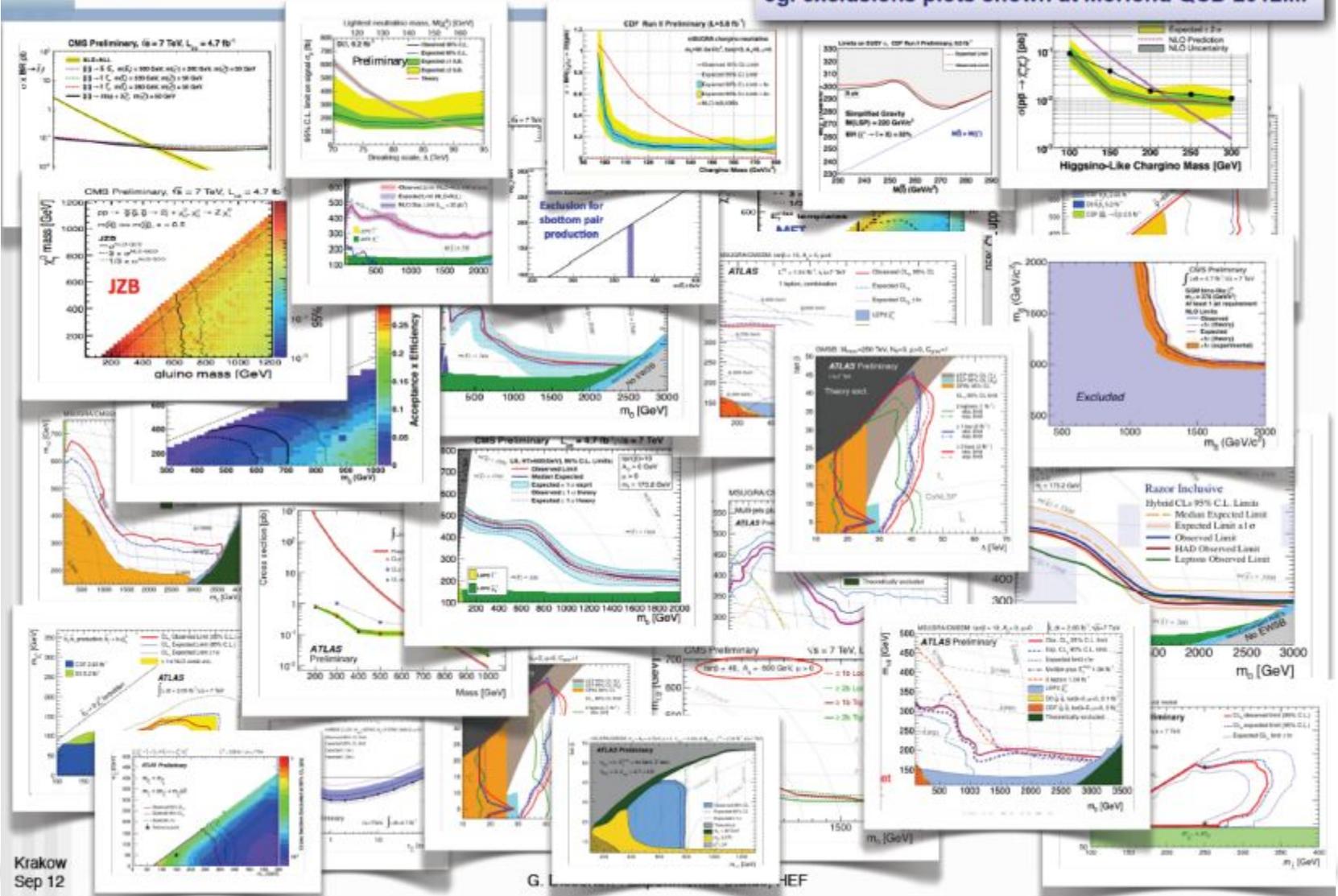
arXiv:1207.7235v1 [hep-ex]

# Как физики узнают о том, что чего-то нет



# We have searched....

eg. exclusions plots shown at Moriond QCD 2012....



## О чем мы сегодня говорили:

- материя окружающего нас мира построена из электронов, а также протонов и нейтронов, которые, состоят из кварков двух типов –  $u$  и  $d$
- также существуют более тяжелые кварки и лептоны других типов
- каждая частица может вести себя как особая волна – квантовая волна де Бройля, причем частота этой волны связана со фундаментальной константой Природы – постоянной Планка
- взаимодействия частиц, их свойства и симметрии изучают на ускорителях

## О чем мы сегодня **не** говорили:

- ядерная физика на LHC  
кварк-глюонная материя
- теории с дополнительными измерениями  
черные дыры
- поиски темной материи
- физика нейтрино
- ...

THERE ARE MORE THINGS  
IN HEAVEN AND EARTH,  
HORATIO,  
THAN ARE DREAMT OF IN  
YOUR PHILOSOPHY.

*HAMLET ACT 1,  
SCENE 5*

# Заклучение

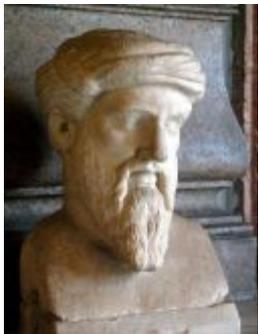


Все, что на волю Высшую согласно,  
Своею волей чуждую творит,  
И под личиной вещества бесстрастной  
Везде огонь Божественный горит.

*В.С.Соловьев*

**BACKUP**

# «научная картина мира» - люди



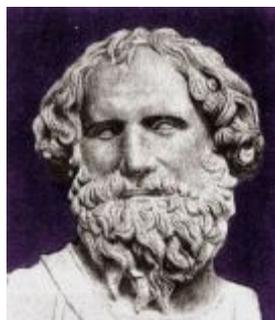
**Пифагор:** «Все есть число»



**Демокрит:** «Лишь в общем мнении существует цвет, в мнении — сладкое и горькое, в действительности же существуют только атомы и пустота»

**Архимед:**

«Дайте мне точку опоры, и я переверну мир»



**Галилей:** «Философия Природы записана в этой огромной книге, и написана она на языке математики»



**Ньютон:** «Гипотез не измышляю»



**Декарт:** «Мыслю – следовательно, существую»



## *«научная картина мира» - идеи*

- автономное существование объектов материального мира и связей между ними
- автономное существование математики
- предсказание, ставка, опровержимость

### **Проблема источника этики**

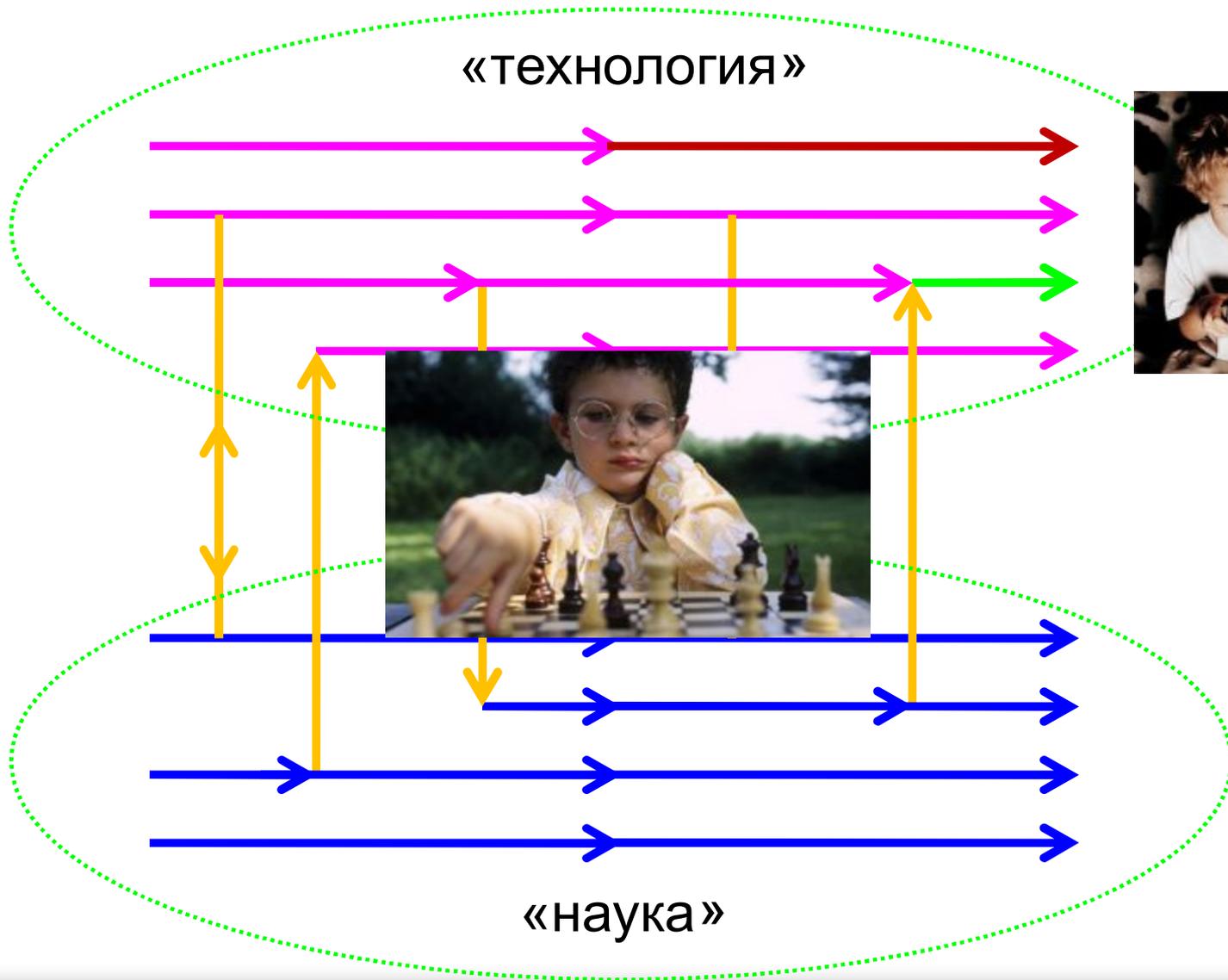
*Человек – часть материального мира?*

«ТЕХНОЛОГИЯ»

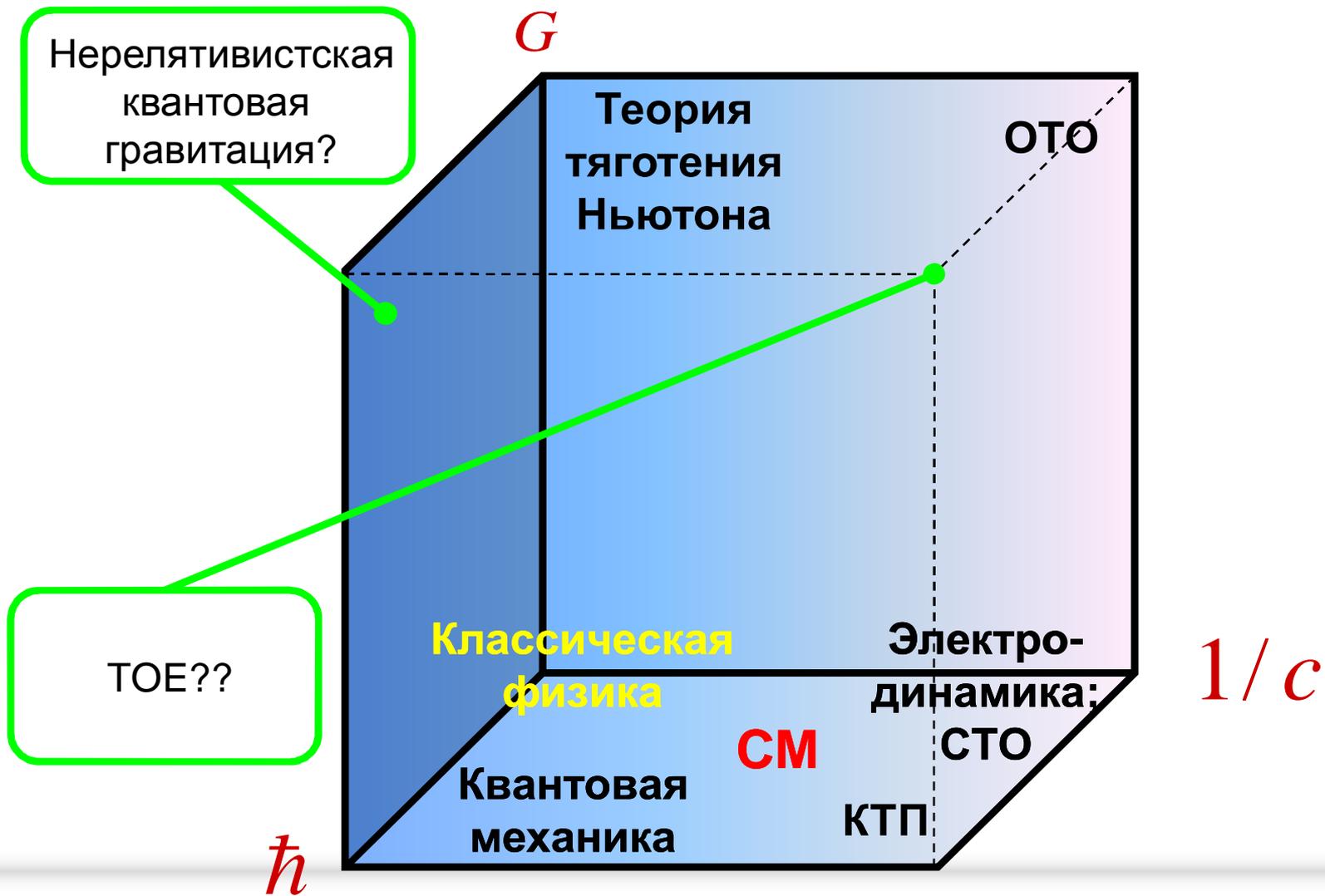
Бизнес



«наука»



# «Куб физических теорий» (А.Зельманов, М.Бронштейн)



В Стандартной Модели есть много малых параметров.  
Каждый из них дает потенциальную возможность  
построить по нему теорию возмущений.

- |  |  |                            |
|--|--|----------------------------|
| 1. Безразмерные константы взаимодействия           | $\alpha_{em}^{-1} = 137$                   | $\alpha_s^{-1}(M_Z) = 8.5$ |
| 2. Ранг цветовой калибровочной группы <b>SU(3)</b> | $1/9 = 1/3^2$                              |                            |
| 3. Массы кварков в единицах масштаба КХД           | $\frac{m_{u,d}}{\Lambda} = (0.5 \div 2)\%$ |                            |
| 4. Масштаб КХД в единицах электрослабого           | $G_F m_p^2 = 1 \cdot 10^{-5}$              |                            |
| 5. Константы Юкавы                                 | $\frac{m_e}{m_t} = 3 \cdot 10^{-6}$        |                            |
| 6. Параметры кваркового смешивания                 | $\lambda =  V_{us}  = 0.22$                |                            |
| 7. ...   |  |                            |

Многие важные малые параметры лежат за пределами СМ:

$$m_\nu$$

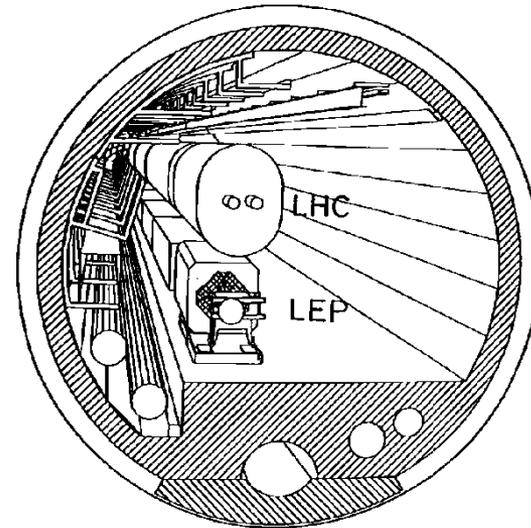
$$G_N m_p^2 = 6 \cdot 10^{-39}$$

# Долг путь современного HEP эксперимента ...

ECFA 94/03  
CERN 04-10  
5 September 1984

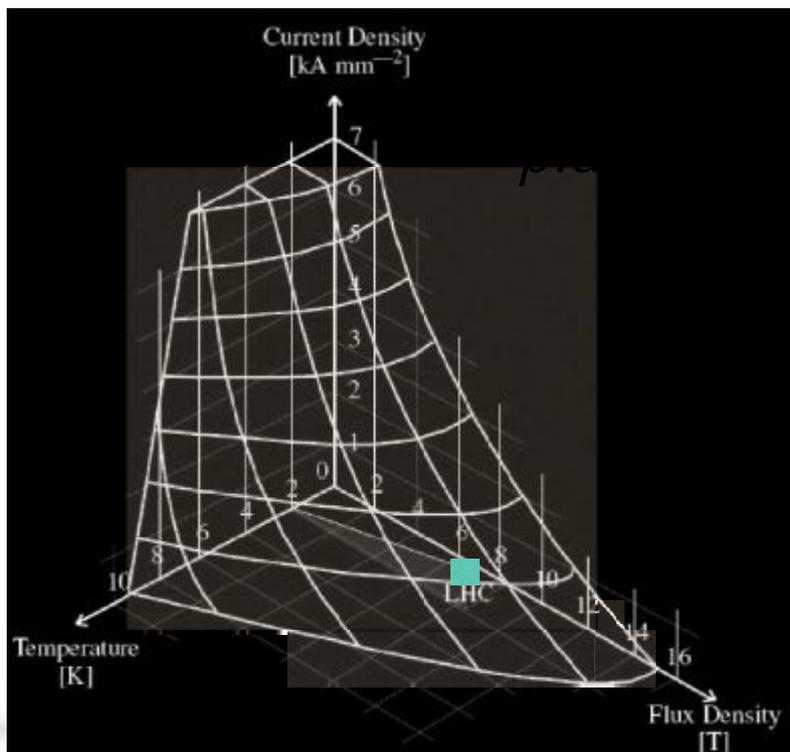
## The life of an experiment

- 1984** Workshop in Lausanne on installing a Large Hadron Collider (LHC) in the LEP tunnel
- 1987** CERN's long-range planning committee chaired by Carlo Rubbia recommends LHC as the right choice for lab's future
- 1989** ECFA Study Week on instrumentation technology for a high-luminosity hadron collider; Barcelona; LEP collider starts operation
- 1990** ECFA LHC workshop, Aachen
- 1992** General meeting on LHC physics and detectors, Evian-les-Bains
- 1993** Letters of intent for LHC detectors submitted
- 1994** Technical proposals for ATLAS and CMS approved
- 1998** Construction begins
- 2000** CMS assembly begins above ground; LEP collider closes
- 2003** ATLAS underground cavern completed and assembly started
- 2004** CMS cavern completed
- 2007** Experiments ready for beam
- 2007** First proton-proton collisions
- 2008** First results
- 2010** Reach design luminosity
- >2014** Upgrade LHC luminosity by factor of 10



# Магниты

Дипольные магниты из титан-ниобиевого сплава в медной оболочке – сверхпроводники под критической поверхностью



*the coolest  
in the Universe..*

1232 штуки, 0.5M CHF каждый

Поле **8.3 T** , ток **11700 A**

температура **1.9 K**

(холоднее, чем в космосе!),

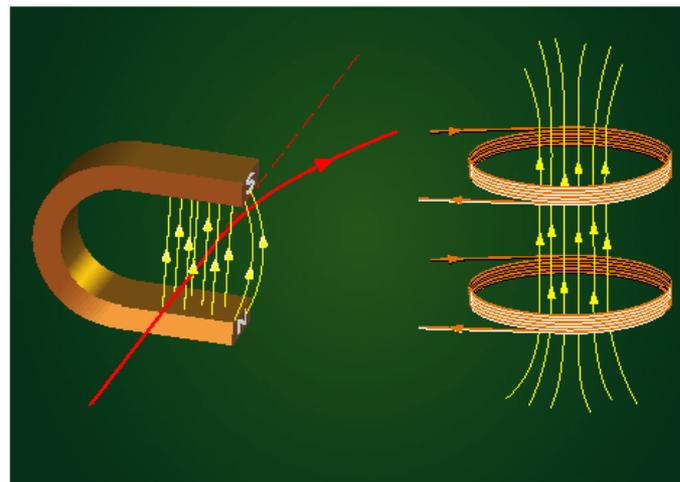
**700000** литров жидкого гелия

# Дипольные и квадрупольные магниты

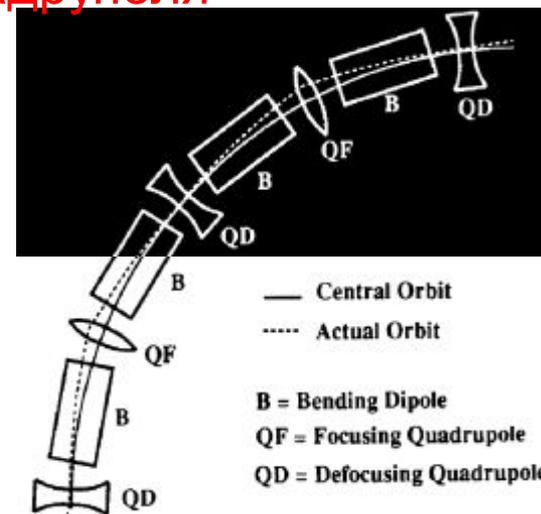
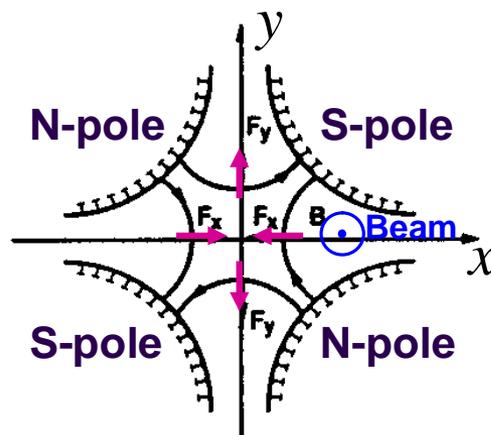
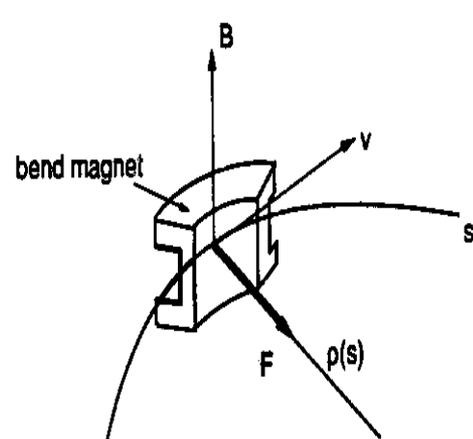
$$r \text{ [m]} \times B \text{ [T]} = 3.33 p \text{ [GeV]}$$

27 km, 2/3 покрыты полем дипольных магнитов  $r \sim 2800 \text{ m}$

$$p = 7 \text{ TeV} \quad B = 8.3 \text{ T}$$



1232 диполя и 392 квадруполя



Энергия, запасенная в магнитах – 10.4 GJ – это кинетическая энергия А380 на скорости 700 км/час. Достаточно, чтобы расплавить 15 тонн меди!