

# Эксперимент в физике частиц

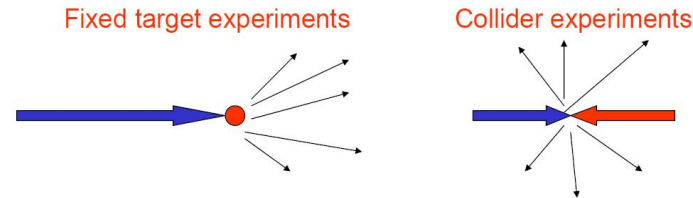
И.Р.Бойко

ОИЯИ

# Источники элементарных частиц

- Где мы можем изучать элементарные частицы?
  - Радиоактивные нуклиды (до  $10^7$  эВ)
  - Космические лучи (до  $10^{20}$  эВ)
  - Ускорители (до  $1.4 \times 10^{13}$  эВ,  $10^{14}$  эВ через ~40 лет)
- Типы ускорителей:
  - Пучок-по-мишени и коллайдеры
  - Кольцевые и линейные
  - Ускоряемые частицы: адроны и лептоны (в основном протоны и электроны, и их античастицы)
- Направления развития:
  - Максимальная энергия
  - Максимальная интенсивность (число частиц)

# Почему коллайдеры?



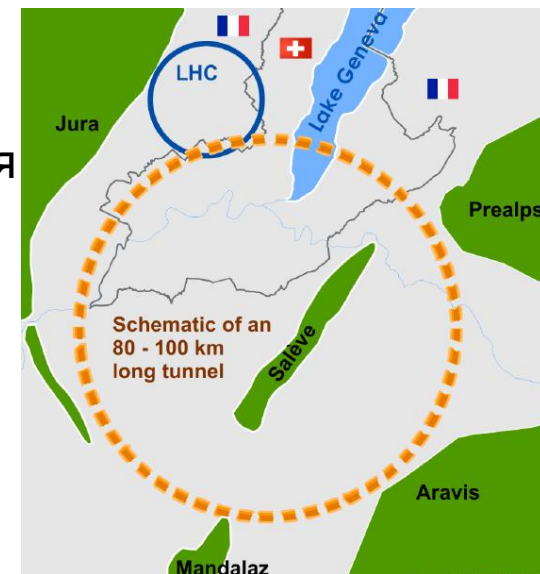
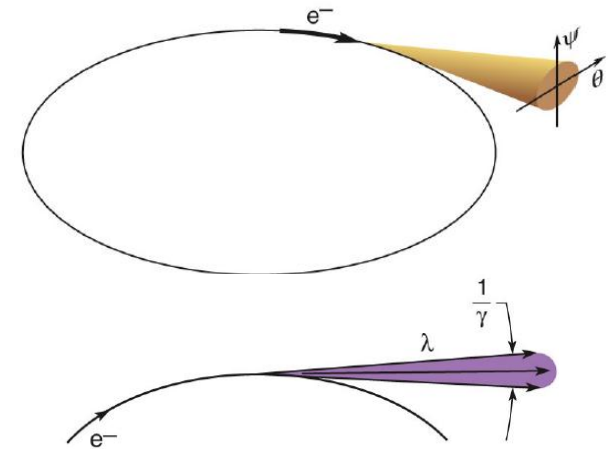
- Если пучок направлен в мишень, провзаимодействует каждая частица пучка. При «столкновении пучков» коллайдера взаимодействует ничтожная доля частиц. Почему же строят коллайдеры?
- **Энергия!** Почти вся энергия пучка уходит на бесполезное ускорение частицы мишени. Лишь ничтожная доля энергии используется для рождения новых частиц.
- При энергии пучка  $E$ , на коллайдере достижима энергия  $2E$ . На мишени же доступна всего лишь энергия  $\sqrt{2mE}$ , если частицы пучка и мишени идентичны
- Пример: при энергии протонов 1000 ГэВ на коллайдере доступно **2000 ГэВ**, на мишени же всего лишь **43 ГэВ**
- Поэтому строят именно коллайдеры, жертвуя интенсивностью столкновений (светимостью)

# СВЕТИМОСТЬ

- Важнейшие характеристики коллайдера – энергия и светимость.
- Светимость  $L$  – это количество столкновений, которые произошли бы, если бы частицы имели площадь (сечение)  $1 \text{ см}^2$ .
- Пример. Площадь протона – порядка  $0.05 \text{ барн}$  ( $1 \text{ бн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ). Следовательно, «светимость протонного коллайдера  $10^{34}$  в секунду» означает, что в секунду происходит  $500$  млн столкновений
- А если частица точечная, например электрон?
- Хотя частицы и точечные, они взаимодействуют даже не сталкиваясь лоб в лоб. Можно ввести «**эффективное сечение**», площадь «окрестностей» электрона, при столкновении которых произойдёт взаимодействие.
- Сечение даёт полное количество столкновений (взаимодействий). Но взаимодействия могут идти по разным каналам реакции. Можно ввести «сечение реакции», то есть долю полного сечения, которая приходится на данный канал реакции. Число событий в данном канале реакции:  $N = \sigma L$

# Ограничения

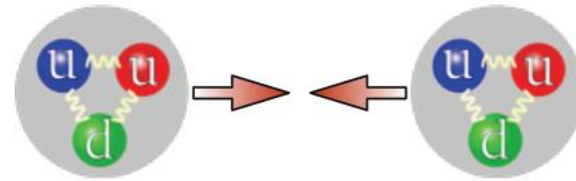
- При столкновении пучков взаимодействует лишь ничтожная доля частиц. Остальным можно дать второй шанс (и десятый, и тысячный), если сделать коллайдер кольцевым и циркулировать пучки по кругу (**накопительные кольца**)
- Испытывая центростремительное ускорение, электроны теряют энергию на тормозное излучение. Потери энергии растут как  $\sim (E/m)^4/R^2$ . Это ограничивает достижимую энергию коллайдера.
- Частичное решение – увеличить радиус кольца. Рекордный электрон-позитронный коллайдер имел длину 27 км, проекты следующего поколения предполагают уже 100 км (длина МКАД)
- Другое решение – **линейный коллайдер**, пожертвовать светимостью ради энергии.
- И ещё одно решение: сталкивать тяжёлые частицы (протоны). У них нет ограничения из-за излучения, достижимая энергия определяется числом и полем магнитов, которые удерживают частицу на круговой орбите



# Протонные и электронные коллайдеры



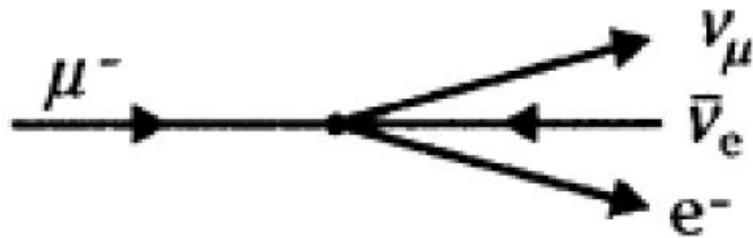
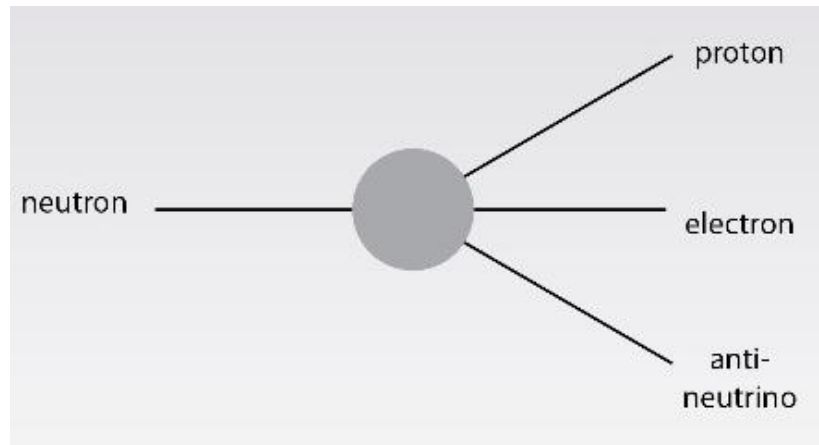
- Столкновения  $e^+e^-$
- Точечные частицы
- **Полная аннигиляция:** начальное состояние известно, в анализе можно использовать законы сохранения
- Небольшой уровень фона
- Ограничены по энергии, главное преимущество – **точность!**



- Столкновения  $p\bar{p}$
- Составные частицы
- Сталкиваются лишь 2 партона из многих, используется (обычно) лишь малая часть энергии пучков, а главное – эта часть **случайная и неизвестная**
- Очень высокий фон
- Достижимы очень высокие энергии, главное преимущество – **открытия!**

Что мы знали до  
коллайдеров?

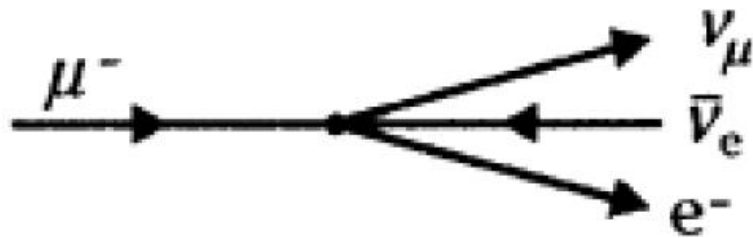
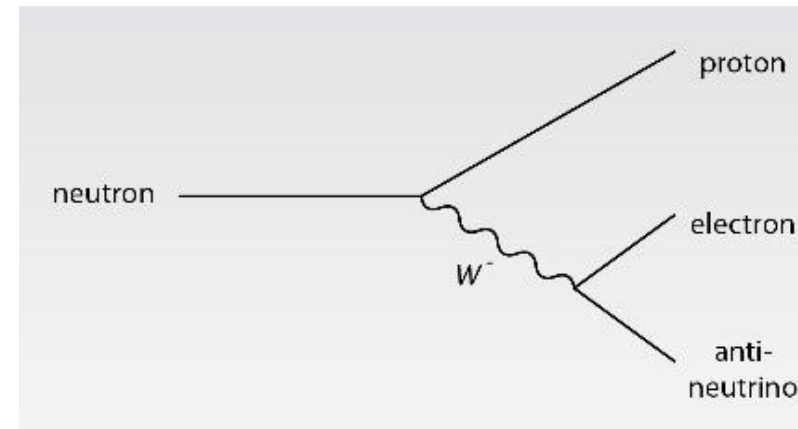
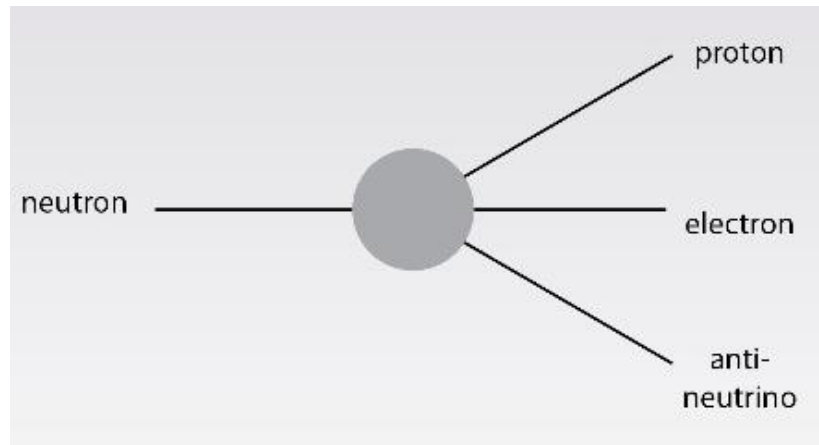
# С чего начиналась теория



**Теория Ферми:  
4-фермионное взаимо-  
действие в общей вершине**



# С чего начиналась теория



**Теория Ферми:  
4-фермионное взаимо-  
действие в общей вершине**

**Стандартная Модель:  
дальнодействующее  
взаимодействие, пере-  
носимое векторными  
бозонами ( $\gamma/W/Z/g$ )**

# Масса переносчиков взаимодействия

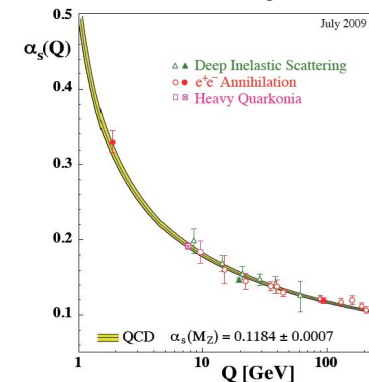
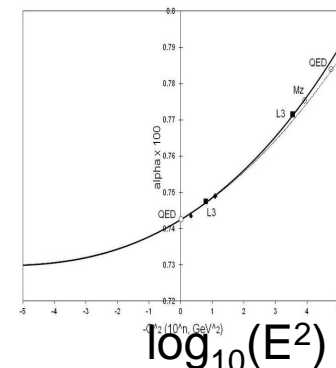
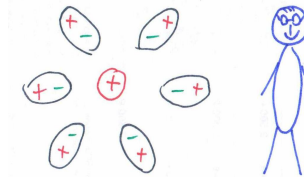
- Из времени жизни мюона была прекрасно известна «сила» слабого взаимодействия - постоянная Ферми:  
 $G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$   
 $\tau_\mu = \frac{192\pi^3}{G_F^2 m_\mu^5}$
- Это определяет по порядку величины массу переносчика взаимодействия:  $M \sim 1/\sqrt{G_F} \sim 300 \text{ ГэВ}$
- Фактически это означает, что слабое взаимодействие не является «слабым», оно кажется таким из-за того, что в экспериментах при  $E \sim 1 \text{ ГэВ}$  трудно родить 100-ГэВный переносчик. При достаточно высоких энергиях слабое взаимодействие становится порядка электромагнитного
- Проблема: калибровочная симметрия запрещает переносчику взаимодействия иметь **ненулевую массу!**

# Создание новой теории

- 1964: Хиггс (при участии других групп) предложил механизм, позволяющий ввести в калибровочную теорию массивные переносчики взаимодействия
  - Нобелевская премия 2013
- 1967: Глэшоу, Вайнберг и Салам создают Стандартную Модель на основе хиггсовского механизма
  - Нобелевская премия 1979
- 1971: т'Хуфт и Вельтман доказали перенормируемость теорий, использующих хиггсовский механизм
  - Нобелевская премия 1999

# Перенормируемость

- Поле  $q/R^2$  для точечной частицы устремляется к бесконечности при  $R=0$ . Наблюдателю на конечном расстоянии казалось бы нет до этого дела. Но...
- В сверхсильном поле рождаются (и исчезают) пары виртуальных частиц. Облако этих пар экранирует заряд частицы.
- Например, заряд электрона «издалека» кажется  $1/137$ . Если провести эксперимент при  $100$  ГэВ, т.е. приблизиться на  $10^{-17}$  см, то будет «казаться» уже  $1/129$ . При энергии Великого Объединения ( $10^{16}$  ГэВ) он станет уже  $1/60$  и сравняется с константой сильного взаимодействия.
- Теория должна уметь вычислять такие «квантовые поправки». КЭД – умеет.
- Т'Хуфт и Вельтман сделали это для Стандартной Модели

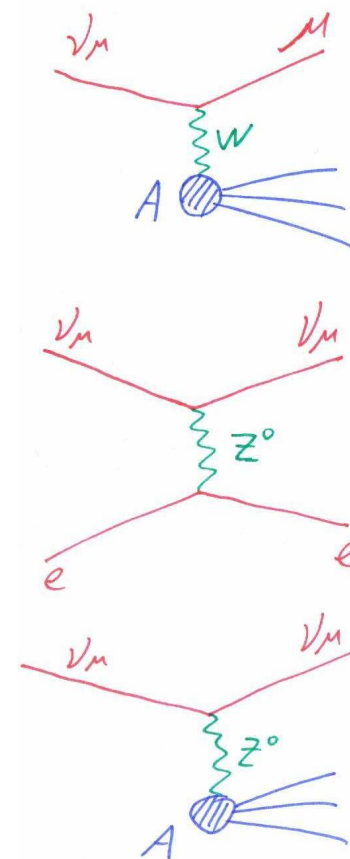


# Масса переносчиков взаимодействия (II)

- Ранее приведённая формула  $M_W \sim 1/\sqrt{G_F} \sim 300$  ГэВ была сильно приближённой
- На самом деле: 
$$M_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{G\sqrt{2}} \frac{1}{\sin\theta_W}} \quad \cos\theta_W = \frac{M_W}{M_Z}$$
- Угол Вайнберга пришёл к нам из ранней Вселенной, он описывает смешивание безмассовых переносчиков взаимодействия, до того как они обрели массу по механизму Хиггса
- Какой же угол подставлять в формулу??
- Например, при  $\theta_W=45^\circ$ , получим  $M_W=53$  ГэВ
- Однако неопределённость – вплоть до бесконечности

# 1973: Открытие нейтральных токов и измерение угла Вайнберга

- Стандартная Модель предсказала существование **нейтральных токов**.
- При низких энергиях их можно изучать только на нейтринных пучках, т.к. при  $E < M_Z$  электромагнитное взаимодействие на много порядков больше
- **Заряженный ток**: нейтрино превращается в мюон (мюон «внезапно появляется»)
- **Нейтральный ток**: нейтрино рассеивается «квазиупруго» - либо ниоткуда «внезапно появляется» электрон, либо осколки ядра (и ничего более)

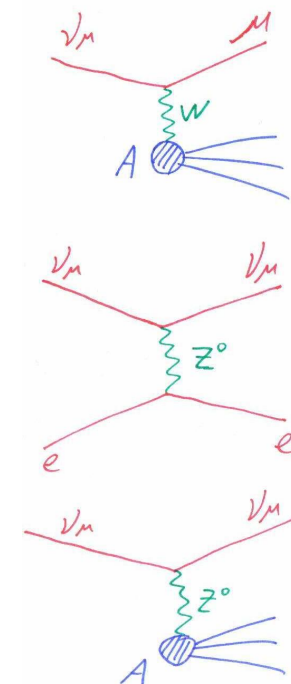
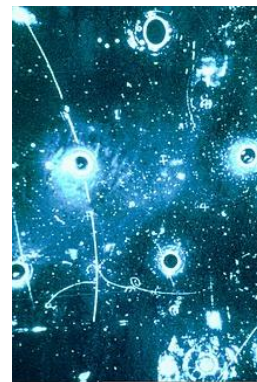


# 1973: Открытие нейтральных токов и измерение угла Вайнберга

- Пузырьковая камера Gargamelle (CERN) обнаружила несколько сотен событий нейтрального тока
- Стандартная Модель предсказывает отношение:

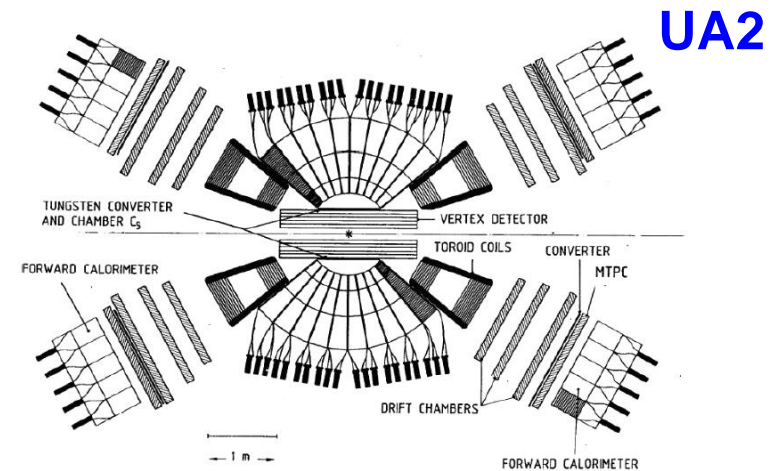
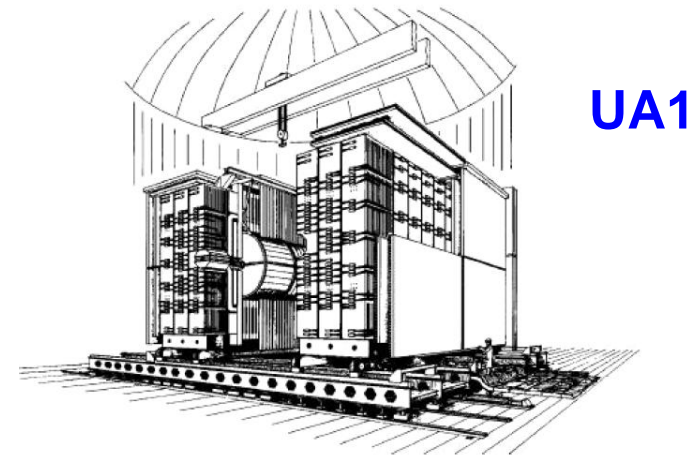
$$1/2 - \sin^2\theta = \frac{NC - \overline{NC}}{CC - \overline{CC}}$$

- Результат Gargamelle:  
 $NC/CC=0.21\pm 0.03$ ,  $(NC/CC)_{\text{bar}}=0.45\pm 0.09$
- Отсюда:  $\sin^2\theta_W = 0.35\pm 0.05$
- Современное значение:  $0.2232$
- Подставляя в формулы величину Gargamelle, получим:  $M_W=63\text{ГэВ}$
- Нобелевская премия: 1979



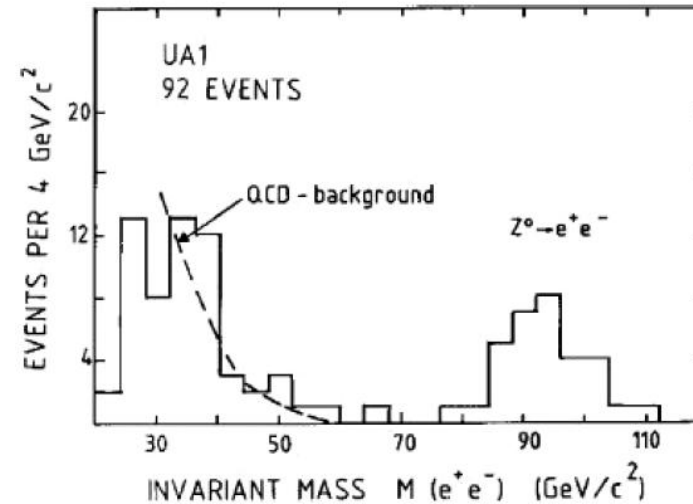
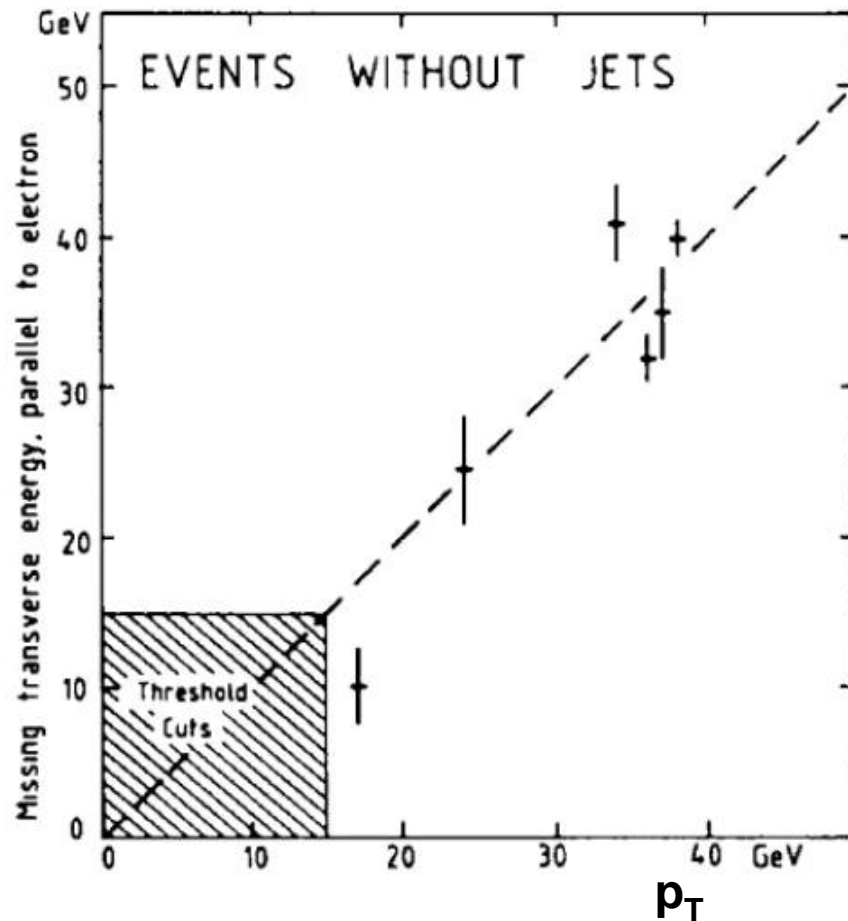
# Протон-антипротонный коллайдер SppS

- После предсказания масс  $W$  и  $Z$  бозонов стало ясно, что они могут быть открыты в CERN, если переоборудовать ускоритель SPS (450 ГэВ) в коллайдер (450+450 ГэВ).



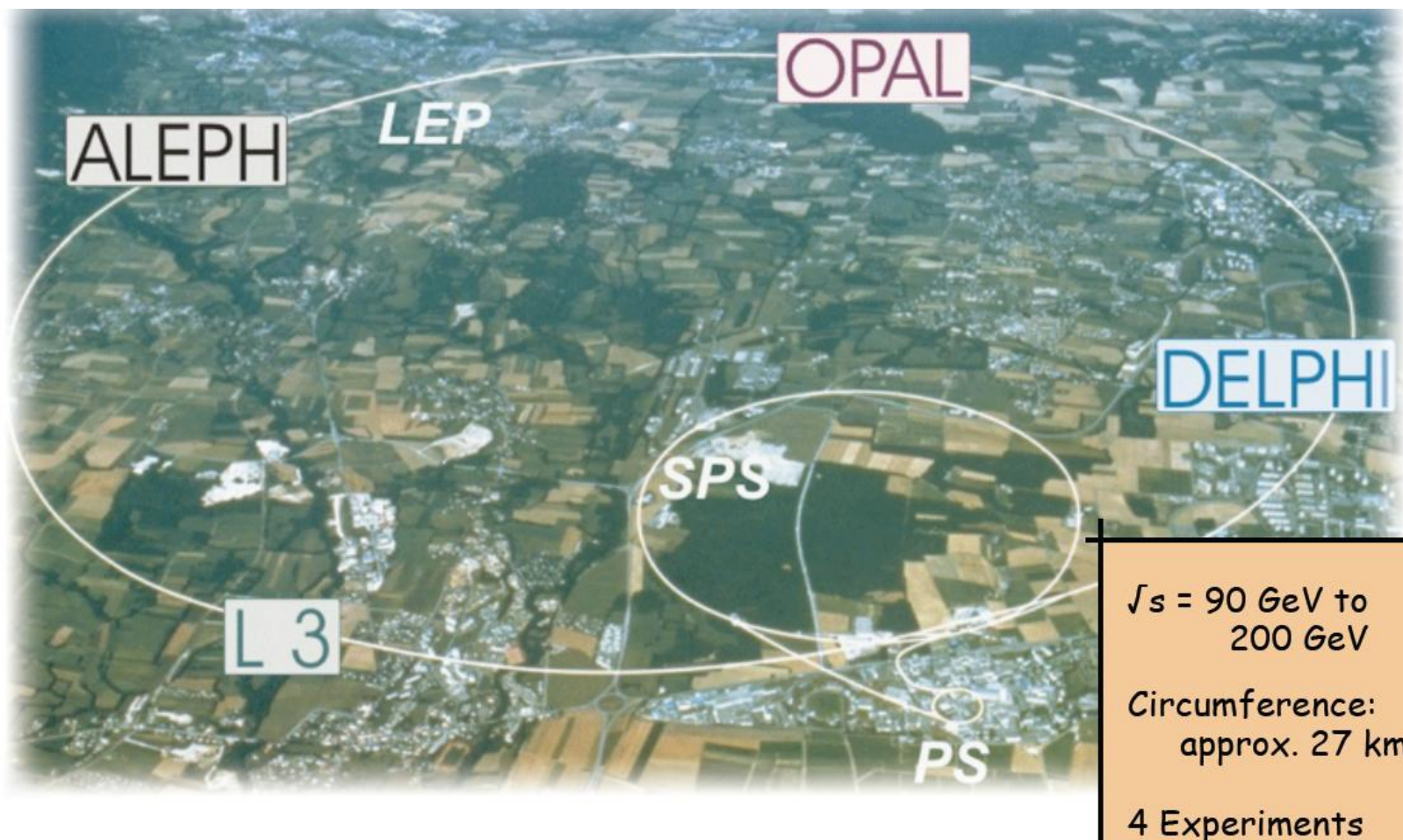


# Открытие $W \rightarrow e\nu_e$ и $Z \rightarrow ee$



- $M_W = 82.7 \pm 2.9$  ГэВ
- $M_Z = 93.1 \pm 3.3$  ГэВ
- Современные значения:  
80.35 и 91.187 ГэВ
- Открытие: 1982-83
- Нобелевская премия: 1984

# Электрон-позитронный коллайдер LEP (CERN)



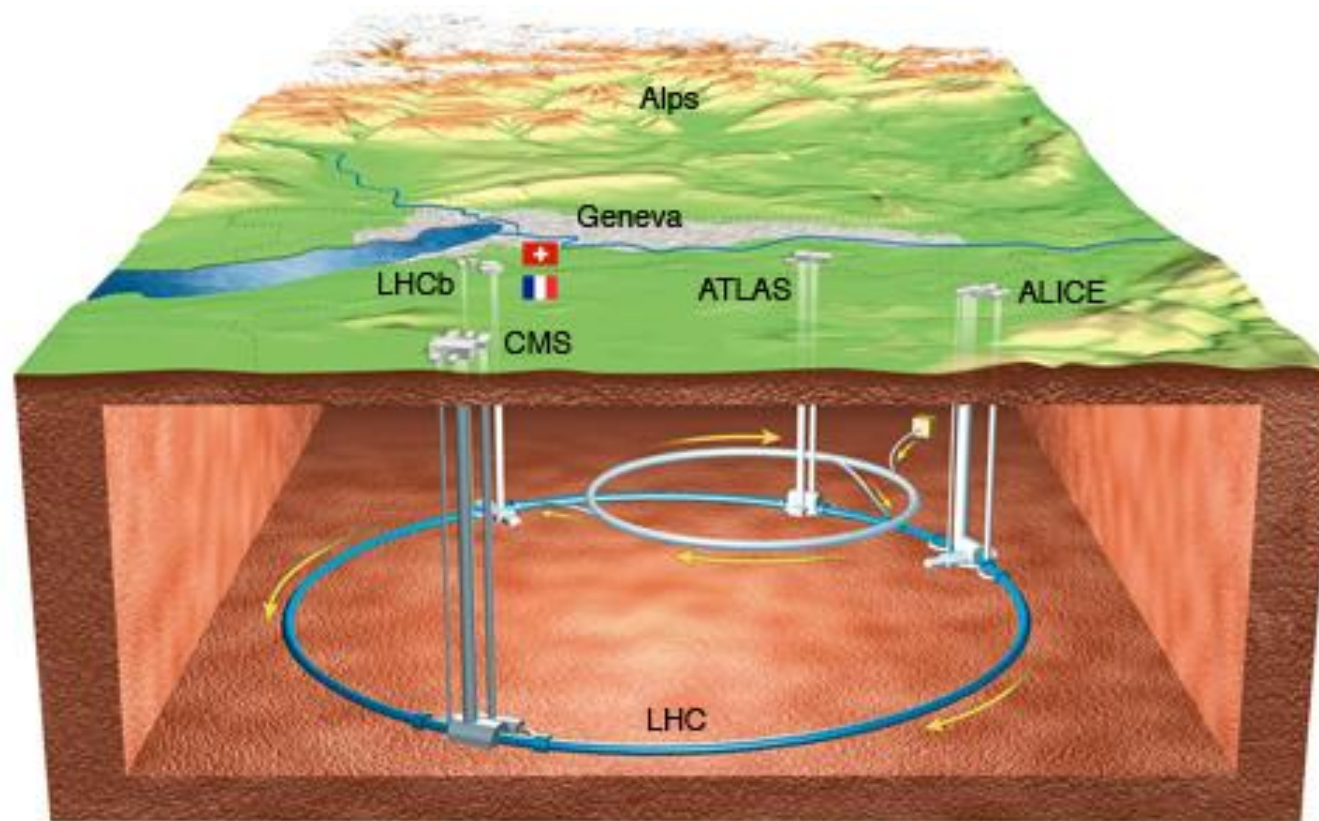
# Теперь в этом кольце LHC



# Вид с другой стороны



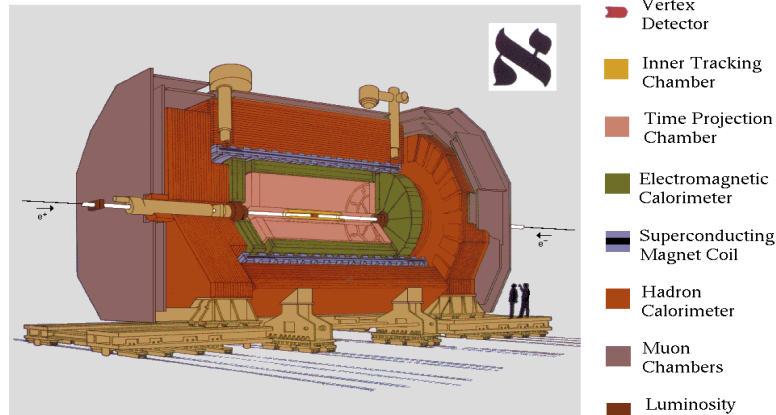
# Всё это на минус 100 метрах



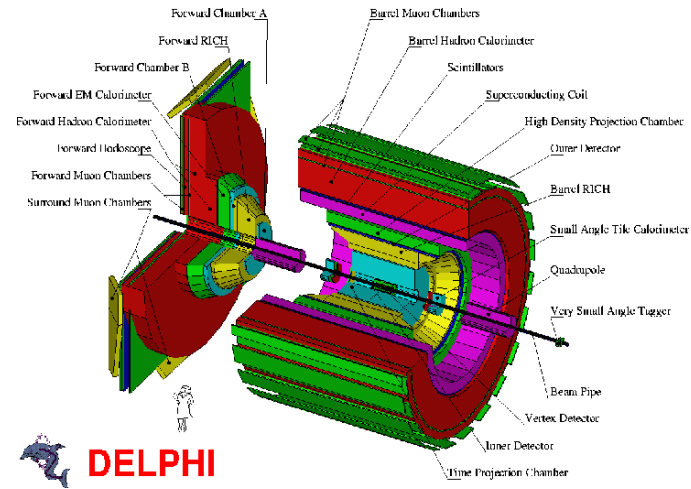
# Задачи LEP

- Первая фаза LEP-1 (1989-1995): работа при энергии около 91 ГэВ. Сверхточное измерение свойств Z-бозона и других параметров электрослабой теории
- Вторая фаза LEP-2 (1995-2000): работа при максимально достижимых энергиях (до 209 ГэВ). Поиск Хиггс-бозона и новой физики. Изучение W-бозона ( $ee \rightarrow WW$ )

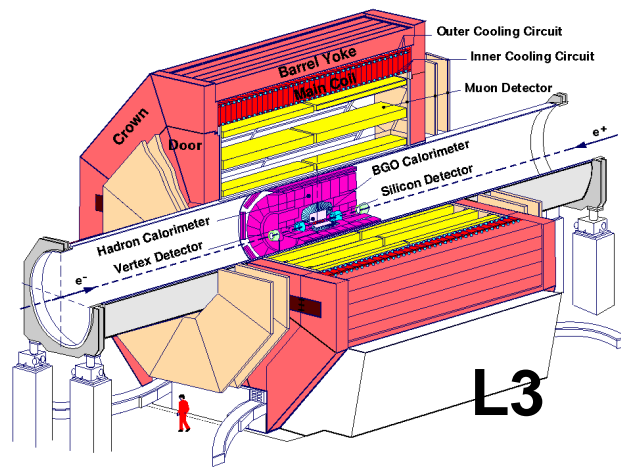
# Экспериментальные установки на LEP



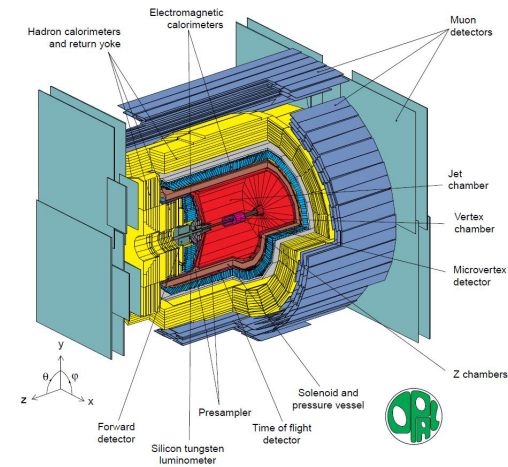
The ALEPH Detector



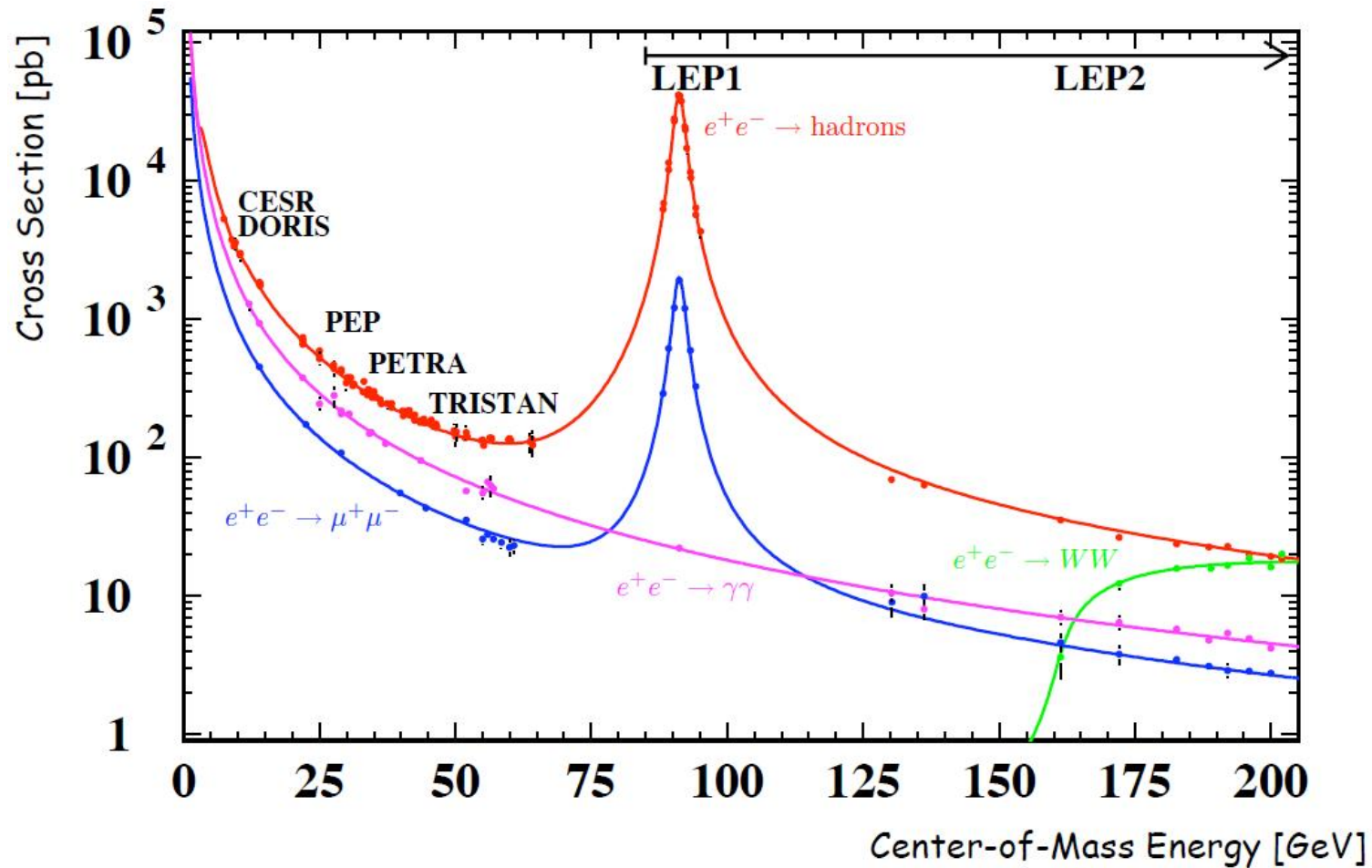
DELPHI



L3



# Сечение $e^+e^-$ аннигиляции



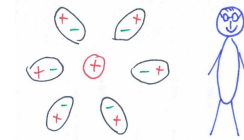
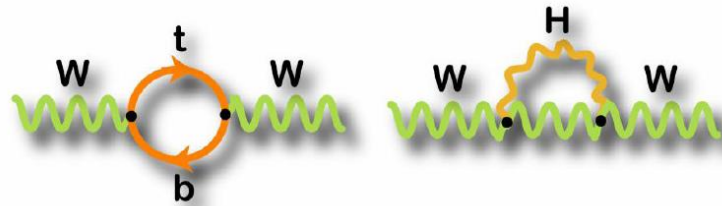


# Электрослабые измерения

- LEP:
  - $M_Z=91.187$  ГэВ,  $M_W=80.37$  ГэВ,  $\sin^2\theta_W=0.2232$
- Подставим синус в формулу
- Получаем:  $M_W=78.9$  ГэВ
- Вспоминаем, что при высоких энергиях заряд электрона меньше экранируется виртуальными частицами. Заменяем  $\alpha=1/137$  на  $1/129$ .
- Получаем:  $M_W=81.3$  ГэВ (современное значение: 80.35)
- Эта нестыковка – электрослабые квантовые поправки

$$M_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{G\sqrt{2}} \frac{1}{\sin\theta_W}}$$

# Квантовые поправки

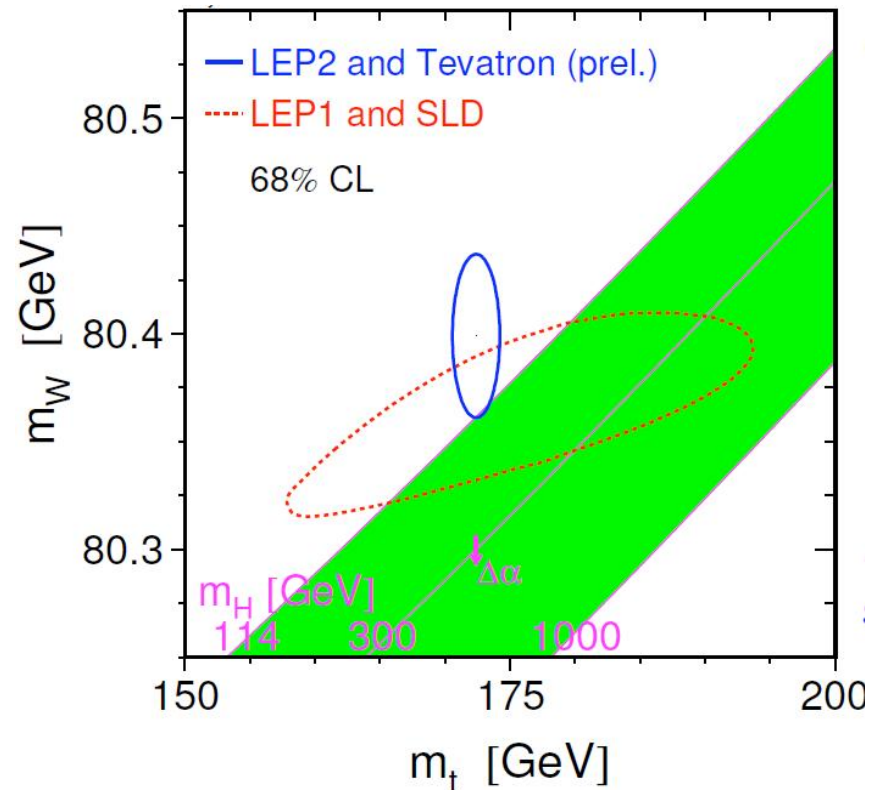


$$\rho = \frac{M_W^2/M_Z^2}{1 - \sin^2\Theta_W} =$$
$$= 1 + \frac{3G_F}{8\pi^2\sqrt{2}}m_t^2 + \frac{\sqrt{2}G_F}{16\pi^2}m_t^2 \left[ \frac{11}{3}\ln\left(\frac{M_H^2}{M_W^2}\right) + \dots \right] + \dots$$

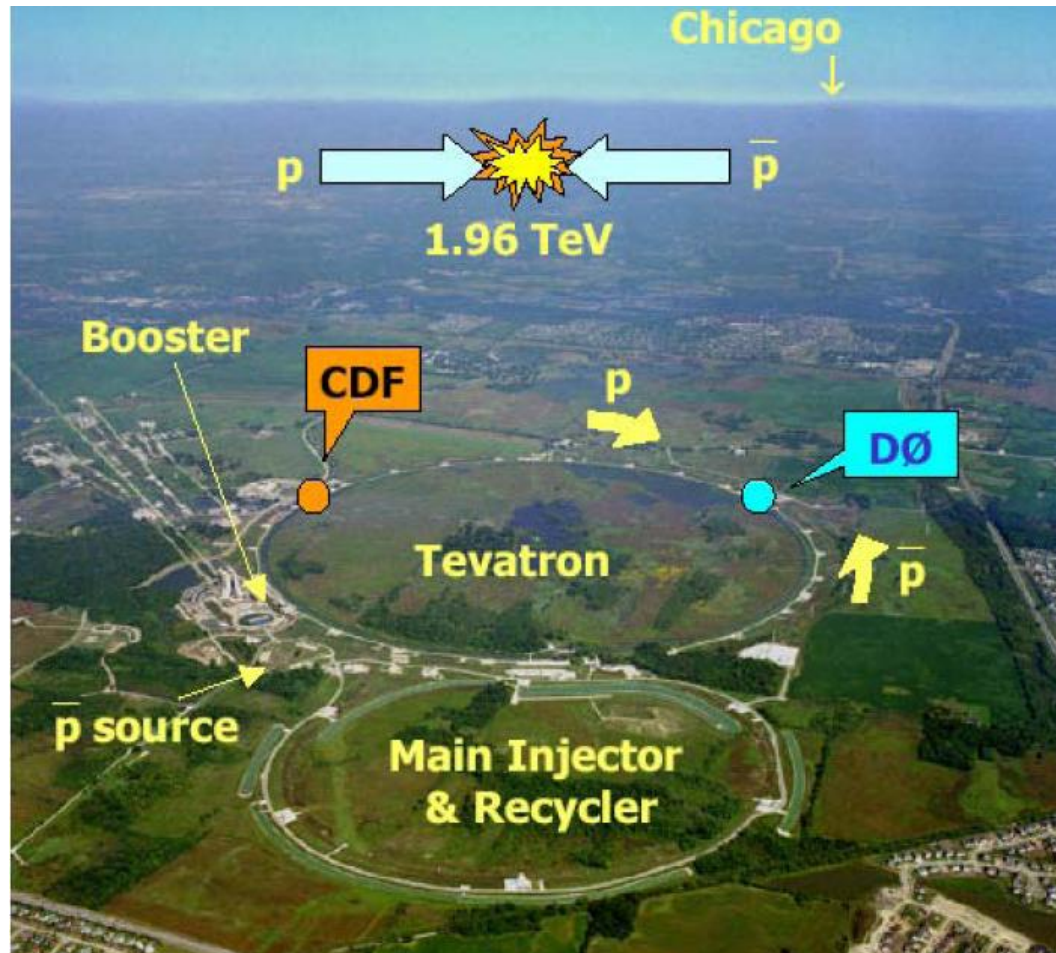
- Изучая W и Z бозоны – мы с некоторой вероятностью «натываемся» на виртуальные топ-кварк и Хиггс-бозон
- Это позволяет косвенно оценить свойства t и H, хоть они и не рождаются в виде реальных частиц

# Косвенные оценки $m_t$ и $M_H$

- Данные LEP позволили через квантовые поправки оценить массы топ-кварка и Хиггс-бозона
- $m_t = 170 \pm 15$  ГэВ (современное значение:  $172.5 \pm 1$  ГэВ)
- $M_H < 161$  ГэВ, а с учётом прямого поиска  $114 < M_H < 161$  ГэВ (современное значение  $125.1 \pm 0.2$  ГэВ)
- Эти данные дали чёткое указание для поисков  $t$  и  $H$  на Теватроне и LHC

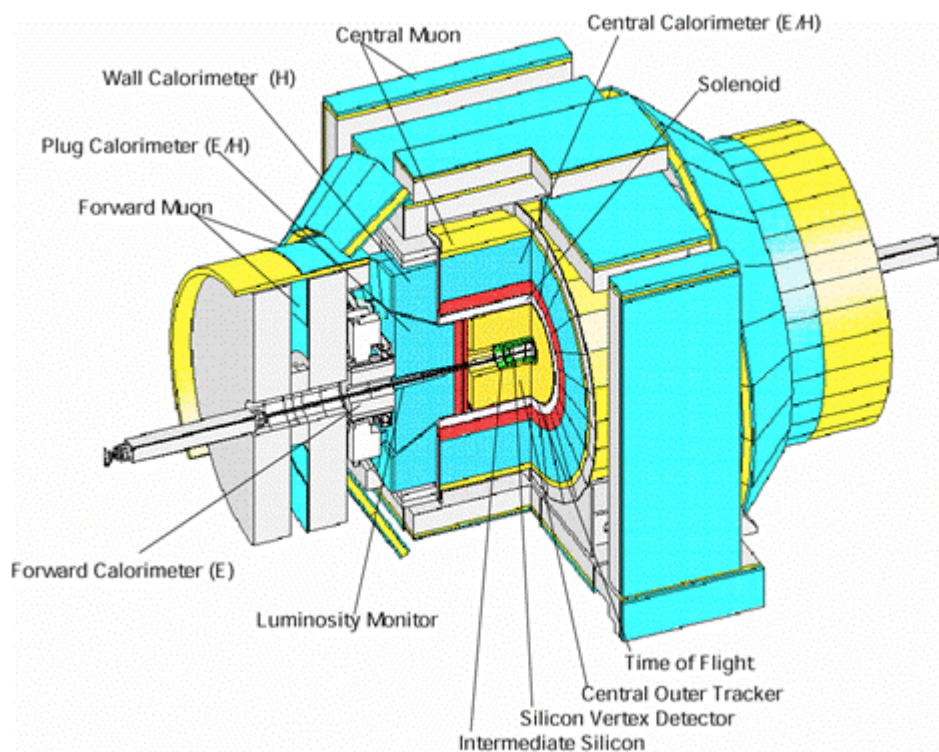


# Коллайдер Теватрон (Фермилаб)

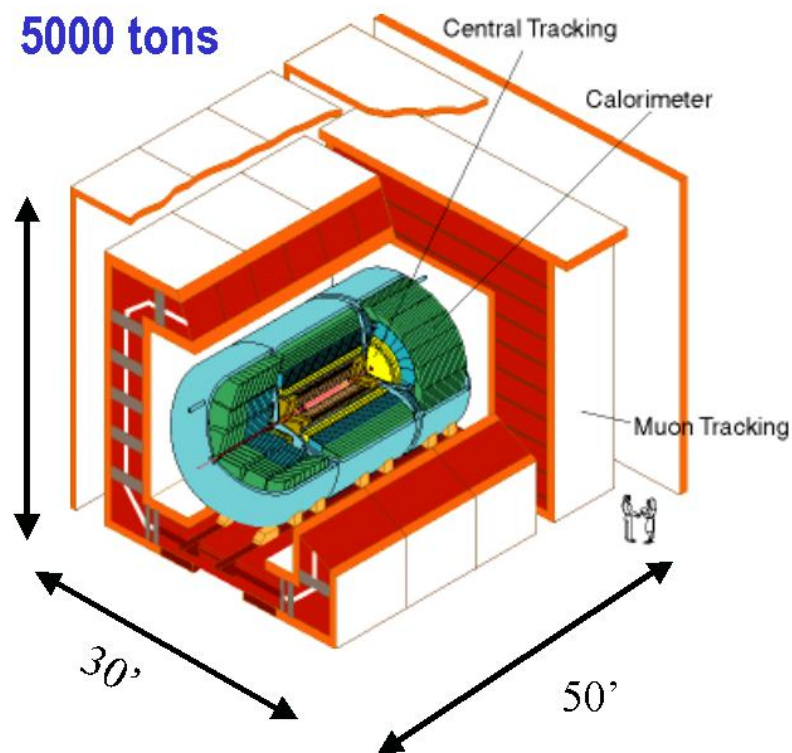


# Экспериментальные установки на Теватроне

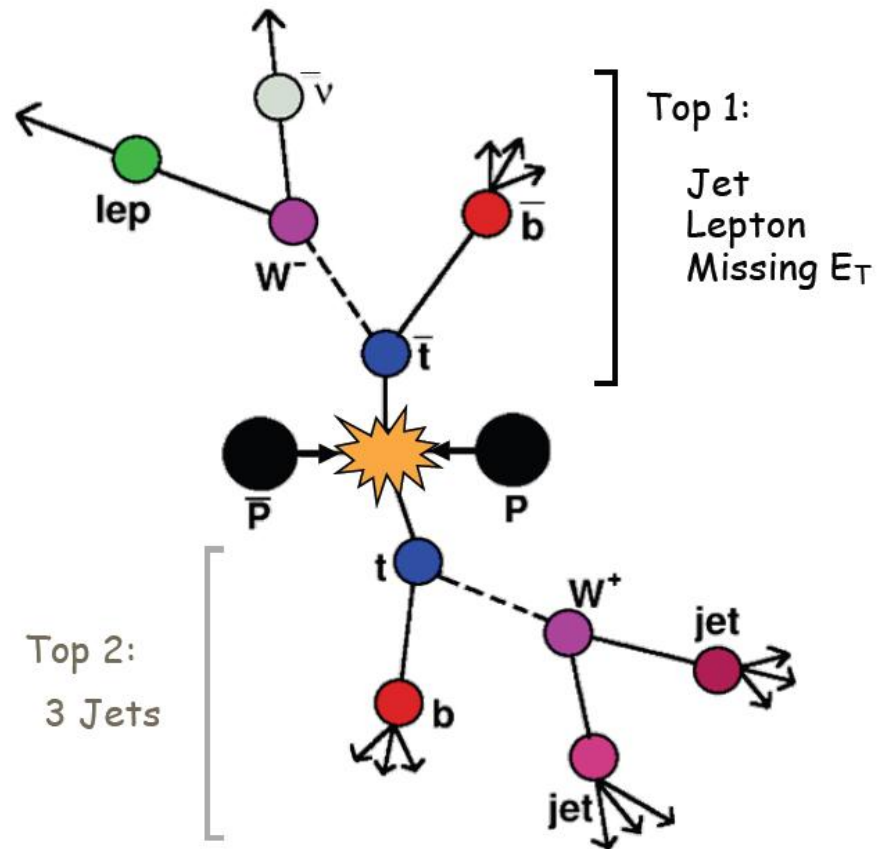
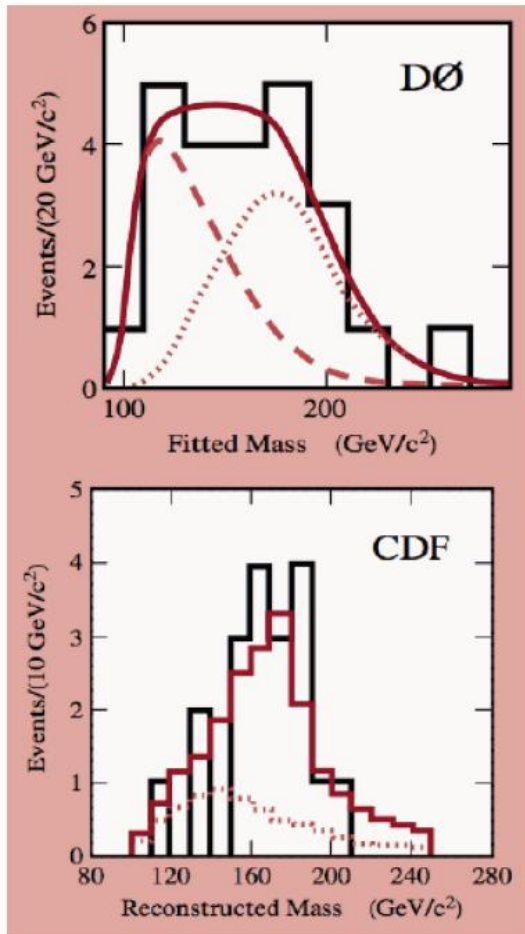
## CDF



## D0



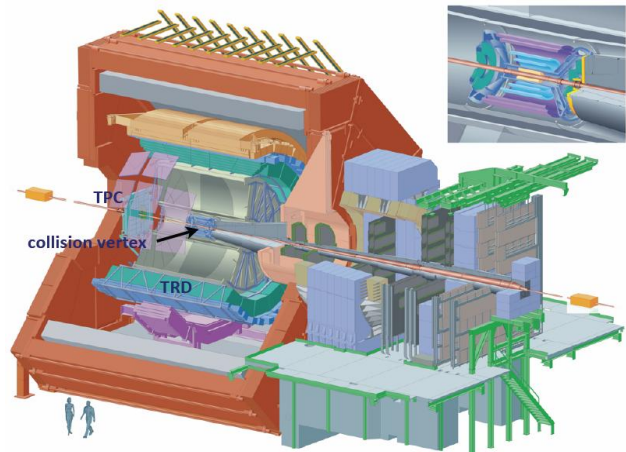
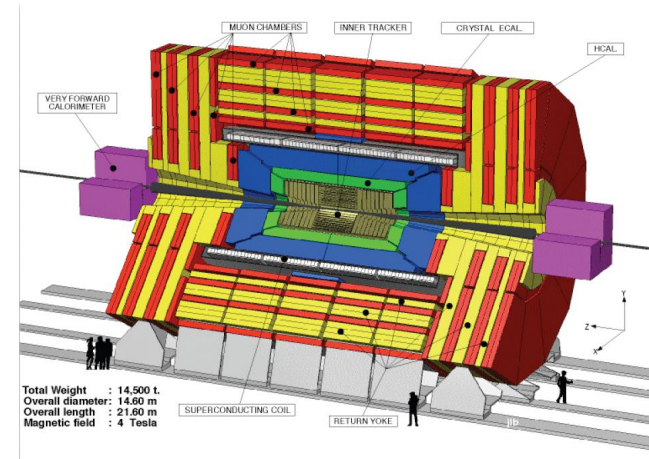
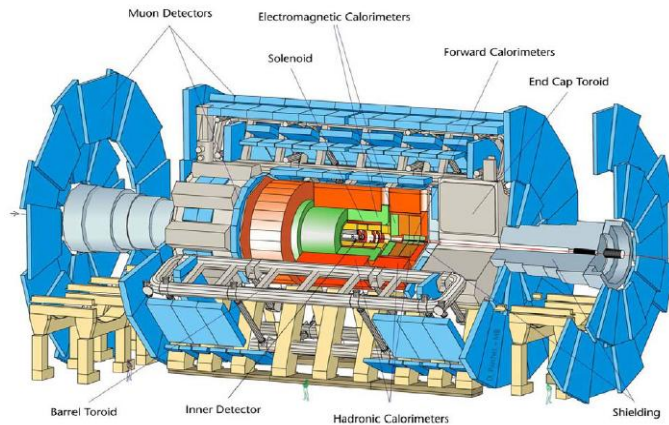
# Открытие топ-кварка (1995)



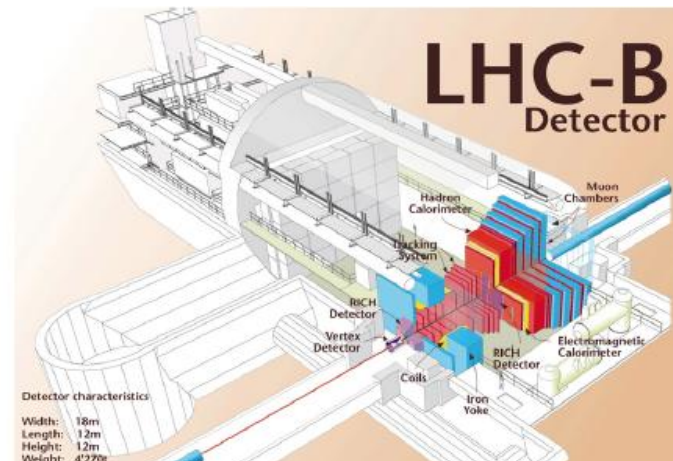
# Коллайдер LHC (CERN)



# Экспериментальные установки на LHC

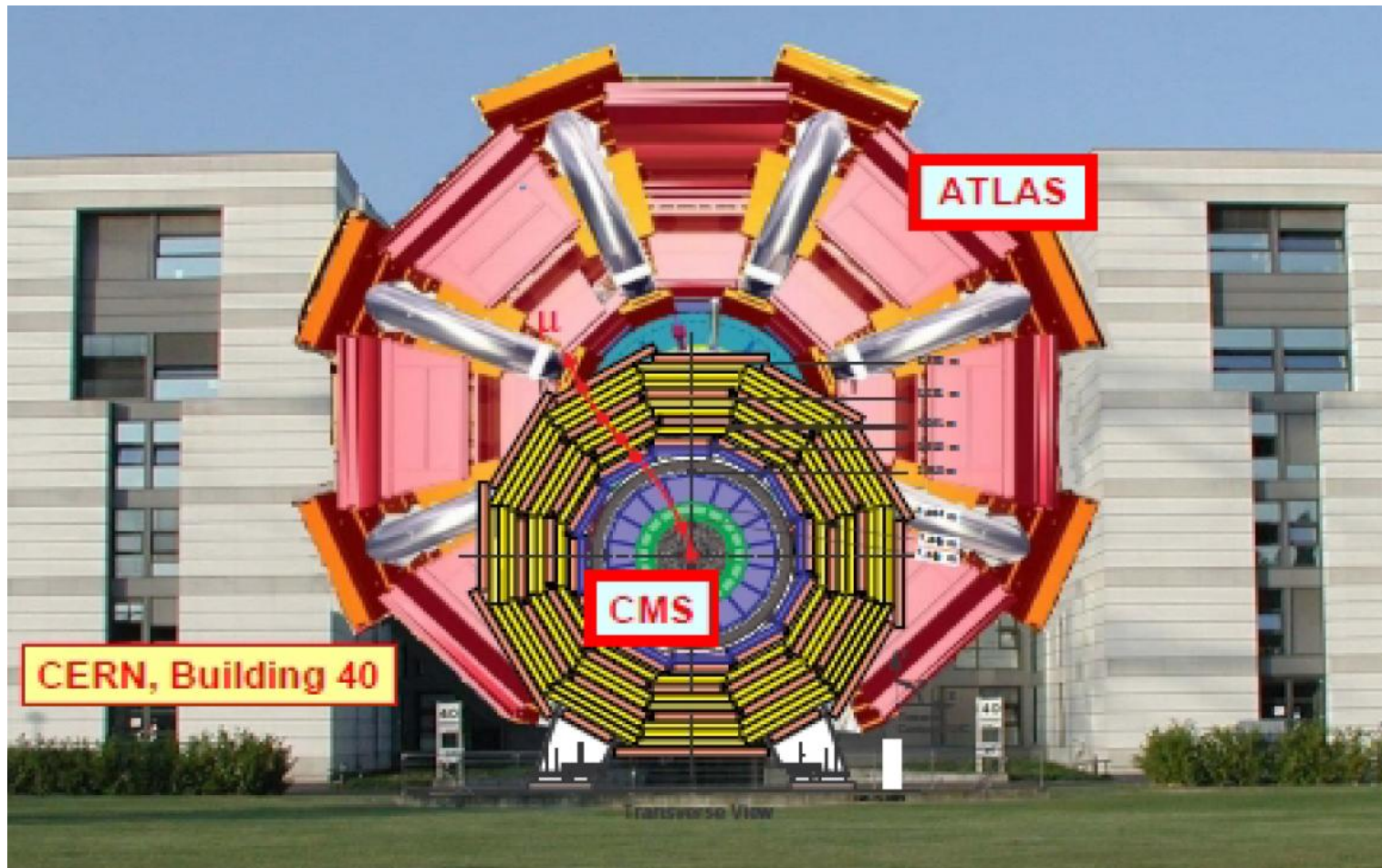


- 18 detector systems
- ~ 10 000 t
- > 1000 collaborators
- p+p up to 14 000 GeV
- Pb+Pb up to 5500 GeV
- First p+p collision: Nov. 23, 2009
- Pb+Pb: fall 2010

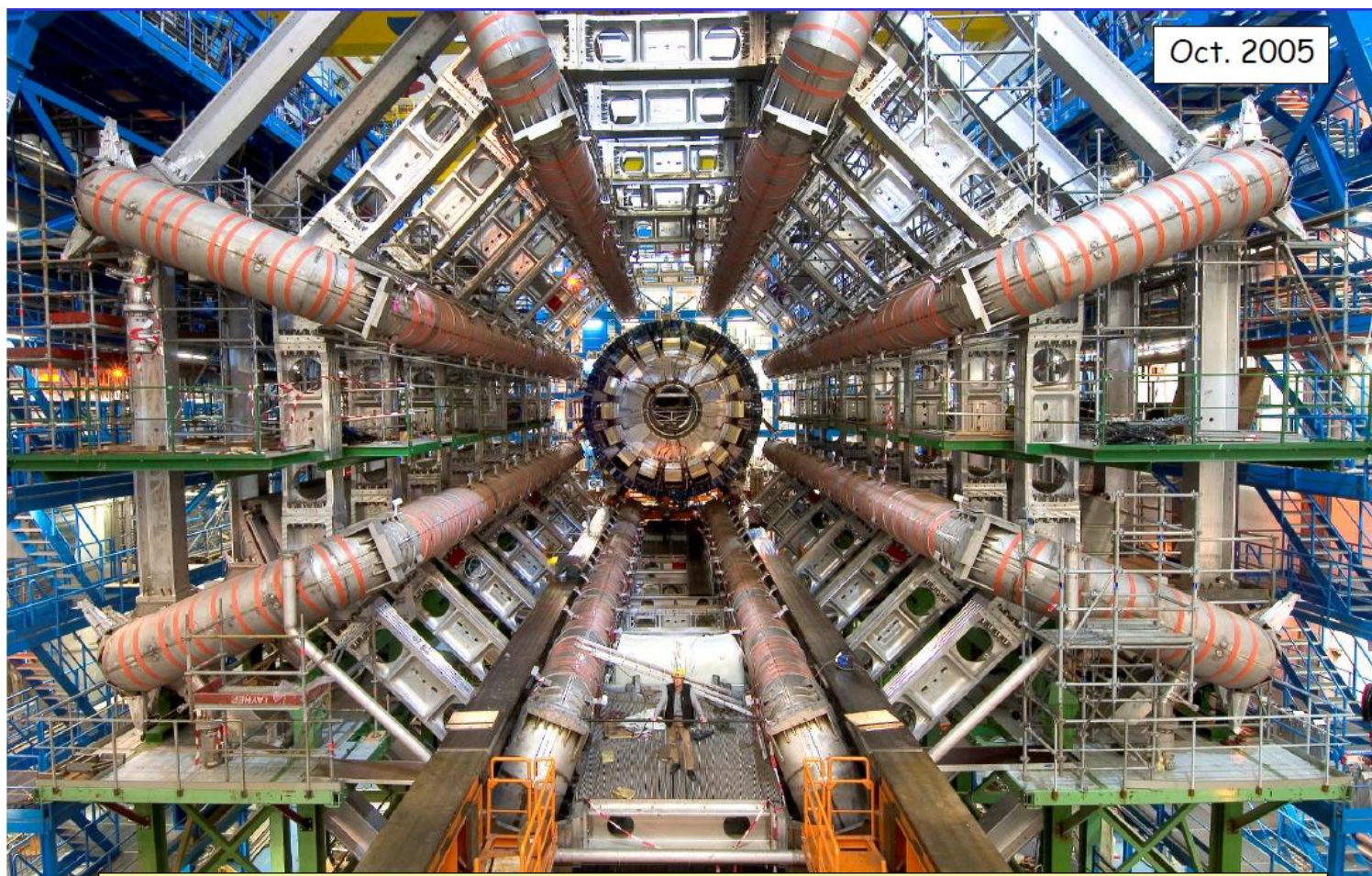




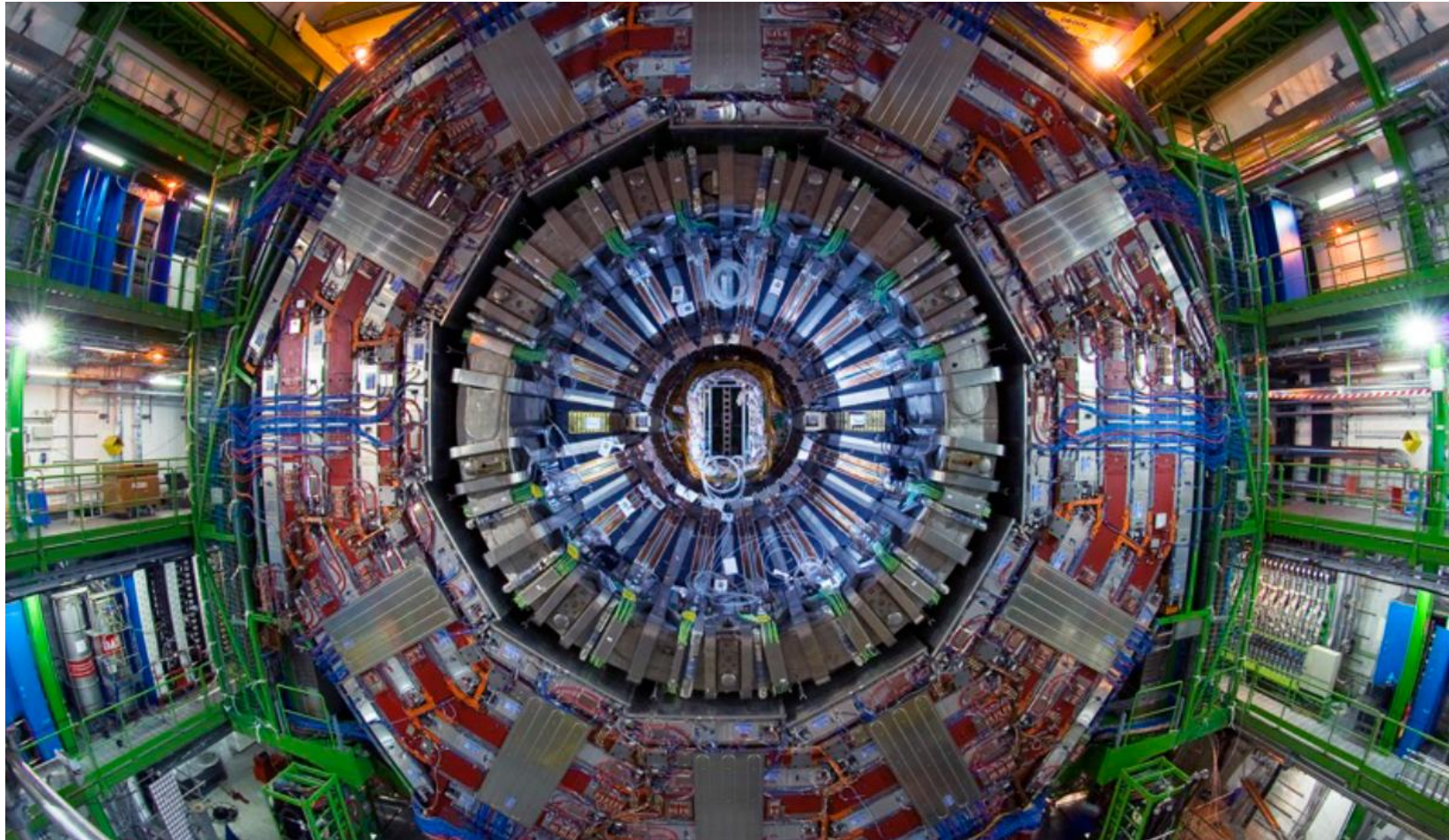
# ATLAS и CMS



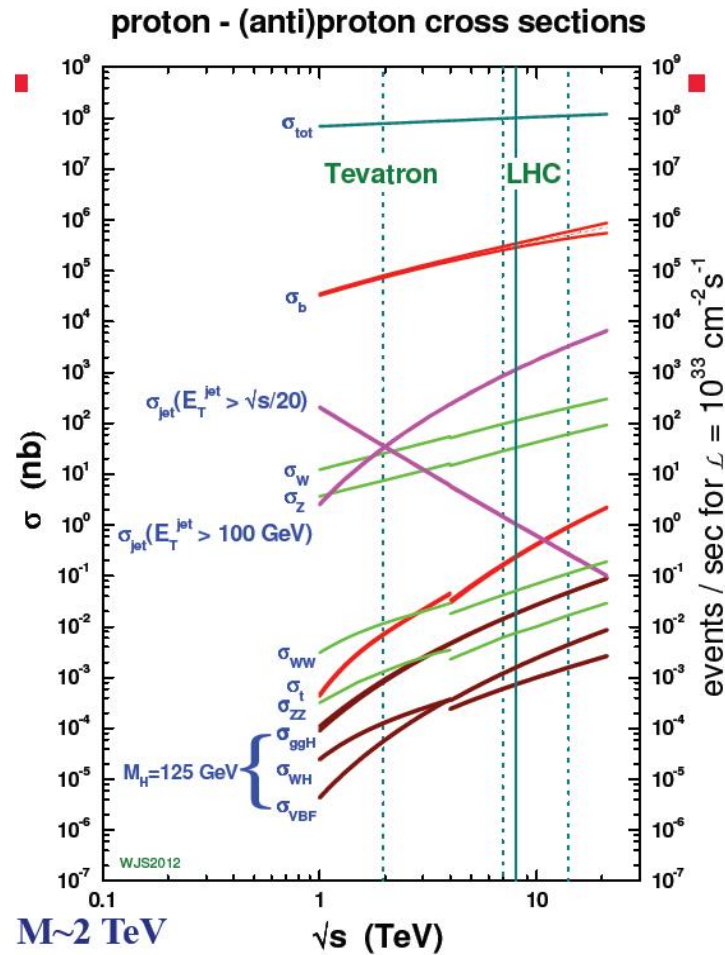
# ATLAS



# CMS

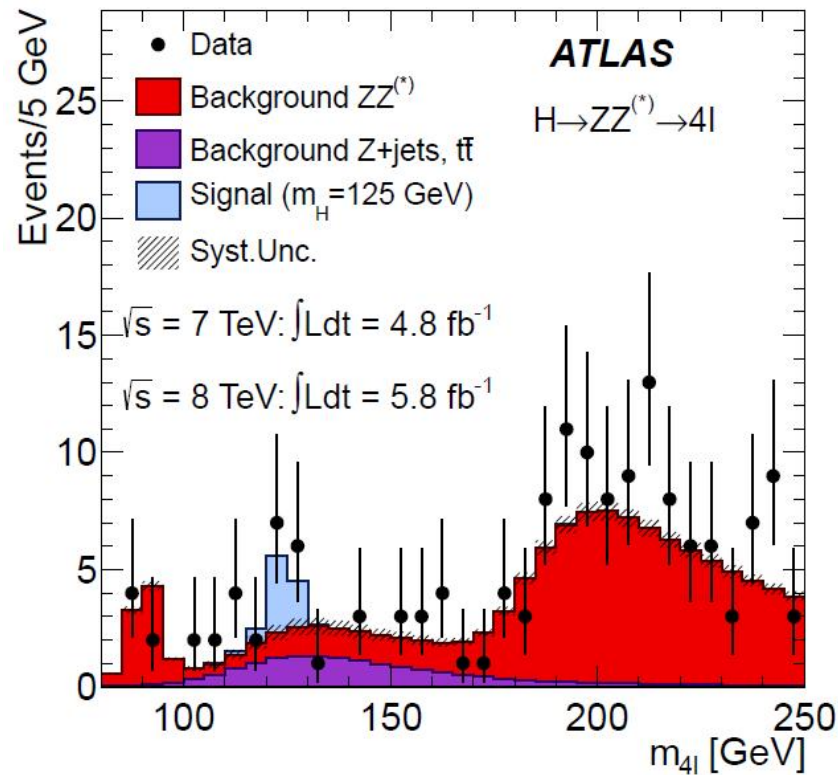


# Сечения реакций на адронных коллайдерах

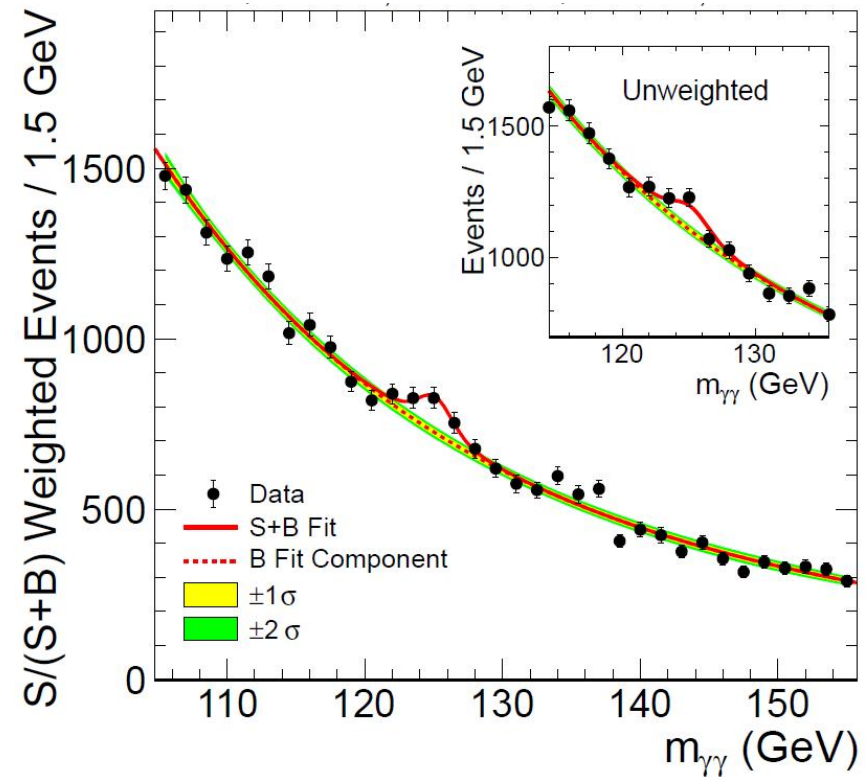


# Открытие Хиггс-бозона (2012)

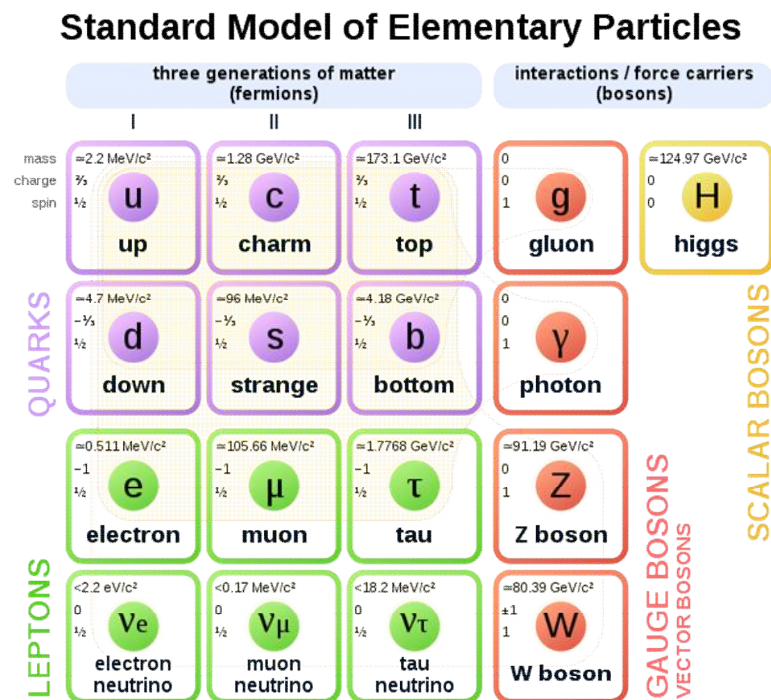
$H \rightarrow ZZ \rightarrow (ee)(ee)$



$H \rightarrow \gamma\gamma$



# Стандартная Модель завершена!

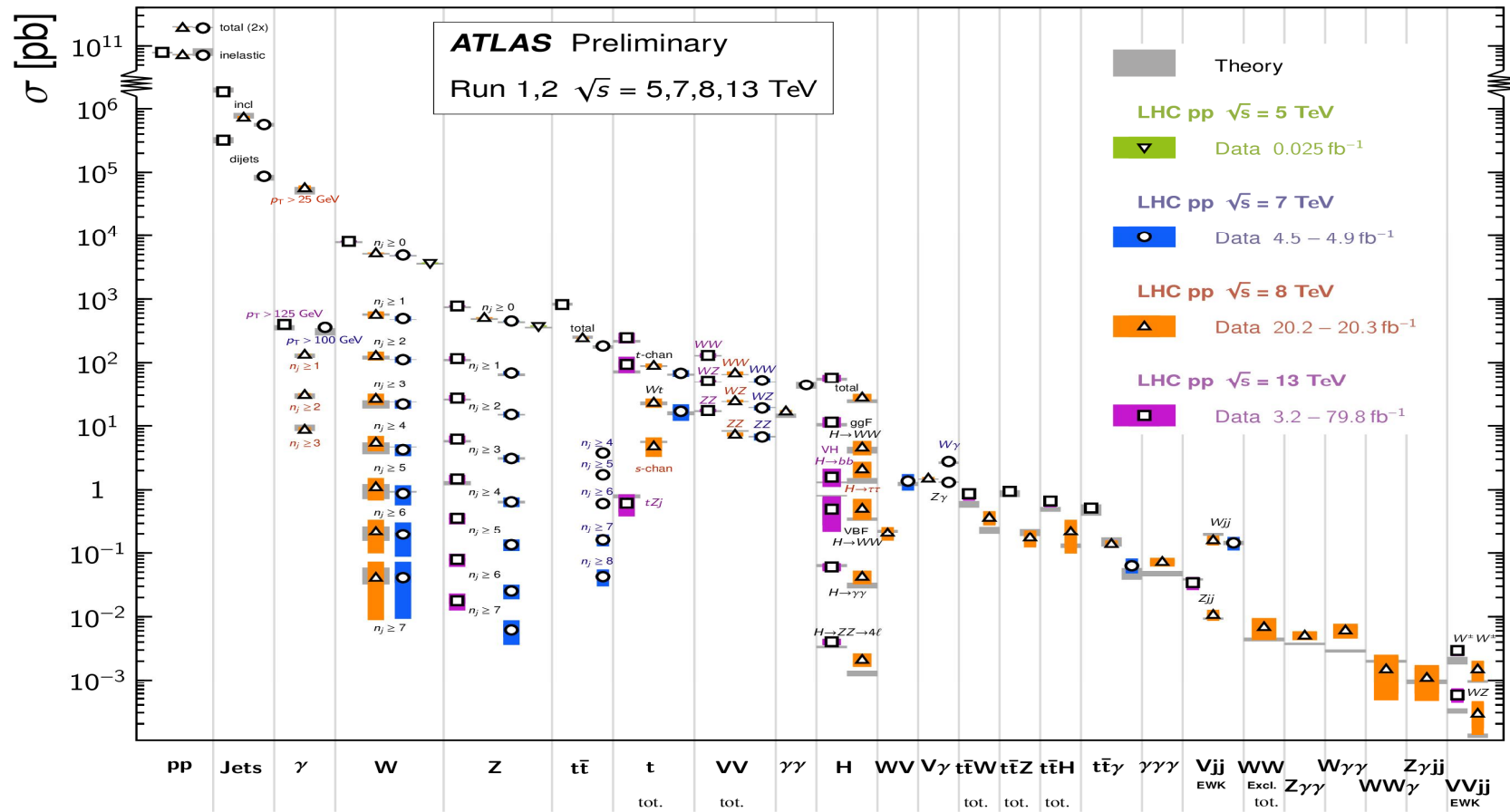


Впереди новая физика???

# Измерения сечений в ATLAS

Standard Model Production Cross Section Measurements

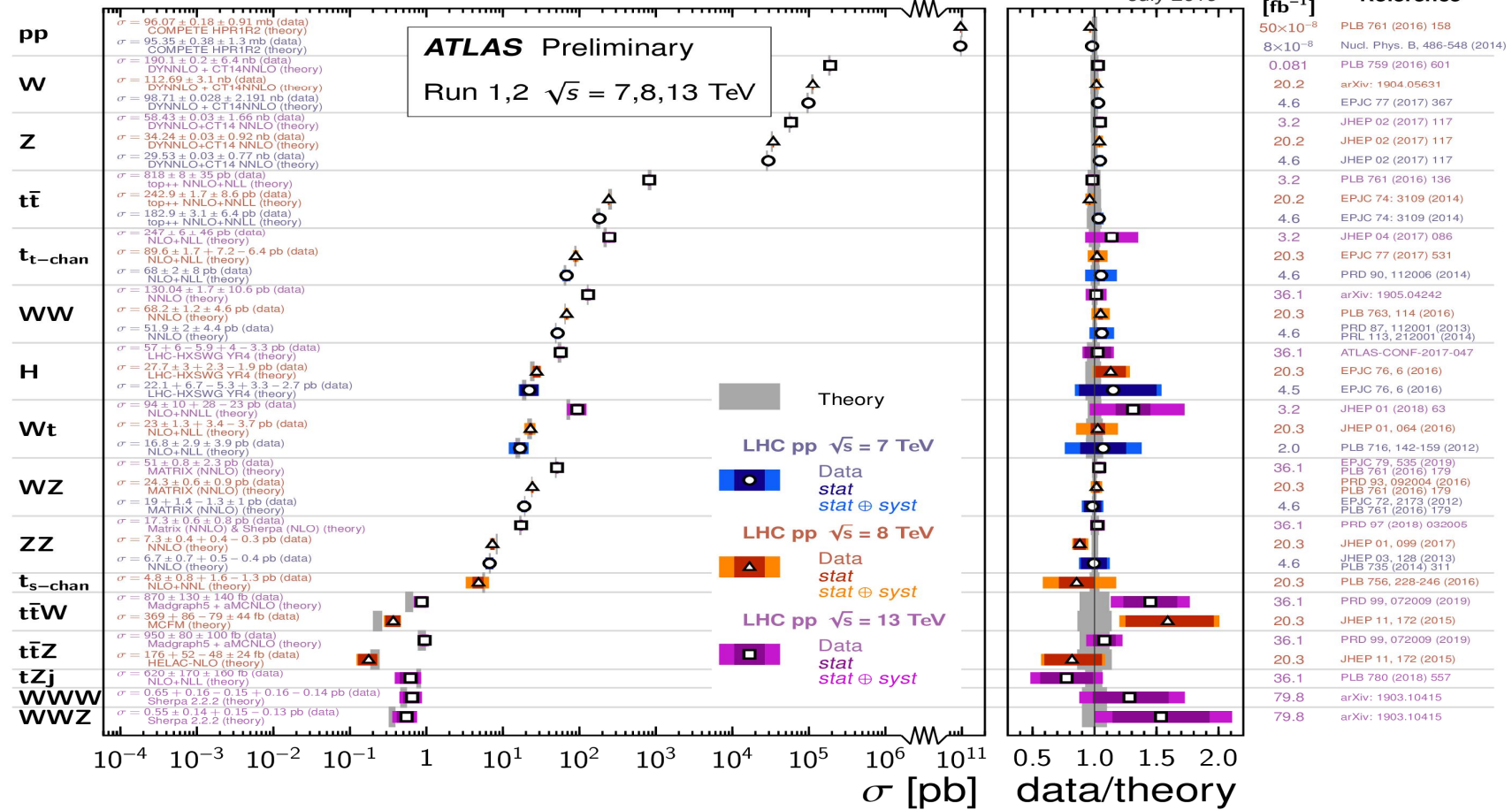
Status: July 2019



# Согласие с теорией

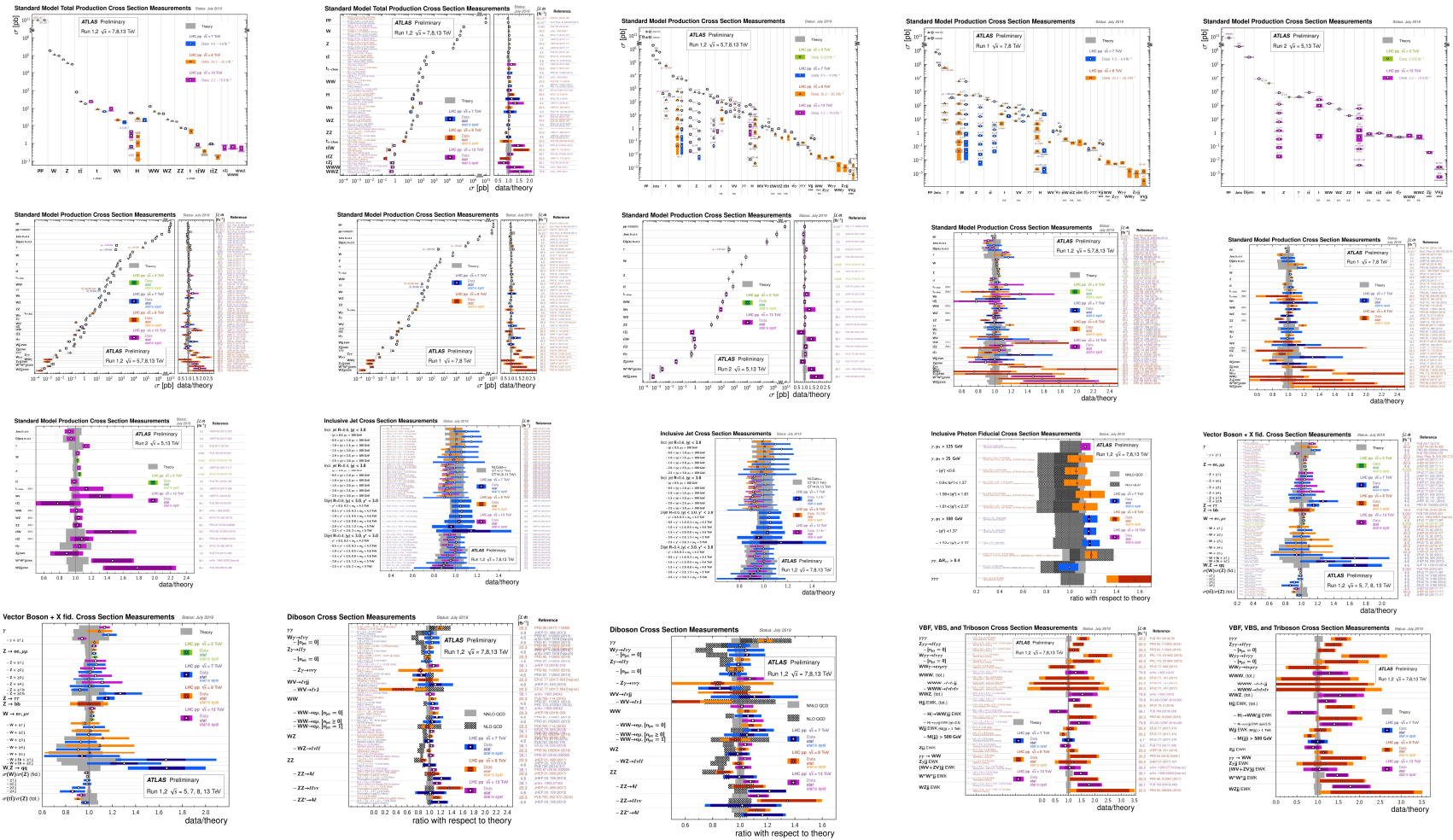
## Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status:  
July 2019





# Результатов много!



# Набор данных на LHC

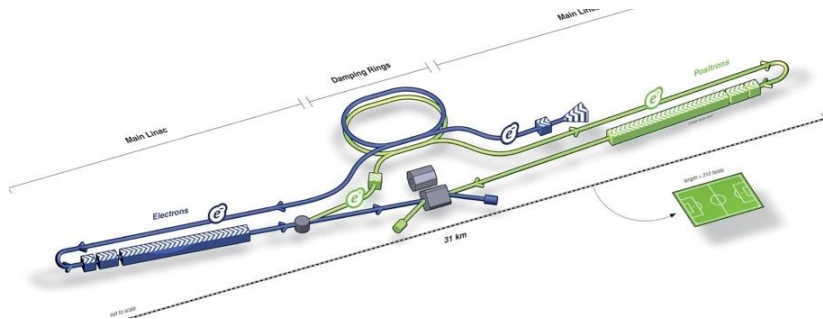
- 2009-2010: запуск (7 ТэВ)
- 2011:  $5 \text{ fb}^{-1}$  (7 ТэВ,  $L \sim 3 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- 2012:  $25 \text{ fb}^{-1}$  (8 ТэВ,  $L \sim 7 \times 10^{33}$ )
- 2013-2015: 1-й апгрейд
- 2015-2018:  $140 \text{ fb}^{-1}$  (13 ТэВ,  $L \sim 2 \times 10^{34}?$ )
- 2018-2020: 2-й апгрейд
- 2020-2023:  $300 \text{ fb}^{-1}??$  14 ТэВ,  $L \sim 5 \times 10^{34}?$
- 2023-2026: 3-й апгрейд
- 2026-2037:  $3000 \text{ fb}^{-1}??$  14 ТэВ,  $L \sim 2 \times 10^{35}?$

# После LHC

- Очередной апгрейд: HE-LHC (33 ТэВ)
- Кольцевой коллайдер
  - $e^+e^-$  250-360 ГэВ
  - pp 100 ТэВ
- Линейный коллайдер
  - $e^+e^-$  до 3 ТэВ

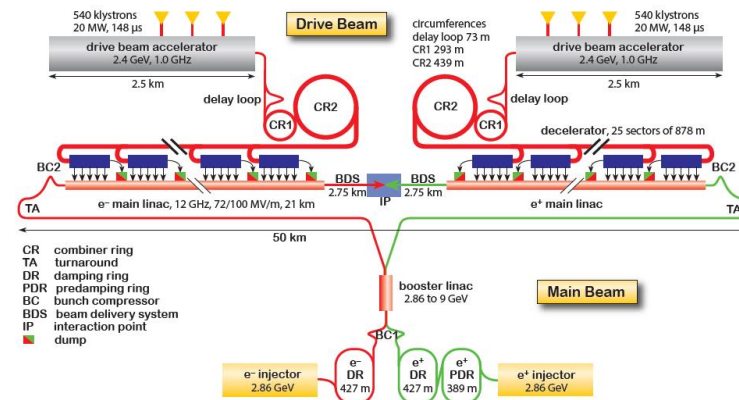
**ILC (2030)**

**\$ 4-5G**



**CLIC (2035)**

**\$ 6.7G (380 GeV)  
\$13G (3000 GeV)**

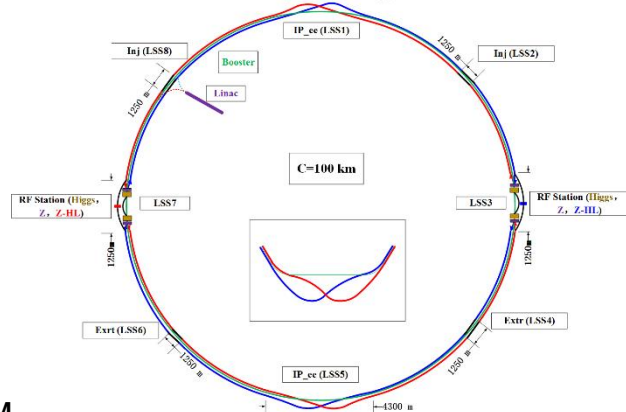


**CEPC (2030)**

**\$ 5.5G**

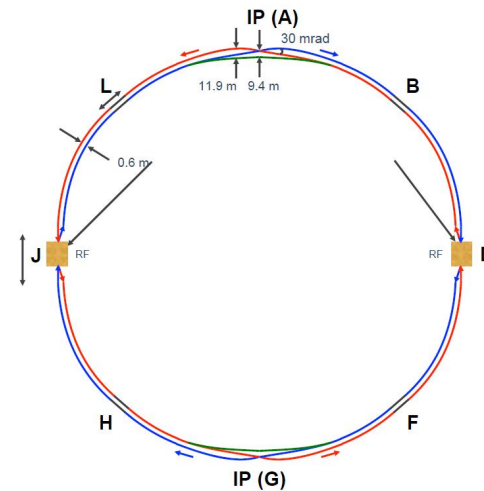
Layout of CEPC Fully Partial Double Ring

(Jan. 18, 2017, Su Fcng.)

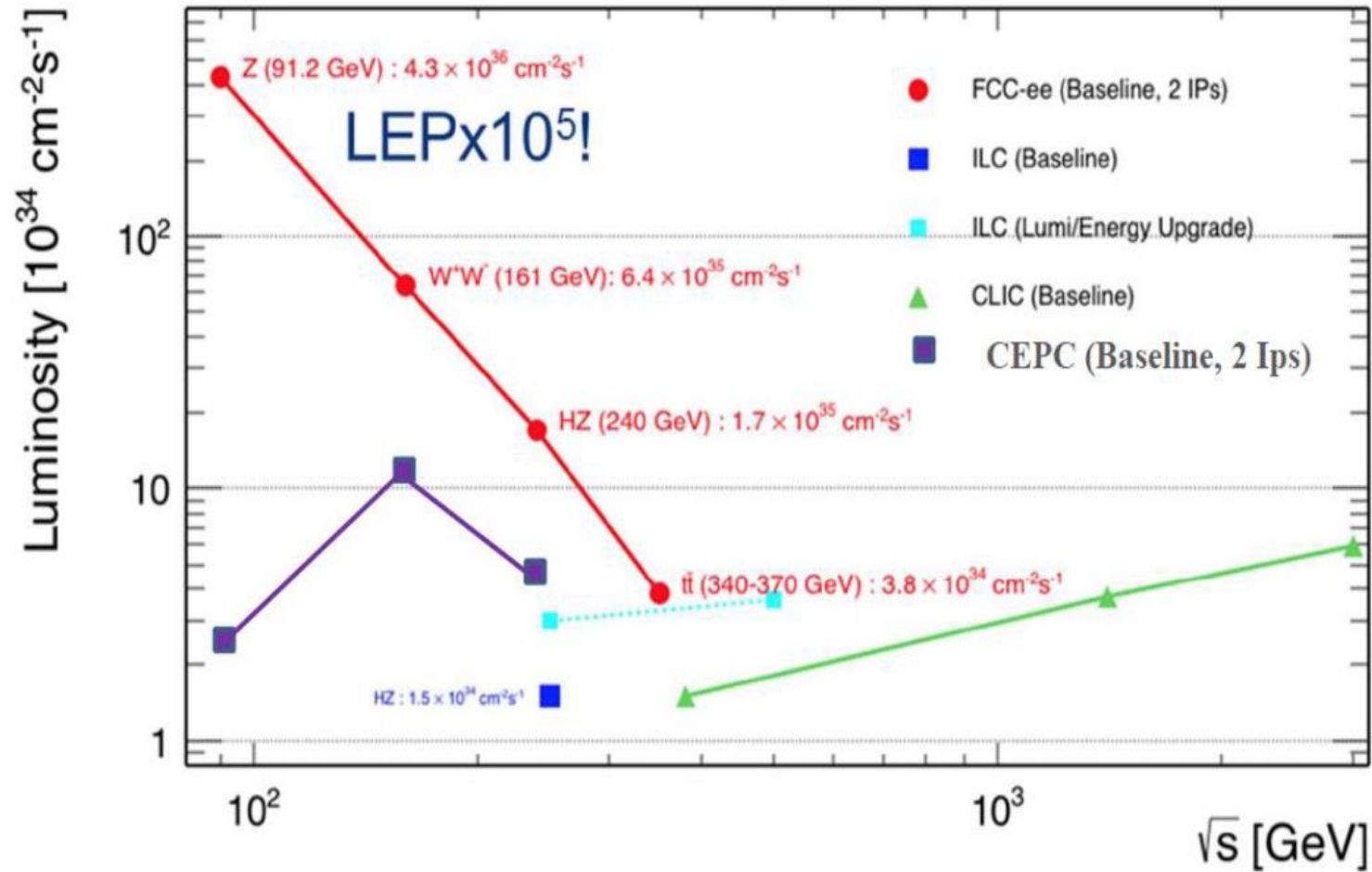


**FCC-ee (2039)**

**\$ ???**



# Светимость/энергия



# Заключение

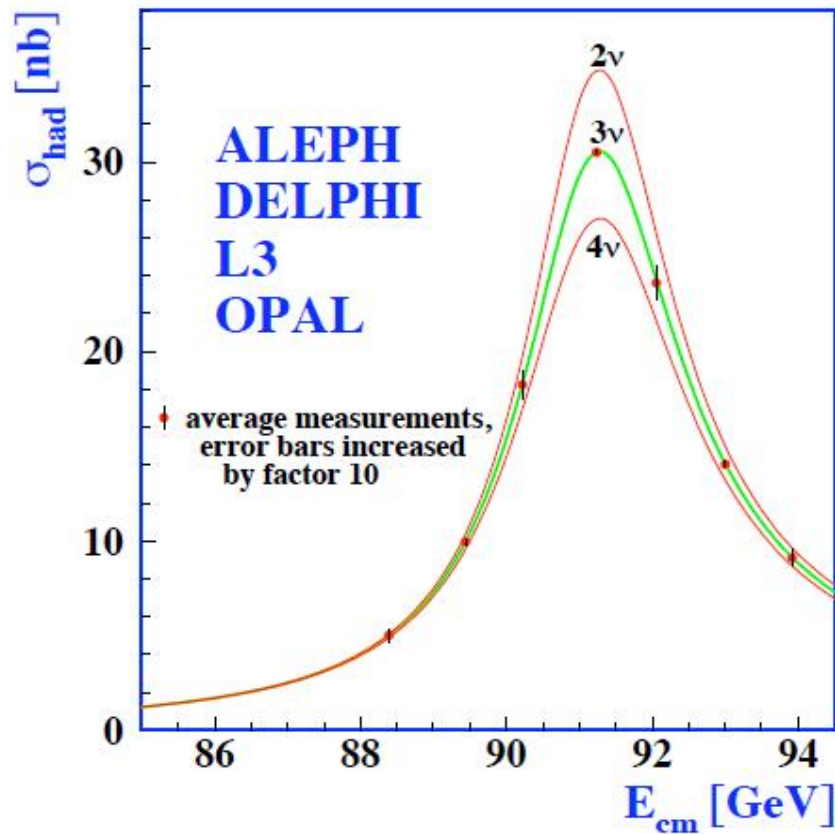
- Стандартная Модель получила полное экспериментальное подтверждение
- Не обнаружено значимых отклонений эксперимента от теории. Поиски продолжаются
- LHC будет работать ещё лет 15
- Рассматриваются проекты будущего (например, исследования на FCC расписаны с 2040 по 2090 годы)
- Работы хватит на всех!



Запасные слайды



# LEP-1 (1989-1995): a Z-boson factory



$$\Gamma_Z = \Gamma_{\text{had}} + \overbrace{3\Gamma_\ell}^{\text{leptonic width}} + \overbrace{N_\nu \Gamma_\nu}^{\Gamma_{\text{inv}}}$$

number of light neutrinos

$$\text{Peak: } \sigma^{0,f} \approx \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

$$\blacktriangleright \Gamma_{\text{inv}} = 0.4990 \pm 0.0015 \text{ GeV}$$

Number of light neutrinos:

$$N_\nu = \left( \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_\ell} \right)_{\text{exp}} \cdot \left( \frac{\Gamma_\ell}{\Gamma_\nu} \right)_{\text{SM}}$$

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

# LEP data taking summary

Year	$E(e^+e^-)$ , GeV	$\int Ldt/4$ , pb <sup>-1</sup>	main goal
1989–94	~ 91	140	Z <sup>0</sup>
1995	130–136	5	
1996	161–172	20	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup>
1997	184	60	WW, ZZ
1998	189	190	WW, ZZ
1999	192–202	220	Higgs
2000	204–209	220	Higgs

# LEP electroweak results

Quantity	Value	Standard Model	Pull	Dev.
$M_Z$ [GeV]	$91.1876 \pm 0.0021$	$91.1874 \pm 0.0021$	0.1	-0.1
$\Gamma_Z$ [GeV]	$2.4952 \pm 0.0023$	$2.4968 \pm 0.0010$	-0.7	-0.5
$\Gamma(\text{had})$ [GeV]	$1.7444 \pm 0.0020$	$1.7434 \pm 0.0010$	—	—
$\Gamma(\text{inv})$ [MeV]	$499.0 \pm 1.5$	$501.59 \pm 0.08$	—	—
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	$83.984 \pm 0.086$	$83.988 \pm 0.016$	—	—
$\sigma_{\text{had}}$ [nb]	$41.541 \pm 0.037$	$41.466 \pm 0.009$	2.0	2.0

Quantity	Value	Standard Model	Pull	Dev.
$m_t$ [GeV]	$170.9 \pm 1.8 \pm 0.6$	$171.1 \pm 1.9$	-0.1	-0.8
$M_W$ ( $\bar{p}p$ )	$80.428 \pm 0.039$	$80.375 \pm 0.015$	1.4	1.7
$M_W$ (LEP)	$80.376 \pm 0.033$		0.0	0.5

# Summary of SM tests at Tevatron, LEP and SLC

Includes **hundreds** of  
measurements of all experiments

$$\frac{|\text{Expt} - \text{theory}|}{\text{expt. uncertainty}}$$

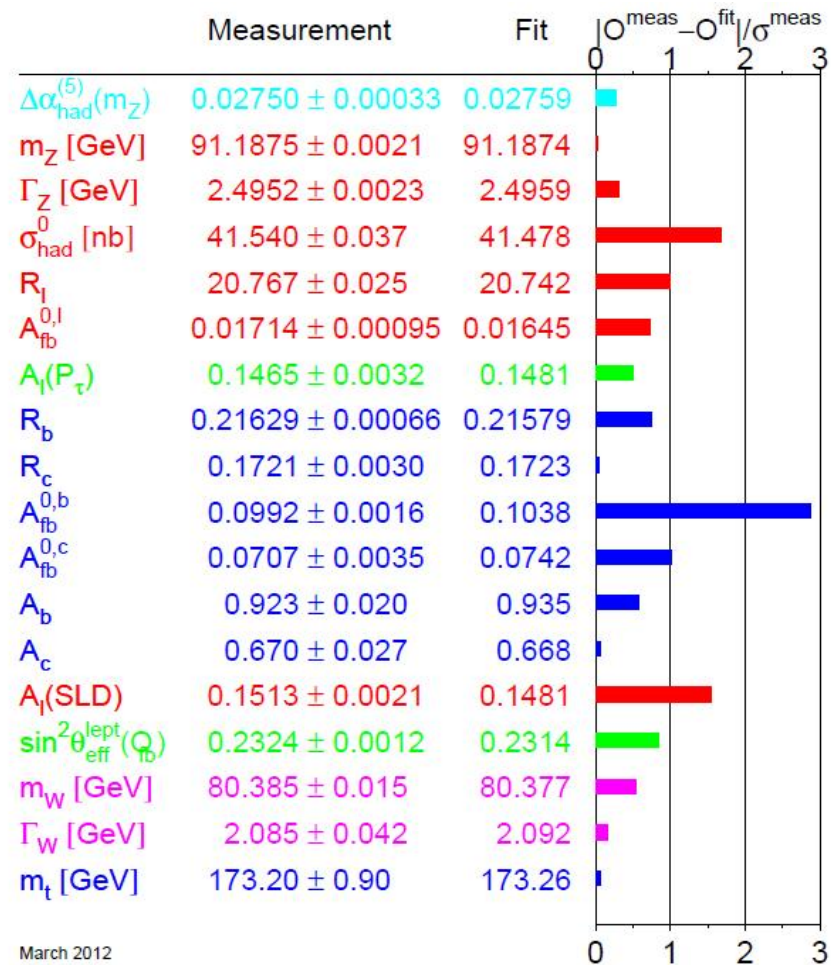
Slightly deviating quantity used  
to change

Now it is forward-backward  
asymmetry of  
 $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}$

LEP Electroweak Working Group:



<http://lepewwg.web.cern.ch/>



March 2012

# LHC milestones

- 1984: conceptual ideas
- 1995: budget approved
- 1999: civil engineering work started
- 2008: first beam
- 2010: first useful data (7 TeV)
- 2011: Higgs boson evidence (7 TeV)
- 2012: Higgs boson discovered (8 TeV)
- 2015: start of Run-2 (13 TeV)