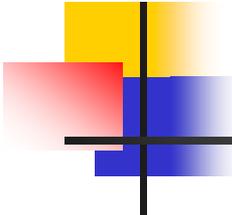


«Новая эра»
в физике элементарных частиц

В.И. Тельнов

Новосибирский Государственный
университет



План

Проверка квантовой электродинамики на встречных пучках.

Кварки и глюоны:

- структура протона;
- c,b,t-кварки, глюон, аромат, цвет, квантовая хромодинамика.

Лептоны,

- Открытие тау-лептона, e, μ , τ универсальность, ν_e , ν_μ , ν_τ нейтрино, измерение числа поколений лептонов

Бозоны:

- слабые взаимодействия, открытие W и Z, единое электро-слабое взаимодействие.

Таблица фундаментальных частиц. Стандартная модель.

Симметрии,

- открытие несохранения P, C, CP, T-четностей.

Будущие эксперименты и возможные открытия

- Хигсовский бозон, суперсимметрия ...темная материя

Проверка квантовой электродинамики
на вершинах e^-e^- , e^+e^- и т.д.

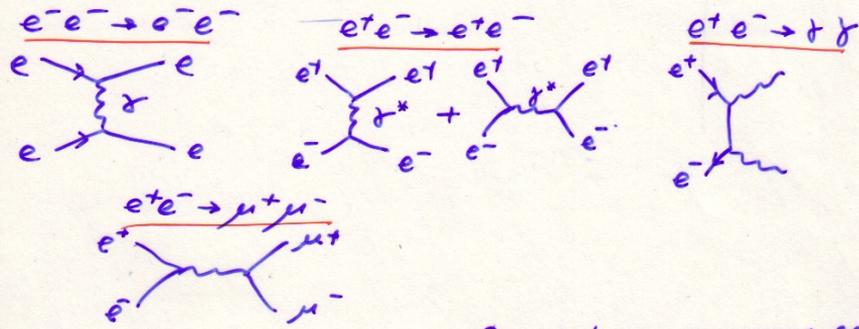
(2)

„Классический радиус электрона“

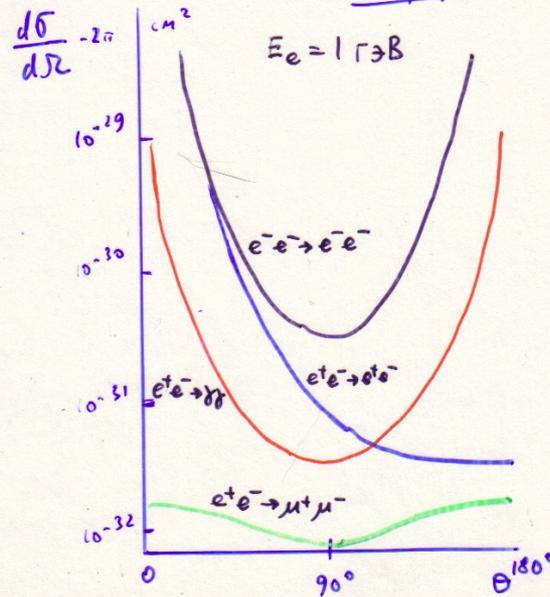
e $\frac{e^2}{r_e} = mc^2 \quad r_e = \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$

Так ли это?

КЭД - процессы



Дифференциальные сечения



Полюсное сечение КЭВ и процессов

(3)

$$\sigma(\theta > \theta_{min}) \propto \frac{1}{S} \left(\frac{\hbar^2 c^2}{S} \right), \text{ где } S = (2E_0)^2$$

Для $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ или $S \gg m_\mu^2$

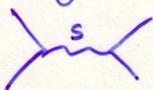
$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{4\pi}{3} \frac{\lambda^2}{S} = \frac{22 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2}{E^2} (E \text{ в ГэВ})$$

$$\text{где } \lambda = e^2/\hbar c = 1/137$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\lambda^2}{4S} (1 + \cos^2\theta)$$

$1 + \cos^2\theta$ - верно для любой пары
точечных фермионов ($S = 1/2$)
(см. кварковые струны).

Внешне структуры рассеяния на сечении



$p^2 = q^2$ или рассеянии

$p^2 = S$ или аннигиляции

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$, σ являются функциями q^2 и S

$$\left(\begin{aligned} q^2 &= -S \cos^2\theta \\ q^2 &= -S \sin^2\theta \end{aligned} \right), \quad S = (2E)^2$$

Модификация:

$$F = 1 + \frac{S}{\Lambda^2}, \quad F = 1 + \frac{q^2}{\Lambda^2} \text{ (или } q^2 \text{)}$$

F - формфактор, Λ - параметр нарушения КЭВ
размерность Λ - энергия, ГэВ

Угловая неопределенность $\chi \sim \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar c}{E} = \frac{2 \cdot 10^{-14} \text{ см}}{E(\text{ГэВ})}$

$$z \sim \frac{2 \cdot 10^{-14}}{\Lambda(\text{ГэВ})} \text{ см.}$$

ВЭП-1 e^+e^- $2E = 2.160 \text{ МэВ}$ $\Lambda > 0.4 \text{ ГэВ}$

LEP e^+e^- $2E = 2.50 \text{ ГэВ}$ $\Lambda > 300 \text{ ГэВ}$

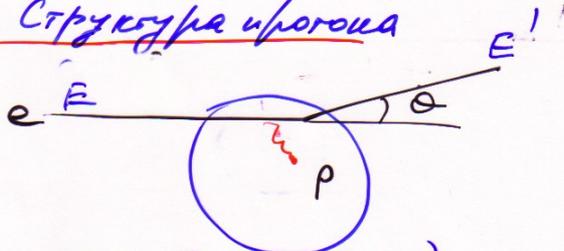
$$z_{\mu, \nu} < 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ см}$$

При этих термах кроме фотона дает большой вклад

II Кварки, глюоны

(4)

1. Структура протона

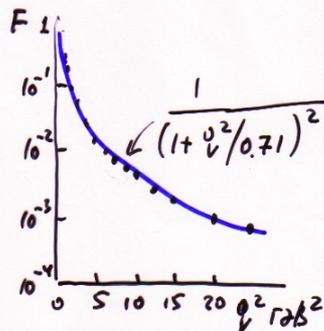


(Почти оное Резерфорд)

Гибкое рассеяние

$$q^2 = 4E^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

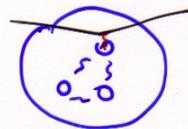
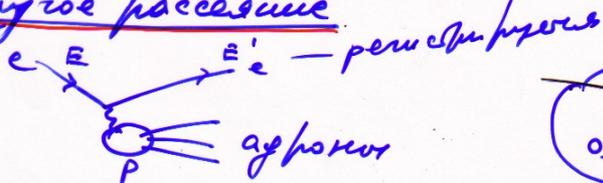
В отличие от точечной частицы возникает формфактор ($\sim \frac{\text{букс}}{\sigma \text{ точки}}$) $\propto F$



SLAC, 1967 $E_0 = 20 \text{ ГэВ}$.

q в [ГэВ]
 Если $F(q^2) = (1 + \frac{q^2}{M_V^2})^{-2}$, то
 из квадр. Фурье плотности ядра
 в ядре $\rho(R) = \rho_0 \exp(-M_V R)$
 $b_2 = \frac{\sqrt{12}}{M_V} = \frac{3.5}{0.7} \cdot 2 \cdot 10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ см}$

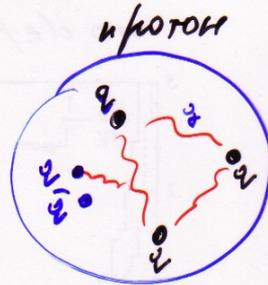
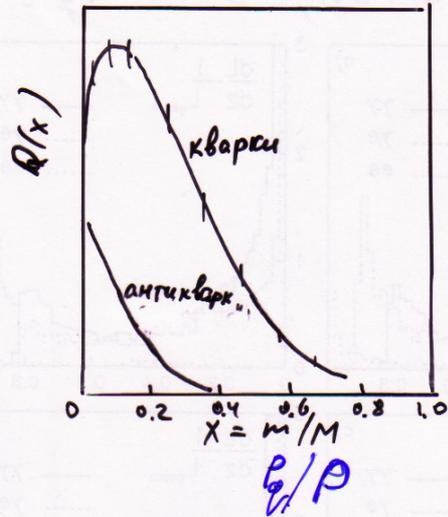
Неупругое рассеяние



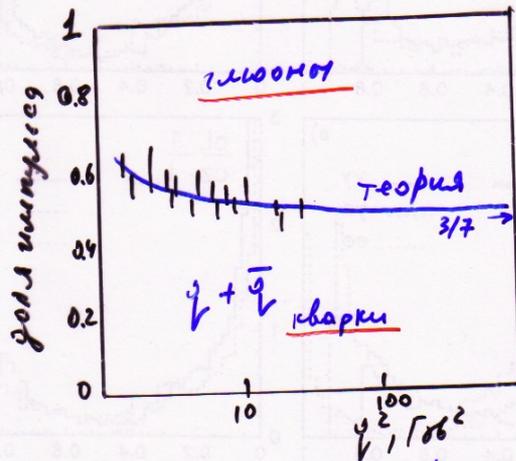
Эксп. показывает, что
 при больших q^2 рассеяние происходит как от
 на точечных объектах ("картонах"), позднее
 после нейтрино, e^+e^- тир. Это значит, что
 это кварки.

или $q^2 \gg \frac{1}{2} \frac{1}{\rho^2}$

распределение кварков по доле их импульса от полного импульса протона



- $p \equiv uud$
 u, d - кварки
 u, d - валентные кварки
 q, \bar{q} - виртуальные кварк-антикв. пары
 глюоны.

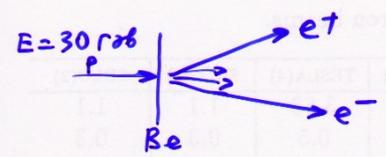


Каждый кварк несет примерно $0.5/3 \sim 1/6$ импульса протона

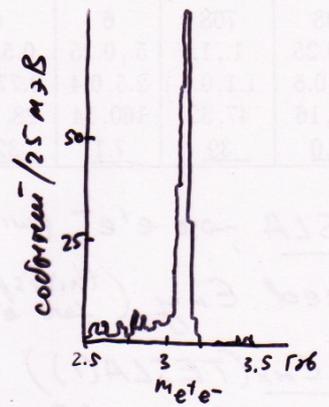
Открытие J/ψ частицы

"Новгородская революция" 1974 года

Тинк, Брукхейвен, США

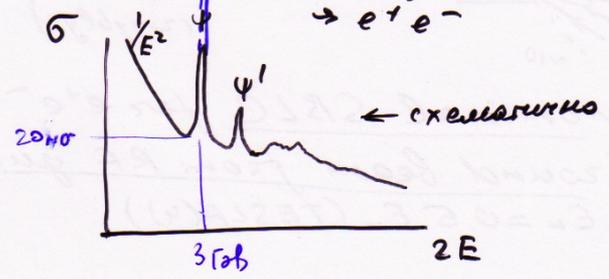
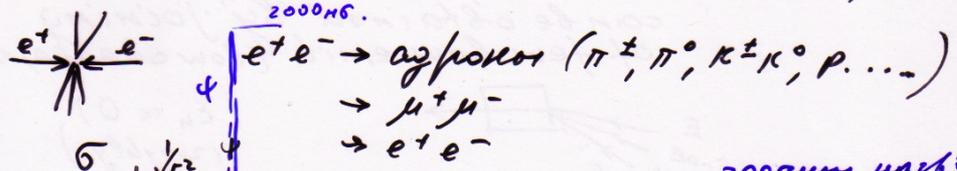


$p^+e^- \rightarrow e^+e^- X$
 Измер. расщепления
 по инв. массе e^+e^- пар
 $M^2 = \sum (E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (p_{e^+} + p_{e^-})^2$



заслуживает названия **J**

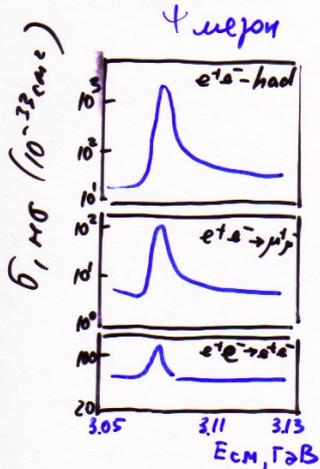
Рихтер (СЛАК, США),
 e^+e^- накопитель SPEAR ($2E = 25 \div 8$ ГэВ)



заслуживает назв. **ψ**

принималось назв. **J/ψ**

Скачок в сечении (т.е. число событий / ед. времени)
в 100 раз
($\sigma \approx 40$ $L = \frac{N^2}{S} t$ - светимость)



Линк очень узкий, ширина определяется разбросом энергии в пучках ($\sim 2-3$ МэВ)
(по сравнению с $\Delta E = 3$ ГэВ)

Нахождение истинной ширины резонанса

ϕ -ла Брейта-Винера

$$\sigma_{BW} = \frac{2J+1}{(2S_1+1)(2S_2+1)} \frac{\pi}{p^2} \frac{V_{in} V_{out} \Gamma^2}{(E-E_R)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

J- спин резонанса

$S_{1,2}$ - спин налетающих частиц

p - илп. с.м. частиц в с.м.

E - энергия в с.м.

E_R - энергия резонанса

V_{in} - брахитрасфера в исходный канал $V_{in} = \Gamma_{tot} e^- / \Gamma_{tot}$

V_{out} - брахитрасфера в конечном продуктах

Γ - ширина резонанса

$$\int \sigma_{out} dE = \frac{6\pi^2}{M^2} V_{ee} V_{out} \Gamma$$

$V_{ee}, V_{had} (\mu\mu, \mu\gamma)$
- измераются.

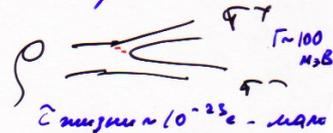
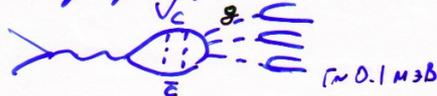
отсюда $\Gamma_{\psi} = 86 \pm 6$ кэВ (на 1992г)

$\Gamma_{\psi} / M_{\psi}^2 \sim 3 \cdot 10^{-5}$!

Объяснение ирирования ψ

$\psi \equiv c\bar{c}$ c - "огаровавшие" кварки

ψ' - возбужден. сост. ψ



ψ очень узкий, т.к. с-кварки имеют новые кван. числа с-наши, которое сохр. в сильных взаимодействиях

(8)

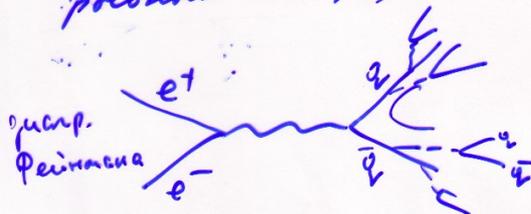
Распад ψ



Основной канал распада

ψ → 3 глюона → адроны

Если $2E \approx 4\text{ ГэВ}$, то кварки не образуют связанных состояний (переходят в «непрерывный спектр»)



тип. Фейнмана

появляются рве струи частиц в кол. направлении вперед кварков.

в продольном



свара. струи

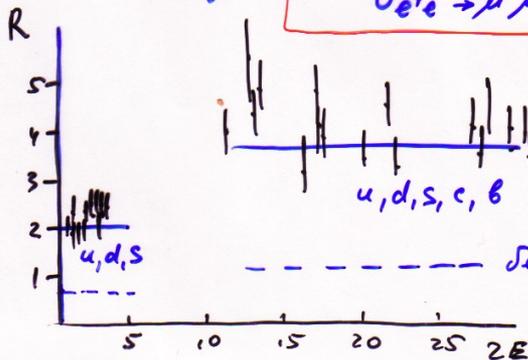
для частиц со спином 1/2 $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 + \cos^2\theta$

совм. с экспериментом.

$\sigma_{e^+e^- \rightarrow q\bar{q}} \propto e_q^2/s$

$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} \propto \frac{e^2}{s}$

Отсюда $R = \frac{\sigma_{e^+e^- \rightarrow had}}{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}} = \sum_{\text{все кварки с } M \leq E} e_q^2 \cdot 3$ (3 цвета кварков)



с цветом

u, d, s, c, b

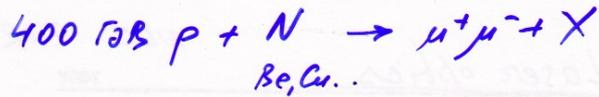
без учета

q	e_q^2
u	4/3
d	-1/3
s	-1/3
c	2/3
b	-1/3

$3((2/3)^2 + (1/3)^2 + (1/3)^2) = 2$
 $2 + 3((2/3)^2 + (1/3)^2) = 11/3$

Открытие Υ мезонов.

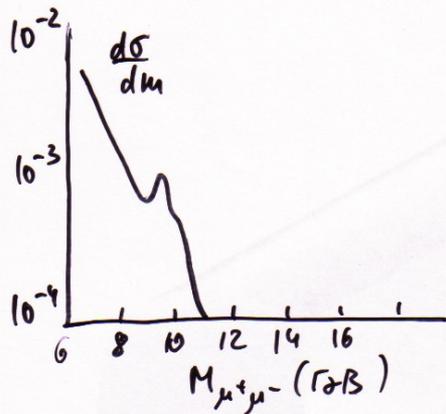
(9)



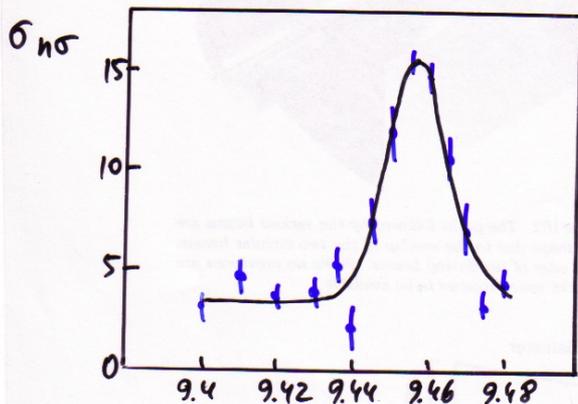
1977

L. Lederman

FNAL



$e^+ \leftarrow e^-$ DORIS (Германия)
1978г.

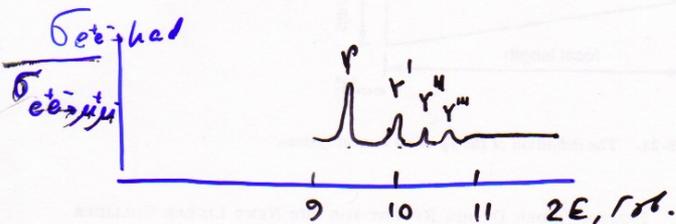


$\Upsilon \equiv b \bar{b}$

$Q_b = -1/3$

← сечение $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$

(самое точное измерение
параметров Υ сделано
на ВЭПП-4, ИЯФ в 1982-1984гг.)



Открытие t -кварка (1995)

98

FNAL (вблизи Чикаго), pp , $2E = 2T \Rightarrow B$
 там же, где и в.

$p \equiv uud$



$T \Rightarrow \text{кайтрон}$
 force
 при высоких энергиях
 основной канал
 $gg \Rightarrow t\bar{t}$ (70% LHC)

$\tau_t \sim 10^{-24}$ сек

$t \rightarrow W^+ b, \bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}$

- $W^+ \rightarrow e^+ \nu$ $p = 1/9$
- $\mu^+ \nu$ $1/9$
- $\tau^+ \nu$ $1/9$
- $q \bar{q}$ $2/3$

Отбирались:

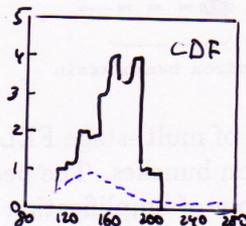
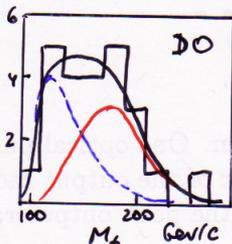
двухлептонный канал: $t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow \ell^+ \ell^- \nu \nu b \bar{b}$
 одноплетонный канал $t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow \ell^+ \nu \bar{q} \bar{q} b \bar{b}$
 или $e^+ \bar{\nu} q \bar{q} b \bar{b}$

два детектора CDF, D0
 февраль 1995

	CDF	D0
1 лептон	43	14
2 лептона	6	3
вероятность фона	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$
M_t (GeV)	176 ± 13	199 ± 30

Now 175.5 ± 5

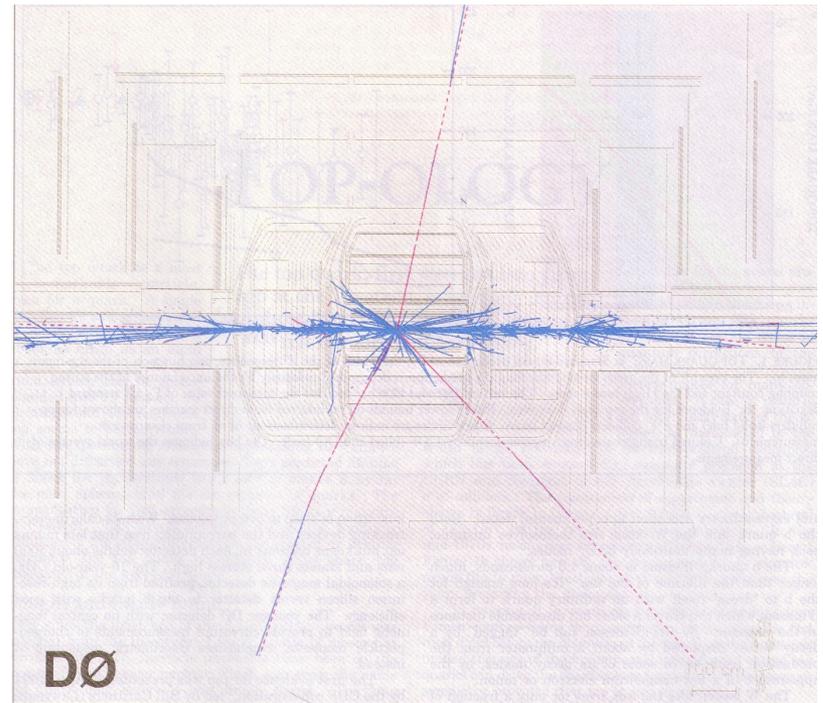
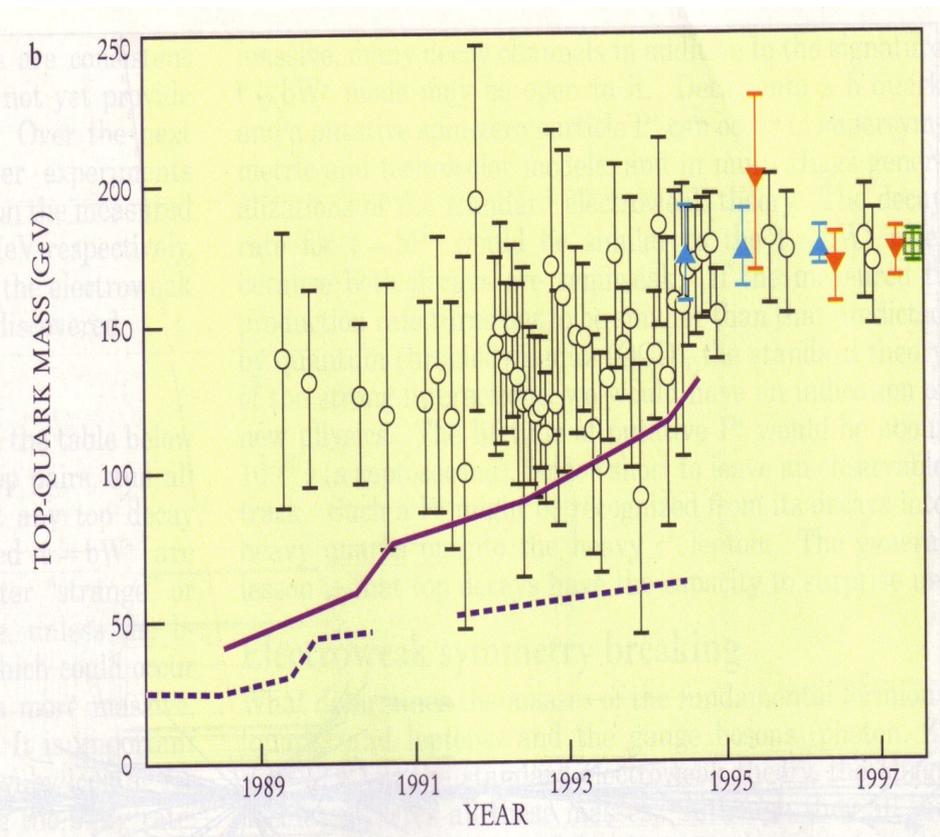
На 2009 год $M_t = 171.3 \pm 1.5$ ГэВ

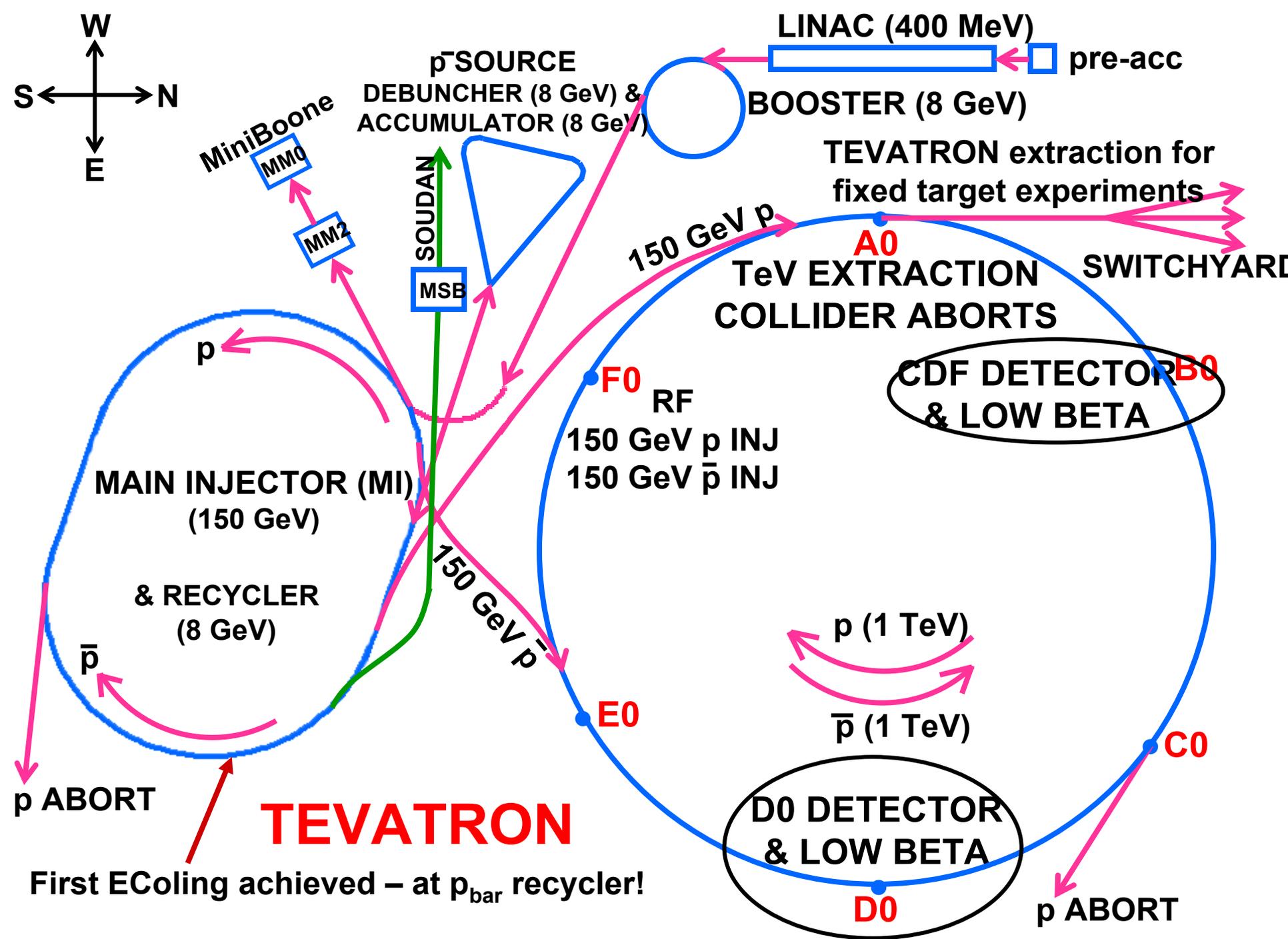


--- фон
 — $\Rightarrow \text{сигнал } t$

Массу M_t нашли по одноплетонному (одно нейтрино),
 событиям, используя дополнительное ур. $M_{\ell \nu} = M_t$
 $\nu \rightarrow \nu \quad M_{\ell \nu} = M_t$

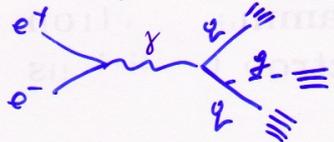
Открытие t-кварка





Открыто несколько десятков частиц, содержащих с и b-кварки
 $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ в равной степени. сог. $n=1,2,3$
 $l=0,1, \dots, s=0,1$
 $c\bar{q}$ - мезоны $cq, \bar{c}q$ - барионы ...

Открытие глюона (PETRA, ~1980)



три струи, вероятность в соответствии с теорией

Квантовая хромодинамика

кварки u, d, s, c, b, t по 3 цвета
 глюоны 8 цветов ($3^2 - 1$)
 цвет - аналог электр. заряда, но для сильного взаимодействия.
 все адроны (π, ρ, \dots - бесцветные)

$P = uud$
 $n = udd$
 $\pi^+ = u\bar{d}$



в отличие от фотонов кварки взаимодействуют друг с другом (двухцветные и взаимодействуют между собой)

$$V = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{2} + aZ$$

$\alpha_s \sim 0.2$ ($\alpha_m \sim 1/137$)

за счет "сетки" глюонов

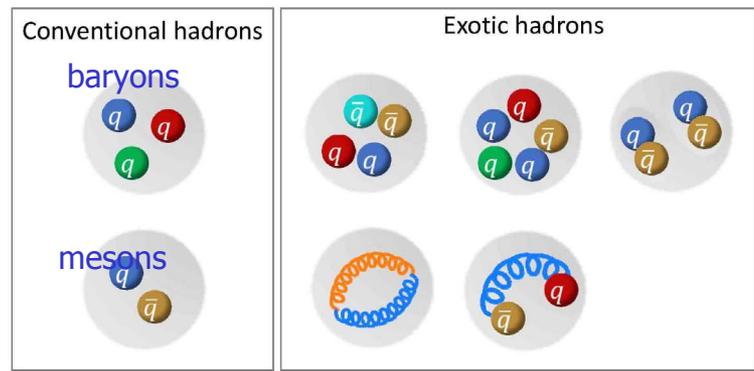
Невозможность кварков (по словам)

	M MeB	e _q	J	B	S	C	B	T
u	~5	2/3	1/2	1/3	0	0	0	0
d		-1/3	1/2	1/3	0	0	0	0
s	150	-1/3	1/2	1/3	1	0	0	0
c	1300	2/3	1/2	1/3	0	1	0	0
b	4200	-1/3	1/2	1/3	0	0	1	0
t	170000	2/3	1/2	1/3	0	0	0	1

S - strange
 c - charm
 B - beauty
 T - truth

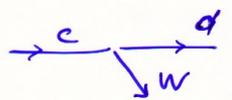
открыт (теор.) в 1994-1995 на Тэватроне

Many hundreds 2- and 3-quark particles and more than 50 4-quark and 5-quark particles have been observed !



Введем квантовые числа S, C, B, T - трижды "аромат"

запрещает распад кварков типа c $\rightarrow u, d, s$ (страница)
 запрещает распад кварков типа c $\rightarrow u, d, s$ (страница)
 но не запрещает "слабый" распад



II) Лептоны

e - электрон $m = 0.5 \text{ MeV}$

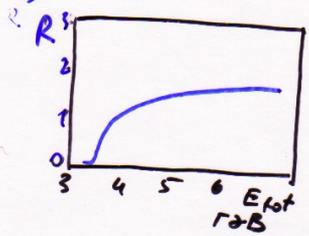
μ - мюон $m = 105 \text{ MeV}$

τ - тау лептон $m = 1782 \text{ MeV}$

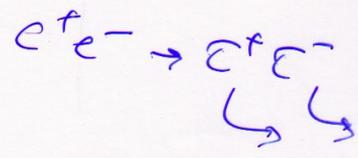
1936 ^{конт.} _{пуч}
1975 год

SPEAR, 1975 (Стэнфорд)

$e^+e^- \rightarrow e^\pm \mu^\mp + \text{иногда}$



$R = \frac{\sigma_{\text{lep}}}{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}}$



e - стабильн

$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \sim 100\%$

$\tau = 2.10^{-6} \text{ сек}$

$e^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_e \quad 17.5\%$

$\tau \sim 0.3 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$

$e^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \quad 17.5\%$

$X \nu_\tau$ остальные 65% ~ 30 каналов реакции.

Каждый лептон ^(в м.т.) имеет "свое" нейтрино с тем же "лептонным числом", сохр. во всех реакциях.

Табл. лептонов

ℓ	m_ℓ	Q	L_e	L_μ	L_τ	S	B
e	0.51 MeV	-1	1	0	0	$1/2$	0
μ	105.6 MeV	-1	0	1	0	$1/2$	0
τ	1777 MeV	-1	0	0	1	$1/2$	0
ν_e	$< 5 \text{ эВ}$	0	1	0	0	$1/2$	1
ν_μ	$< 0.27 \text{ MeV}$	0	0	1	0	$1/2$	0
ν_τ	$< 31 \text{ MeV}$	0	0	0	1	$1/2$	0

Может быть есть еще лептоны? (12)

X и ν_X

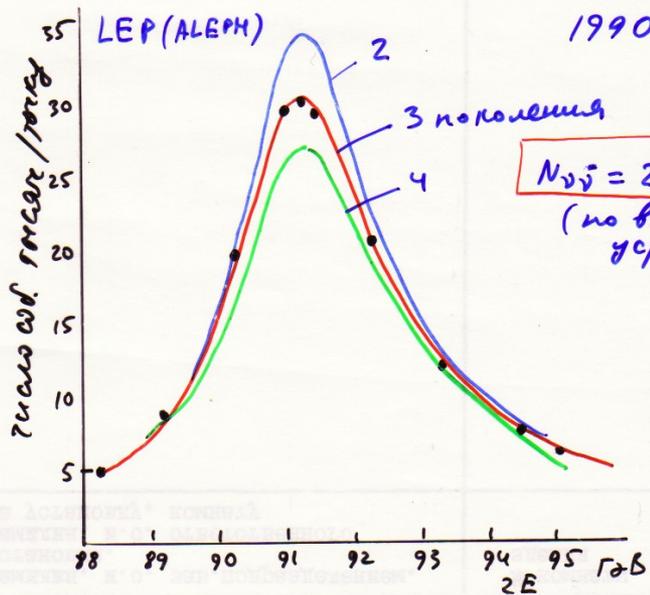
X - может быть тяжелый и поэтому не рождается.

ν_X - все нейтрино "легкие", можно родить при соответствующих энергиях, но как их зарегистрировать?

Измерение числа поколений лептонов
в распадах Z бозона

(LEP, SLC (Stanford))

$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow$
 $\begin{cases} had & \sim 71\% \\ \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, e^+e^- & \sim 10\% \\ \nu_{\bar{\nu}}, \bar{\nu}\nu, \nu\bar{\nu} & \nu_X \bar{\nu}_X \end{cases}$
 - $\sim 6\%$ на канал $\nu\bar{\nu}$



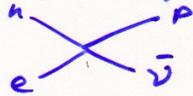
$N_{\nu\bar{\nu}} = 2.983 \pm 0.025$
 (по всем экспериментам усреднено)
 1994

При измерении формот не требуется только теоретически знать распад на все каналы (had, $\mu^+\mu^-$...)
 Все полагается почти безразлично

Слабые взаимодействия.

(13)

$n + p + e + \bar{\nu}$



контактное взаимодействие Ферми

Тогда $\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$

$\sigma_{\text{вкл}} \sim \frac{G^2 S}{\pi}$ — расход $S = (2E)^2$

Но из кв. механики

$\sigma_{\text{max}} = \pi \lambda^2 (2l+1)(2s+1) = \frac{\pi \lambda^2}{2} \begin{pmatrix} l=0 \\ s=1/2 \end{pmatrix}$

$\lambda = \frac{h}{p}$

$\frac{4G^2 p^2}{\pi} > \pi / 2p^2 \Rightarrow p^* \sim 300 \frac{\text{ГэВ}}{c}$

При $p > p^*$ — нарушаются основы кв. мех.

Вспомогательные переносчики



с $M_W \sim 100 \text{ ГэВ}$
тогда ОК.

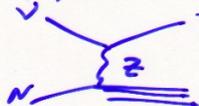
Из известного жите рисунка

$(p + N \rightarrow \pi \dots \rightarrow \mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu \text{ с } E_\nu \text{ до } 100 \text{ ГэВ.})$

было установлено, что кроме "заряженных токов"



есть "нейтральные" токи



$\sigma(\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu X) \sim 0.25$

$\sigma(\nu_\mu N \rightarrow \mu^- X)$

была создана теория электрослабого взаимодействия (Вайнберг, Салам, Глешоу)

предсказана W и Z бозоны (на основании экв. рендген)

$M_Z \sim 93 \text{ ГэВ}, M_{W^\pm} \sim 82 \text{ ГэВ.}$

В 1983 г. W и Z бозоны предсказаны (14)
 CERN, SPS $p\bar{p} \rightarrow Z \rightarrow e^+e^-$

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e, \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$$

$$\bar{u} + d \rightarrow W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\left. \begin{matrix} u\bar{u} \\ d\bar{d} \end{matrix} \right\} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$$

$$\sigma_{p\bar{p} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu} \sim 10^{-33} \text{ см}^2$$

$$\sigma_{p\bar{p} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+e^-} \sim 10^{-34} \text{ см}^2$$

$$\sigma_{p\bar{p} \rightarrow X} = 10^{-25} \text{ см}^2 \text{ в } 10^9 \text{ раз больше!}$$



За весь опыт было зарегистрировано $\sim 100 W$
 $\sim 100 Z$

Сейчас $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \dots$ несколько миллионов Z

LEP, SLC

$$2E = 90 \text{ ГэВ} = M_Z$$

$$W^\pm \quad m = 80.22 \pm 0.26 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma = 2.08 \pm 0.07 \text{ ГэВ}$$

основные распады

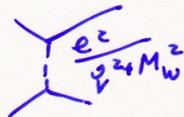
$e\nu$	11%
$\mu\nu$	11%
$\tau\nu$	11%
hadrons	67%

$$Z \quad m = 91.187 \pm 0.007 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma = 2.490 \pm 0.007 \text{ ГэВ}$$

$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$	10%
адроны	70%
невидимые	20%

Большая теория электрослабого взаимодействия
 электронт.



константы связи

KZ и KX + эл. слаб \equiv станд. модель
 Не хватает H — хигсовского бозона
 "защитной массы частиц"

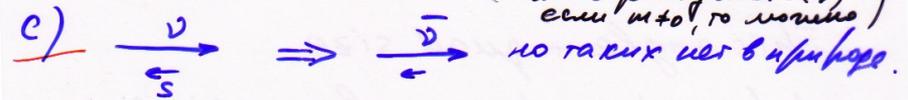
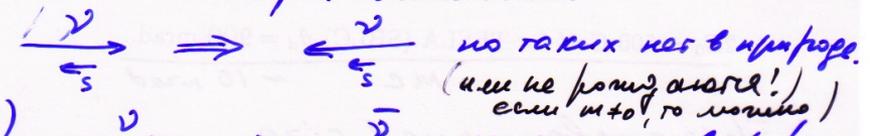
Симметрии

- P - сим. при $\vec{z} \rightarrow -\vec{z}$
- C - заряд. симметрия
- T - обращение времени.

P) Оказывается природа не имеет симметрии при обращении в зеркале



$S = \vec{z} \times \vec{p}$ при обращении в зеркале S не меняет направления, а импульсы частиц меняются на противоположные



В 1964 году обнаружили нарушение CP

$K_0 \equiv \bar{S}d \quad \bar{K}_0 \equiv S\bar{d} \quad K_0 \leftrightarrow \bar{K}_0$
 т.к. странность в слаб. взаимодей. не сохраняется

$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$ имеет CP = 1

$K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$ CP = -1

$K_S \equiv K_1$ распадается на $\pi^+\pi^-\pi^0$ и $\pi^0\pi^0$
 и живет $\sim 10^{-10}$ сек
 $K_L \equiv K_2$ распадается на $\pi^+\pi^-\pi^0$ и $\pi^0\pi^0$ и $\tau \sim 5 \cdot 10^{-8}$ сек

Осциллирующая странность

Пусть родился K^0 -мезон

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$$

$$K^0 = \frac{K_1^0 + K_2^0}{\sqrt{2}} \quad \text{где } K_1^0 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \quad K_2^0 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}}$$

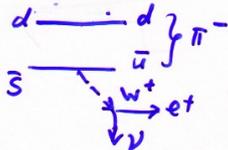
Через время t будет

$$\frac{1}{2} [(K^0 + \bar{K}^0)e^{-i m_1 t - \frac{\Gamma_1 t}{2}} + (K^0 - \bar{K}^0)e^{-i m_2 t - \frac{\Gamma_2 t}{2}}]$$

Будем рассматр. поумноженное распада

$$K^0 \rightarrow e^+ \nu \pi^- \quad \bar{K}^0 \rightarrow e^- \nu \pi^+$$

(K^0 не роет e^-) (\bar{K}^0 не роет e^+)



$$\text{Тогда } N_{e^+} \sim N_K(t) = \frac{1}{4} [e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{-\frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2} t} \cos(m_1 - m_2)t]$$

Отсюда найдем $\Delta m = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ эВ}$.

Несохранение CP

1964 Крокен, Ритч и др., 250

$$K_L \text{ распадается тогда на } \pi^+ \pi^- \quad \frac{A(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \sim 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Может быть } K_L = K_2 + \epsilon K_1 \quad ? = \frac{1}{\sqrt{2}} [(K(1+\epsilon) - \bar{K}(1-\epsilon))]$$

Но тогда т.е. K_L не строго $CP=1$

K_L содержит больше K^0 , чем \bar{K}^0 и чаще распадается на e^+ , чем e^-

и действительно из 2-19

$$\Delta = \frac{K_L \rightarrow e^+ \nu \pi^- - K_L \rightarrow e^- \nu \pi^+}{K_L \rightarrow e^+ \nu \pi^- + K_L \rightarrow e^- \nu \pi^+} = 0.3 \cdot 10^{-2}$$

Итак, есть асимметрия в-ва и антифермиона, природа не бела пока

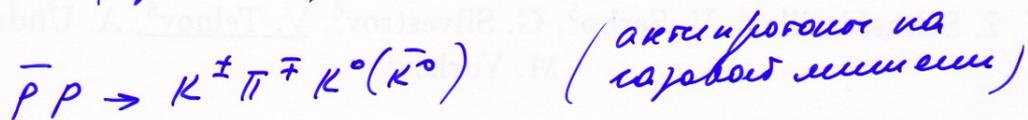
Кроме К-мезонов CP нарушение наблюдается и изучено также в распадах В-мезонов (см. ниже)

Несохранение T-четности

16'

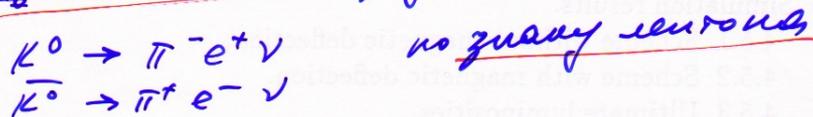
CP - сохраняется, CP T - по всем теор.
значит T-исохраняется? формула сохраняется

Набл. (прямое) T-исохр. 1998 г. CERN



K^0 или \bar{K}^0 опред. по таяку K^{\pm}
в момент $t=0$

Далее $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$, $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ (могут переходить)
эти реакции орбитального и прогибав.
напр. времени. Можно проверить
будем ли по-прежнему K^0 и \bar{K}^0 через время t .
 K^0 или $\bar{K}^0(t)$ опред. по их распадам



$$\begin{aligned} \text{Получено, что} \quad & \frac{P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = \\ & = (6.6 \pm 1.3 \pm 1) 10^{-3} \end{aligned}$$

T инв. нарушается!

Перспектива: изучение распадов B-мезонов (17)

$e^+e^- \rightarrow B\bar{B} \quad 2E \sim 10 \text{ ГэВ} \quad (B \equiv B^0)$

$B \rightarrow \psi K_s, \pi^+\pi^-$
 $\bar{B} \rightarrow \psi K_s, \pi^+\pi^-$ по разному, если CP ≠ (иссохраняется)

Величина \bar{B} определяется по распаду партнера



Создаются B-фабрики в SLAC (США)
 КЕК (Япония)

(построены и успешно работали с ~2000-2009 г)

VI Прямое измерение массы методом резонансной ролеяризации



$\gamma^* \rightarrow B\bar{B}$ (поляризуемые мезоны)

Пререзонанс сина вокруг B

$\omega = \omega_0 (1 + \frac{\mu'}{\mu_0} x)$

известно $\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = \text{част. обр.} \\ \mu' = \text{аном. магн. момент} \\ \mu_0 = \text{норм. } \mu \text{ - } \mu \text{ - } \text{мезона} \end{array} \right.$

Измеряя ω путем резонансной ролеяризации, можно найти μ'
т.е. измерить

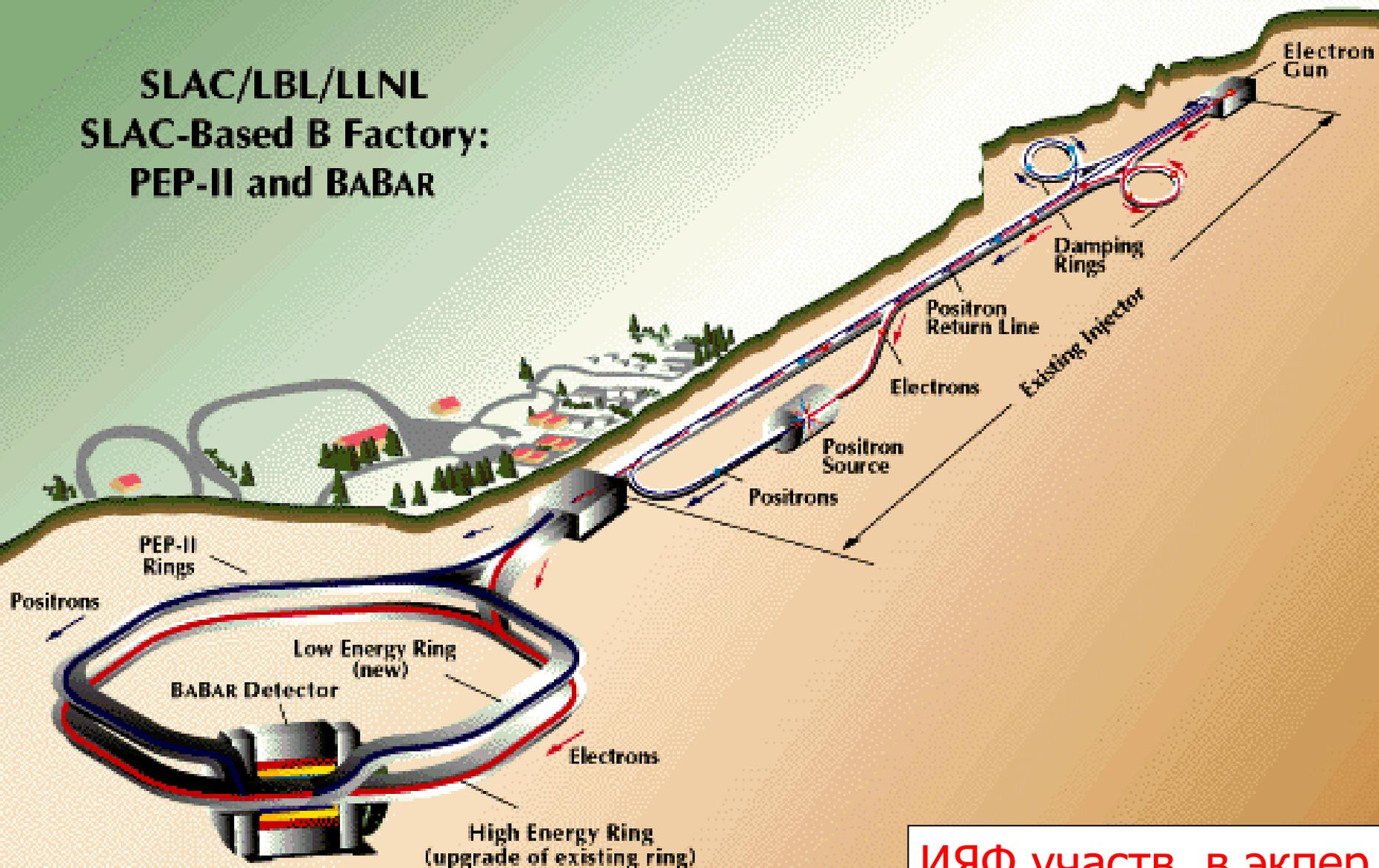
Поляризуемые мезоны рассеивают свет на электронах (от лазера или СИ)

МФД (1979-1984)

K^{\pm}	K^0	ω	ψ	ψ'	ψ''	ψ'''	ψ''''
5	4	2	2.5	10	10	20	20

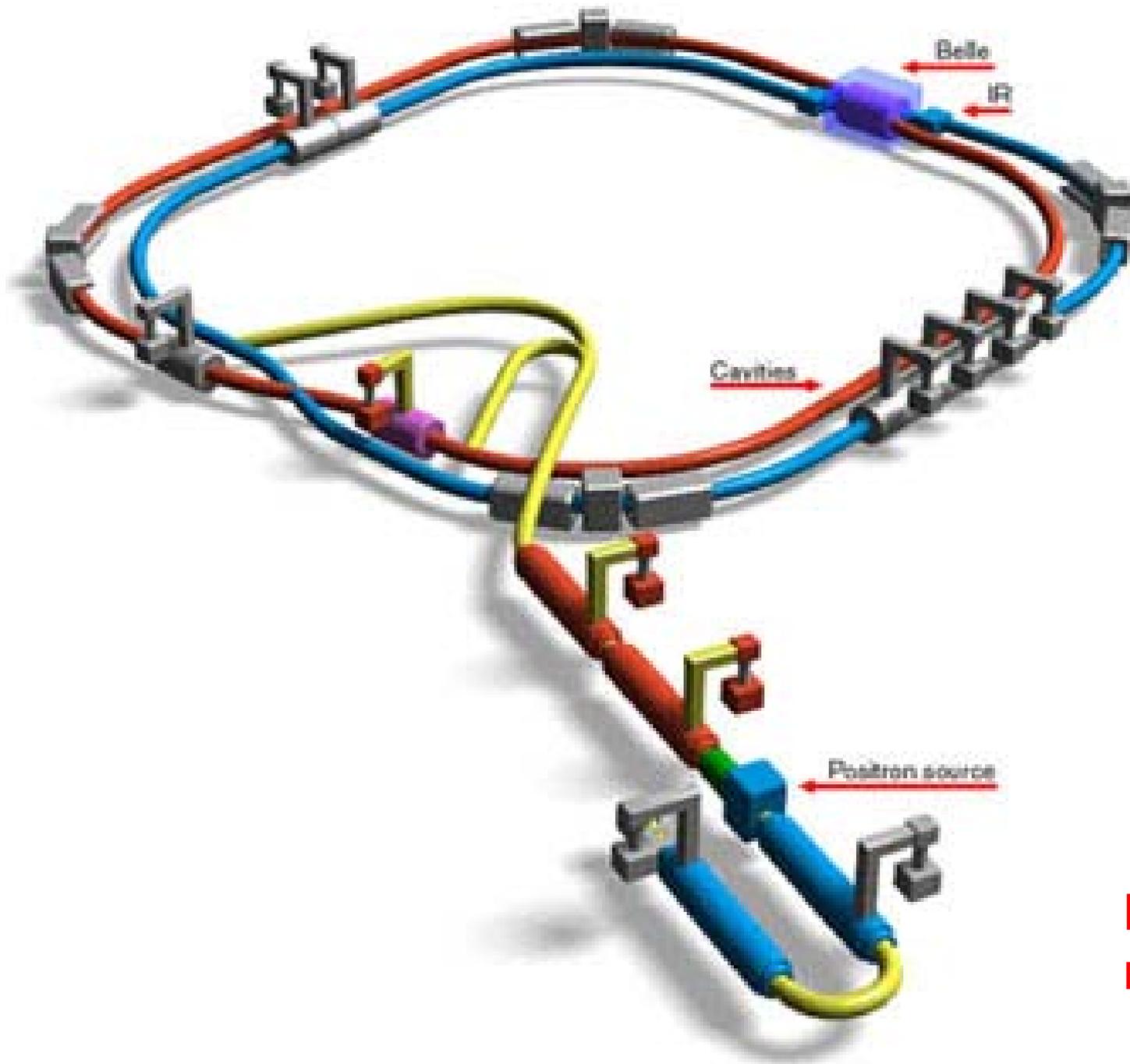
длина волны в нм

SLAC/LBL/LLNL SLAC-Based B Factory: PEP-II and BABAR



ИЯФ участв. в экпер.

Both Rings Housed in Current PEP Tunnel



КЕК-В Factory

ИЯФ участв.
в эксперименте

Observation of CP Violation in the B^0 Meson System

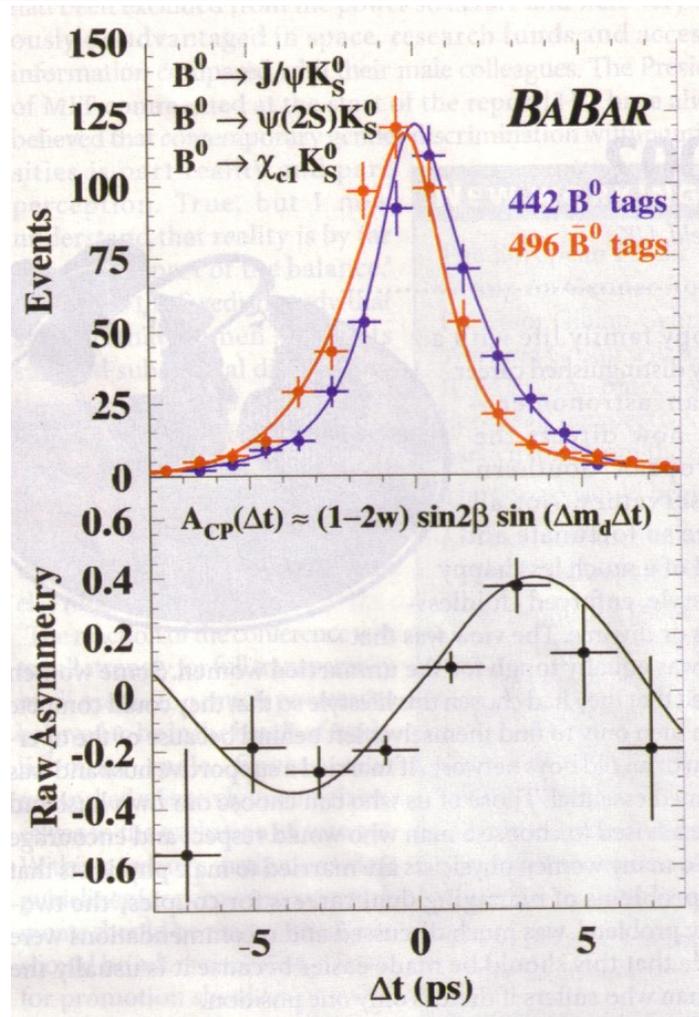
B. Aubert,¹ D. Boutigny,¹ J.-M. Gaillard,¹ A. Hicheur,¹ Y. Karyotakis,¹ J. E. Lees,¹ P. Robbe,¹ V. Tisserand,¹ A. Falaschi,² G. P. Chen,³ J. C. Chen,³ N. D. Qi,³ G. Rong,³ P. Wang,³ Y. S. Zhu,³ G. Eigen,⁴ P. L. Reinertsen,⁵ B. Stugu,⁶ B. Abbott,⁷ G. S. Abrams,⁸ A. W. Borgland,⁸ A. E. Breton,⁸ D. N. Brown,⁹ J. Button-Shaffer,⁹ R. N. Cahn,⁹ A. R. Clark,⁹ M. S. Gill,⁹ A. V. Gritsan,⁹ Y. Groyarova,⁹ R. G. Jacobson,⁹ J. W. Kadel,⁹ J. Kadyk,⁹ L. T. Kerth,⁹ S. Klüfvi,⁹ Yu. G. Kolosovskiy,⁹ J. P. Kral,⁹ C. LeClair,⁹ M. E. Levi,⁹ T. Liu,⁹ G. Lynch,⁹ A. E. Meyer,⁹ M. Moaysesi,⁹ P. J. Oddone,⁹ A. Petruzzo,⁹ M. Pripstein,⁹ N. A. Roe,⁹ A. Romo-Álvarez,⁹ M. T. Ross,⁹ Y. G. Sheklov,⁹ A. V. Telnoy,⁹ W. A. Werzel,⁹ M. S. Zisman,⁹ P. G. Bright-Thomas,¹⁰ T. J. Harrison,¹⁰ C. M. Hawkes,¹⁰ D. J. Knowles,¹⁰ S. W. O'Neale,¹⁰ R. C. Penny,¹⁰ A. T. Watson,¹⁰ N. K. Watson,¹⁰ T. Deppermann,¹¹ K. Goetzen,¹¹ H. Koch,¹¹ J. Krug,¹¹ M. Kuanze,¹¹ B. Lewandowski,¹¹ K. Petrus,¹¹ H. Schuonacker,¹¹ M. Steinke,¹¹ J. C. Andreas,¹¹ N. R. Barlow,¹¹ W. Bhujraj,¹¹ N. Chevalier,¹¹ P. J. Clark,¹¹ W. N. Cottingham,¹¹ N. De Groot,¹¹ N. D. McFall,¹¹ D. Walbur,¹¹ P. F. Wilson,¹¹ K. Abe,¹² C. Hearty,¹² T. S. Mattison,¹² J. A. McKenna,¹² D. Thiesse,¹² S. Jolly,¹² A. K. McKenney,¹² J. Tinsley,¹² Y. E. Blinov,¹³ A. D. Bukin,¹³ D. A. Bukin,¹³ A. R. Buzykaev,¹³ V. B. Golubev,¹³ V. N. Ivanchenko,¹³ A. A. Kozlov,¹³ E. A. Kuznetsov,¹³ A. P. Ouchin,¹³ A. A. Salnikov,¹³ S. I. Serednyuk,¹³ Yu. I. Skovper,¹³ V. I. Telnoy,¹³ A. N. Yashkov,¹³ D. Beat,¹⁴ A. J. Lankford,¹⁴ M. Mandelkern,¹⁴ S. McManis,¹⁴ D. P. Stoker,¹⁴ A. Hasan,¹⁴ K. Atakutzu,¹⁵ C. Buchwalter,¹⁵ S. Chiu,¹⁵ J. G. Branson,¹⁵ D. B. MacFarlane,¹⁵ S. Fretz,¹⁵ Sh. Kharabou,¹⁵ G. Rayou,¹⁵ V. Sharma,¹⁵ C. Campagnari,¹⁵ B. Dahnke,¹⁵ P. A. Hart,¹⁵ N. Kuznetsova,¹⁵ S. L. Levy,¹⁵ G. Long,¹⁵ A. Li,¹⁵ J. D. Richardson,¹⁵ W. Verkerke,¹⁵ M. Witherell,¹⁵ S. Yellin,¹⁵ J. Berlinger,¹⁵ D. E. Dorfan,¹⁵ A. M. Eisner,¹⁵ A. Frey,¹⁶ A. A. Grillo,¹⁶ M. Grothe,¹⁶ C. A. Heusch,¹⁶ R. P. Johnson,¹⁶ W. S. Kroeger,¹⁶ W. S. Lockman,¹⁶ T. Pulliam,¹⁶ H. Sadrozinski,¹⁶ T. Schalk,¹⁶ R. E. Schmitz,¹⁶ B. A. Schumm,¹⁶ A. Seider,¹⁶ M. Turri,¹⁶ W. Walkowiak,¹⁶ D. C. Williams,¹⁶ M. G. Wilson,¹⁶ E. Chen,¹⁷ G. P. Dubois-Felausou,¹⁷ A. Dvornak,¹⁷ D. G. Hitlin,¹⁷ S. Meizer,¹⁷ J. Oysang,¹⁷ F. C. Porter,¹⁷ A. Ryd,¹⁷ A. Samuel,¹⁷ M. Wever,¹⁷ S. Yang,¹⁷ R. Y. Zhu,¹⁷ S. Devmal,¹⁸ T. L. Geld,¹⁸ S. Jayatilake,¹⁸ G. Masciulli,¹⁸ B. T. Meadows,¹⁸ M. D. Sokoloff,¹⁸ T. Barillari,¹⁸ P. Bloom,¹⁸ M. O. Dinis,¹⁸ S. Fahey,¹⁸ W. T. Ford,¹⁸ D. R. Johnson,¹⁸ A. Olivas,¹⁸ N. Auernberg,¹⁸ H. Park,¹⁸ P. Rankin,¹⁸ J. Rey,¹⁸ S. Sen,¹⁸ J. G. Smith,¹⁸ W. C. van Hook,¹⁸ D. L. Wagner,¹⁸ J. L. Harton,¹⁸ M. Krishnamurthy,¹⁸ A. Soffer,¹⁸ W. H. Toki,¹⁸ R. J. Wilson,¹⁸ Z. Wang,¹⁸ T. Bauer,¹⁸ J. Bose,¹⁸ T. Colberg,¹⁸ G. Dattlinger,¹⁸ M. Dickopp,¹⁸ R. S. Dubitzky,¹⁸ A. Hulse,¹⁸ E. Misy,¹⁸ R. Müller-Pfeiffer,¹⁸ S. Otto,¹⁸ K. R. Schubert,¹⁸ R. Schwierz,¹⁸ B. Spaas,¹⁸ L. Wilden,¹⁸ L. Beltr,¹⁸ D. Bernard,¹⁸ G. R. Bonnand,¹⁸ F. Brochard,¹⁸ J. Cohen-Tannouji,¹⁸ S. Ferrara,¹⁸ E. Reussot,¹⁸ S. T. Jansen,¹⁸ Ch. Thiebaut,¹⁸ G. Vasileiadis,¹⁸ M. Verderi,¹⁸ A. Anjoshaas,¹⁸ R. Berner,¹⁸ A. Khan,¹⁹ D. Lavin,¹⁹ F. Muheim,¹⁹ S. Playfer,¹⁹ J. E. Swain,¹⁹ M. Fabis,¹⁹ C. Boreas,¹⁹ C. Bozzi,¹⁹ S. Dittongo,¹⁹ M. Polignoni,¹⁹ L. Picazzini,¹⁹ E. Treadwell,¹⁹ P. Anulli,¹⁹ R. Baldini-Feltrinelli,¹⁹ A. Calceano,¹⁹ R. de Saugoy,¹⁹ D. Fakisi,¹⁹ G. Fiorocchiano,¹⁹ P. Fattori,¹⁹ I. M. Peruzzi,¹⁹ M. Piccolo,¹⁹ Y. Xie,¹⁹ A. Zallo,¹⁹ S. Bagdasarian,¹⁹ A. Buzzo,¹⁹ R. Coetti,¹⁹ G. Ciuchetti,¹⁹ F. Fabbicatore,¹⁹ S. Farina,¹⁹ M. Lo Vetere,¹⁹ M. Masci,¹⁹ M. R. Meade,¹⁹ R. Muscarelli,¹⁹ M. Pallavicini,¹⁹ R. Parodi,¹⁹ S. Passaggio,¹⁹ F. C. Pastore,¹⁹ C. Patrignani,¹⁹ G. M. Pisca,¹⁹ C. Priano,¹⁹ E. Robutti,¹⁹ A. Santoni,¹⁹ M. Morii,¹⁹ R. Bartoldus,²⁰ T. Dignan,²⁰ R. Hamilton,²⁰ U. Mallik,²⁰ J. Cochran,²⁰ H. B. Crawley,²⁰ F.-A. Fischer,²⁰ J. Lanas,²⁰ W. T. Meyer,²⁰ E. I. Rosenberg,²⁰ M. Benkebil,²⁰ C. Goswaldier,²⁰ C. Haast,²¹ A. H. Höcker,²¹ H. M. Lacker,²¹ S. Laplace,²¹ V. Lepeltier,²¹ A. M. Lutz,²¹ S. Pascauzzi,²¹ M. H. Schme,²¹ S. Trinczev-Devold,²¹ A. Valassi,²¹ G. Wormser,²¹ R. M. Bionta,²¹ V. Brigičević,²¹ D. J. Lange,²¹ M. Mugge,²¹ X. Shi,²¹ K. van Bibber,²¹ T. J. Weaue,²¹ D. M. Wright,²¹ C. R. Wuens,²¹ M. Carroll,²¹ J. R. Fry,²¹ E. Gabstler,²¹ R. Garnet,²¹ M. G. George,²¹ M. Kay,²¹ D. J. Payne,²¹ R. J. Sloan,²¹ C. Teusmann,²¹ M. L. Aspöcker,²¹ D. A. Bowdler,²¹ P. D. Dancu,²¹ U. Egge,²¹ T. Eschrich,²¹ N. J. W. Gunnarsdóttir,²¹ J. A. Nash,²¹ P. Sauer,²¹ D. Smith,²¹ D. E. Azzopardo,²² J. J. Back,²² P. Dixon,²² P. E. Harrison,²² R. J. L. Foster,²² H. W. Shorthouse,²² P. Stroeher,²² P. B. Vidal,²² M. I. Williams,²² G. Cowan,²² S. George,²² M. G. Green,²² A. Kunp,²² C. E. Mark,²² P. McGrath,²² T. R. McMahon,²² S. Ricciardi,²² F. Salvatore,²² I. Scott,²² G. Saitava,²² D. Brown,²² C. L. Davis,²² J. Allison,²³ R. J. Barlow,²³ J. T. Boyd,²³ A. C. Forti,²³ J. Fullwood,²³ F. Jackson,²³ G. D. Lafferty,²³ N. Savvas,²³ E. T. Siozopoulos,²³ J. H. Weatherall,²³ A. Rubin,²³ A. Jawahery,²³ V. Lillard,²³ J. Oliva,²³ D. A. Robertson,²³ J. R. Schieck,²³ G. Blaylock,²³ C. Dallapiccola,²³ K. T. Flood,²³ S. S. Hertzbach,²³ R. Kofler,²³ T. E. Moore,²³ H. Stengle,²³ S. Willcock,²³ B. Brau,²³ R. Cowan,²³ G. Sciolla,²³ F. Taylor,²³ R. K. Yamamoto,²³ M. Milek,²³ P. M. Patel,²³ J. Triebbeck,²³ F. Lanni,²³ F. Palombo,²³ J. M. Bauer,²³ M. Booker,²³ L. Cremaldi,²³ V. Eschenberg,²³ R. Kroeger,²³ J. Reidy,²³ D. A. Santoro,²³ D. J. Surmeier,²³ J. P. Martin,²³ Y. Nie,²³ R. Seitz,²³ P. Tatas,²³

Y. Zecet,²⁴ H. Nicholson,²⁴ C. S. Sutton,²⁴ C. Cartaro,²⁴ N. Cavallo,²⁴ G. De Narde,²⁴ F. Fabbio,²⁴ C. Gato,²⁴ L. Lista,²⁴ P. Paolucci,²⁴ D. Piccolo,²⁴ C. Sciacca,²⁴ J. M. LoSecco,²⁴ J. R. G. Akmiller,²⁴ T. A. Gabriel,²⁴ T. Handler,²⁴ M. Margoni,²⁴ G. Micheleni,²⁴ M. Morandini,²⁴ M. Poasoco,²⁴ M. Rotondo,²⁴ F. Simonetto,²⁴ R. Stroili,²⁴ E. Torrasa,²⁴ C. Voci,²⁴ M. Benayoun,²⁴ H. Briand,²⁴ J. Chmura,²⁴ P. David,²⁴ Ch. de la Vaisière,²⁴ L. Del Buono,²⁴ O. Haraon,²⁴ F. Le Diberder,²⁴ Ph. Lecoq,²⁴ J. Lory,²⁴ L. Roos,²⁴ J. Stark,²⁴ S. Verrelli,²⁴ P. F. Manfredi,²⁴ V. Re,²⁴ V. Spziali,²⁴ F. E. Frank,²⁵ L. Gladney,²⁵ Q. H. Guo,²⁵ J. H. Baeets,²⁵ C. Angelini,²⁵ G. Battagioni,²⁵ S. Betrisi,²⁵ M. Bondioli,²⁵ M. Carpucci,²⁵ F. Forti,²⁵ M. A. Giorgi,²⁵ A. Lusiani,²⁵ F. Martinez-Vidal,²⁵ M. Morganti,²⁵ N. Neri,²⁵ E. Focioni,²⁵ M. Raso,²⁵ G. Rizzo,²⁵ P. Santelli,²⁵ G. Sini,²⁵ G. Triggiani,²⁵ J. Walsh,²⁵ M. Haire,²⁵ D. Judd,²⁵ K. Fick,²⁵ L. Thoburn,²⁵ D. E. Wagoner,²⁵ J. Albert,²⁵ C. Bula,²⁵ P. Elbert,²⁵ C. Lu,²⁵ K. T. McDonald,²⁵ V. Miftakov,²⁵ S. F. Schaffner,²⁵ A. J. S. Smith,²⁵ A. Tumanov,²⁵ E. W. Varma,²⁵ G. Cavoto,²⁵ D. del Re,²⁵ R. Faccini,²⁵ P. Ferrarotto,²⁵ P. Ferroni,²⁵ K. Fritzi,²⁵ E. Larsson,²⁵ E. Leonardi,²⁵ M. A. Mazzozi,²⁵ S. Morganti,²⁵ G. Piredda,²⁵ F. Satta-Jehmal,²⁵ M. Serra,²⁵ C. Vocea,²⁵ S. Christ,²⁵ R. Wald,²⁵ T. Adye,²⁵ B. Franek,²⁵ N. I. Geddes,²⁵ G. P. Gopal,²⁵ S. M. Xella,²⁵ R. Alekseev,²⁵ G. De Domenico,²⁵ S. Emery,²⁵ A. Gaidot,²⁵ S. F. Gazdhar,²⁵ P.-F. Gimud,²⁵ G. Hamel de Monchaussat,²⁵ W. Koszarek,²⁵ M. Langer,²⁵ G. W. London,²⁵ B. Mayer,²⁵ B. Sefarsky,²⁵ G. Yassierli,²⁵ Ch. Yèche,²⁵ M. Zito,²⁵ N. Copti,²⁵ M. Y. Purohit,²⁵ H. Singh,²⁵ F. X. Yumiceva,²⁵ I. Adami,²⁵ P. L. Anthony,²⁵ D. Aston,²⁵ K. Baini,²⁵ J. P. Berger,²⁵ E. Bloom,²⁵ A. M. Boyarski,²⁵ F. Buloa,²⁵ G. Caldeini,²⁵ R. Claus,²⁵ M. R. Cooney,²⁵ D. P. Coupl,²⁵ D. H. Coward,²⁵ J. Dorcas,²⁵ M. Doser,²⁵ W. Duwaquode,²⁵ R. C. Field,²⁵ T. Glasstone,²⁵ G. L. Godfrey,²⁵ S. J. Gowdy,²⁵ F. Gross,²⁵ T. Hine,²⁵ T. Hryn'ova,²⁵ M. E. Huffer,²⁵ W. R. Innes,²⁵ C. P. Jessop,²⁵ M. H. Kelsey,²⁵ P. Kim,²⁵ M. L. Kocis,²⁵ U. Langenegger,²⁵ D. W. S. Leith,²⁵ S. Lutz,²⁵ V. Luth,²⁵ H. L. Lynch,²⁵ H. Masiak,²⁵ R. Mesner,²⁵ K. C. Morfitt,²⁵ R. Mount,²⁵ D. R. Muller,²⁵ C. P. O'Gadry,²⁵ M. Perl,²⁵ S. Petak,²⁵ H. Quinn,²⁵ B. N. Ratcliff,²⁵ M. S. Robertson,²⁵ L. S. Rochester,²⁵ A. Roodman,²⁵ T. Schietinger,²⁵ R. H. Schindler,²⁵ J. Schwinding,²⁵ J. T. Seaman,²⁵ V. V. Serbo,²⁵ A. Snyder,²⁵ A. Soth,²⁵ S. M. Spanier,²⁵ J. Stelzer,²⁵ M. K. Sullivan,²⁵ H. A. Tanaka,²⁵ J. Va'va,²⁵ S. R. Wagner,²⁵ A. J. R. Weintain,²⁵ U. Wiesandt,²⁵ J. Wisniewski,²⁵ D. H. Wright,²⁵ C. C. Young,²⁵ R. R. Yurchak,²⁵ C. H. Cheng,²⁶ D. Kirkby,²⁶ T. I. Meyer,²⁶ C. Ross,²⁶ R. Henderson,²⁶ W. Bugg,²⁶ H. Cohn,²⁶ A. W. Weidmann,²⁶ J. M. Izen,²⁶ I. Kitayama,²⁶ X. C. Lou,²⁶ M. Turotte,²⁶ P. Bianchi,²⁶ M. Bona,²⁶ B. Di Girolamo,²⁶ D. Garofalo,²⁶ A. Srol,²⁶ D. Zanzi,²⁶ L. Boaliso,²⁶ G. Della Ricca,²⁶ L. Lesceri,²⁶ A. Porrilli,²⁶ P. Pompat,²⁶ G. Vuagué,²⁶ R. S. Paavio,²⁶ C. M. Brown,²⁶ A. De Silva,²⁶ R. Kowalski,²⁶ J. M. Roney,²⁶ H. R. Band,²⁶ E. Charuka,²⁶ S. Dasu,²⁶ F. Di Lodovico,²⁶ A. M. Eisenbaum,²⁶ H. Hu,²⁶ J. R. Johnson,²⁶ R. Liu,²⁶ J. Nielsen,²⁶ Y. Pan,²⁶ R. Prepost,²⁶ I. J. Scott,²⁶ S. J. Sekula,²⁶ J. H. von Wittenberg-Töller,²⁶ S. L. Wu,²⁶ Z. Yu,²⁶ H. Zobernig,²⁶ T. M. E. Kordich,²⁶ and H. Neal²⁶

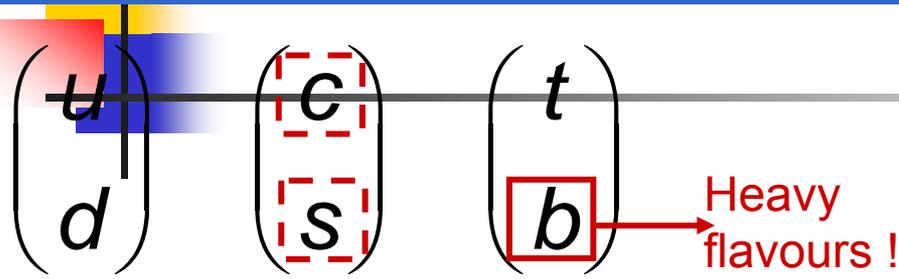
(BABAR Collaboration)

¹Laboratoire de Physique des Particules, F-74901 Annecy-le-Vieux, France²Università di Bari, Dipartimento di Fisica and INFN, I-70126 Bari, Italy³Institute of High Energy Physics, Beijing 100039, China⁴University of Bergen, Institute of Physics, N-5017 Bergen, Norway⁵Lawrence Berkeley National Laboratory and University of California, Berkeley, California 94720⁶University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom⁷Ruhr Universität Bochum, Institut für Experimentelle Physik 1, D-44780 Bochum, Germany⁸University of Bristol, Bristol B8 3TH, United Kingdom⁹University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada V6T 1Z1¹⁰Brown University, Providence, Rhode Island 02908, United Kingdom¹¹Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk 630090, Russia¹²University of California at Irvine, Irvine, California 92697¹³University of California at Los Angeles, Los Angeles, California 90024¹⁴University of California at San Diego, La Jolla, California 92093¹⁵University of California at Santa Barbara, Santa Barbara, California 93106¹⁶University of California at Santa Cruz, Institute for Particle Physics, Santa Cruz, California 95064¹⁷California Institute of Technology, Pasadena, California 91125¹⁸University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio 45221¹⁹University of Colorado, Boulder, Colorado 80509²⁰Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523²¹Technische Universität Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik, D-01062 Dresden, Germany²²Centre d'Électronique, F-01128 Palaiseau, France

CP-несохранение в B-мезонах



Framework : the CKM matrix

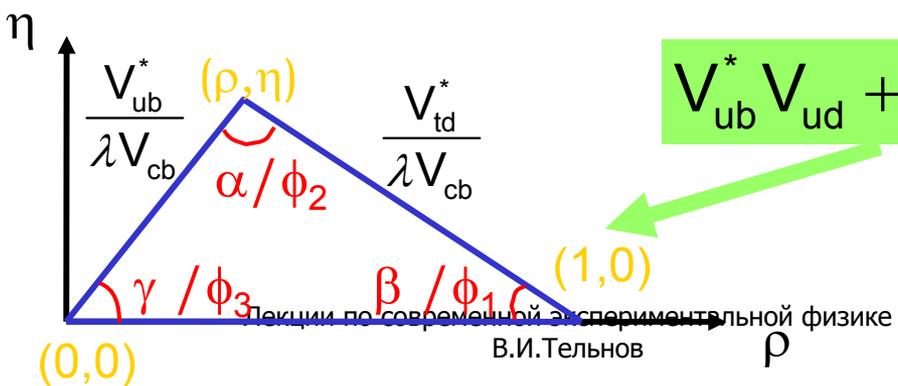


$$\lambda = \sin(\theta_c) = 0.2256 \pm 0.0014$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2 & \lambda & A \lambda^3(\rho-i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A \lambda^2 \\ A \lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

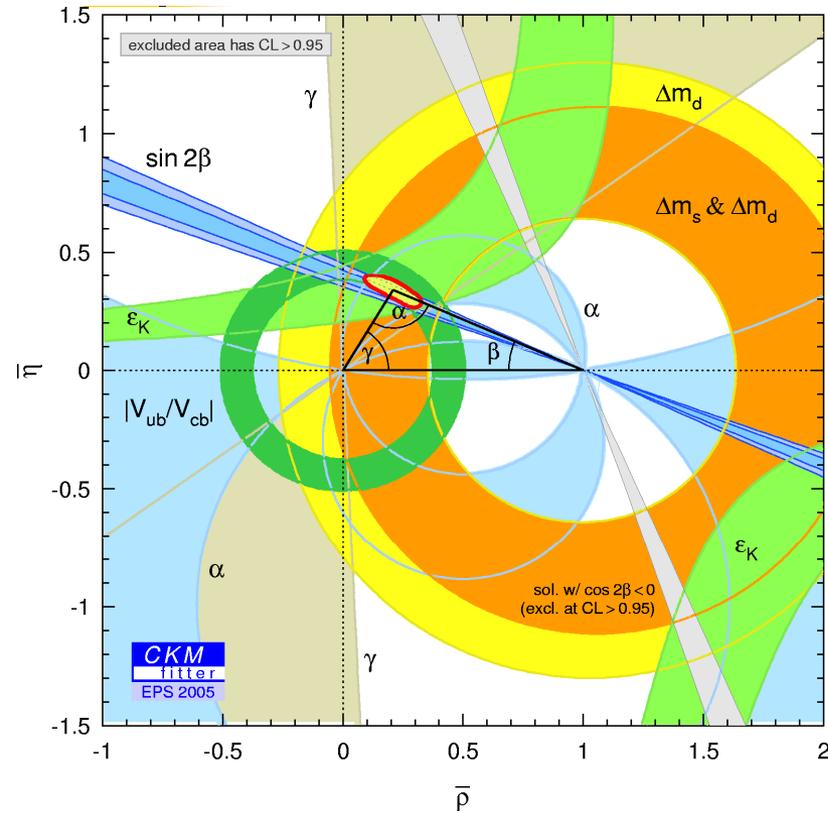
CP violation

The unitarity triangle :



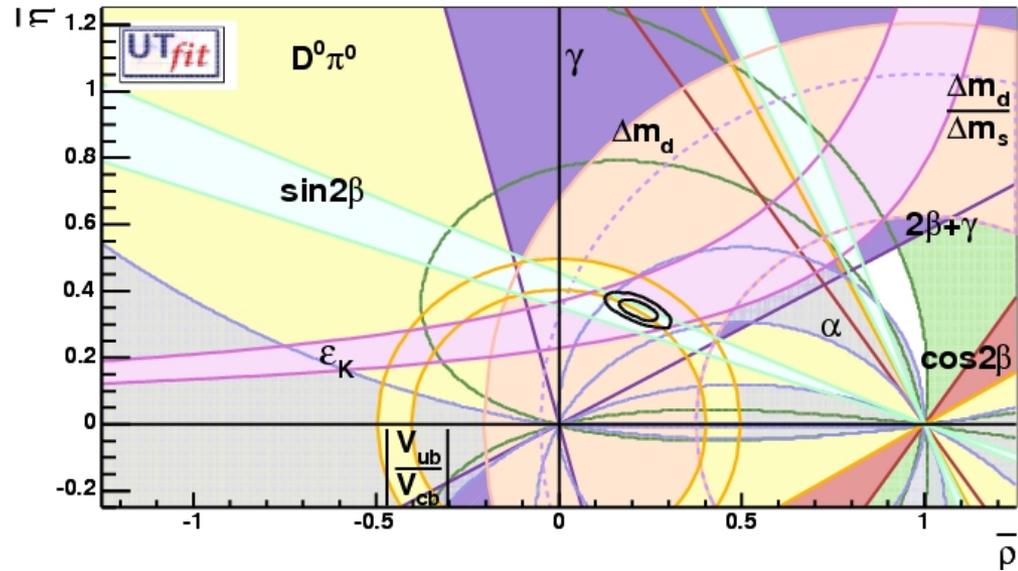
$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{tb}^* V_{td} + V_{cb}^* V_{cd} = 0$$

General overall agreement !



$$\bar{\rho} = 0.208^{+0.038}_{-0.043}$$

$$\bar{\eta} = 0.337^{+0.024}_{-0.022}$$



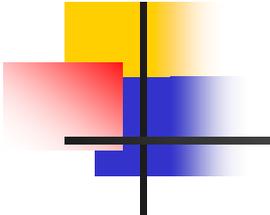
$$\bar{\rho} = 0.216 \pm 0.036$$

$$\bar{\eta} = 0.342 \pm 0.022$$

Besides slightly different theoretical inputs and different statistical treatments

Coherent picture of CP violation in the SM framework

The CKM mechanism works well... NP should appear as correction to this framework



Однако, наблюдаемое CP-нарушение в распадах K и B мезонах недостаточно для объяснения **барионной асимметрии Вселенной!** (благодаря которой мы существуем)

Это одна из самых интригующих загадок природы!

Основные направления

I. Высокие энергии

LEP-2 e^+e^-
Tevatron pp

- a) $pp \rightarrow$
LHC $2E = 14 \text{ TeV}$, 2004 год (H, супер-симм.)
- b) $e^+e^-, \mu^+\mu^-$ - линейные коллайдеры
 $2E = 500 \text{ GeV} \rightarrow 2020 \text{ GeV}$ год = ?
- c) $\mu^+\mu^-$ - обустраивается ($\mu\mu \rightarrow H$ переи.)

раб. с 2009 г

нач. строит. 201?

II Низкие энергии

- a) ϕ -фабрики $2E = 1 \text{ GeV}$ 1998
CP, редкие распады $P \rightarrow K^0, K^{\pm}$
- b) B-фабрики, CP, 1998-9
- c) Несохранение лептонного числа и др.
 $\mu \rightarrow e \gamma$ $\mu \rightarrow e z$

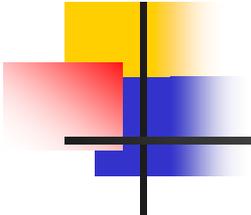
III Столкновения ядер

$2 \times 300 \text{ GeV}$ RIKEN Брукхейвен
 $2 \times 14 \text{ TeV}$ LHC ЦЕРН

Кварк-глюонная плазма

IV Нейтринные осцилляции

(обнаружены!)
значит $m_\nu \neq 0$
(лепт. нейтр. массов.)



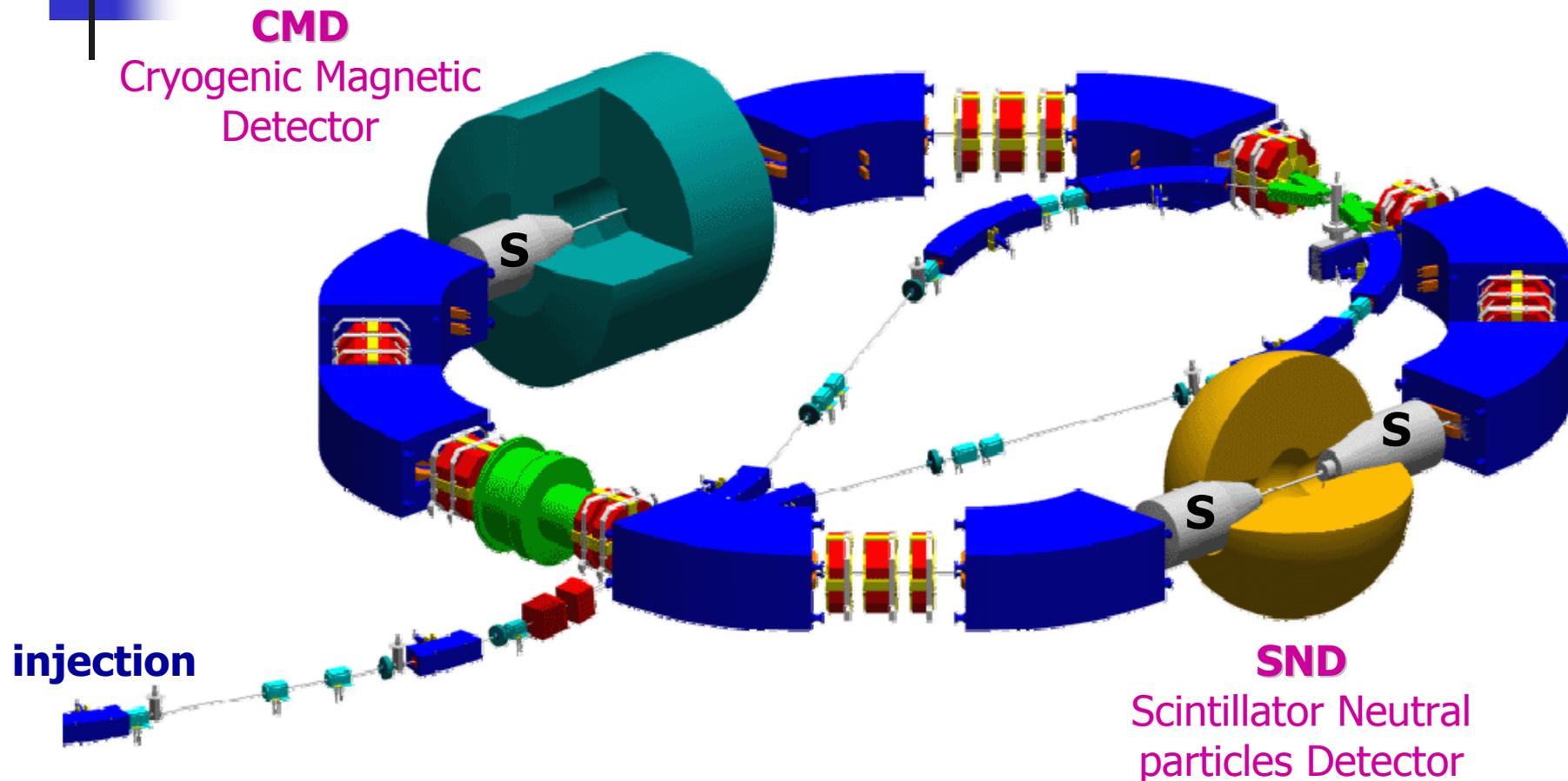
Низкие энергии, e^+e^- фабрики

Nearest future: round beams

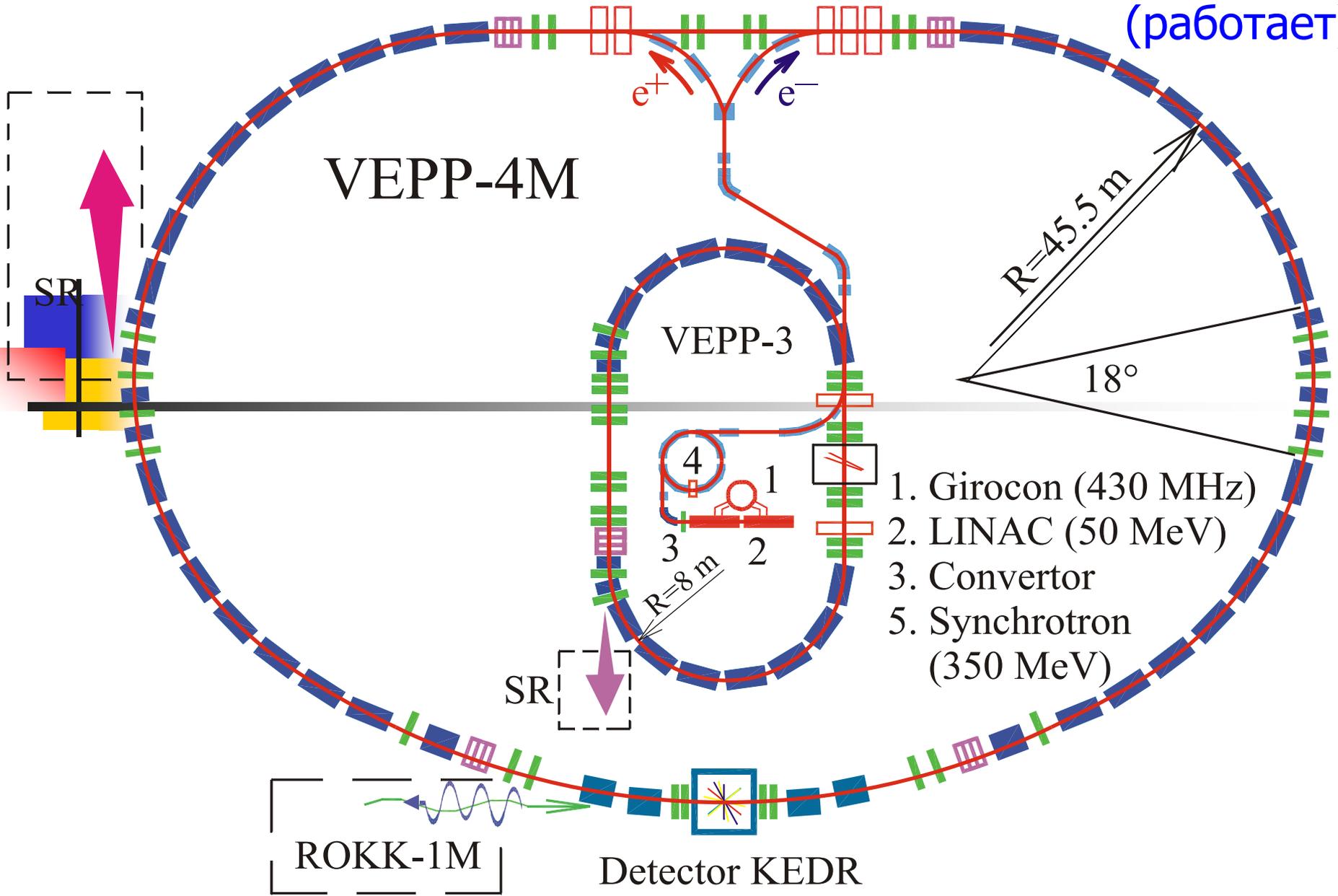
VEPP-2000 Collider

Status: запуск в работу 2008

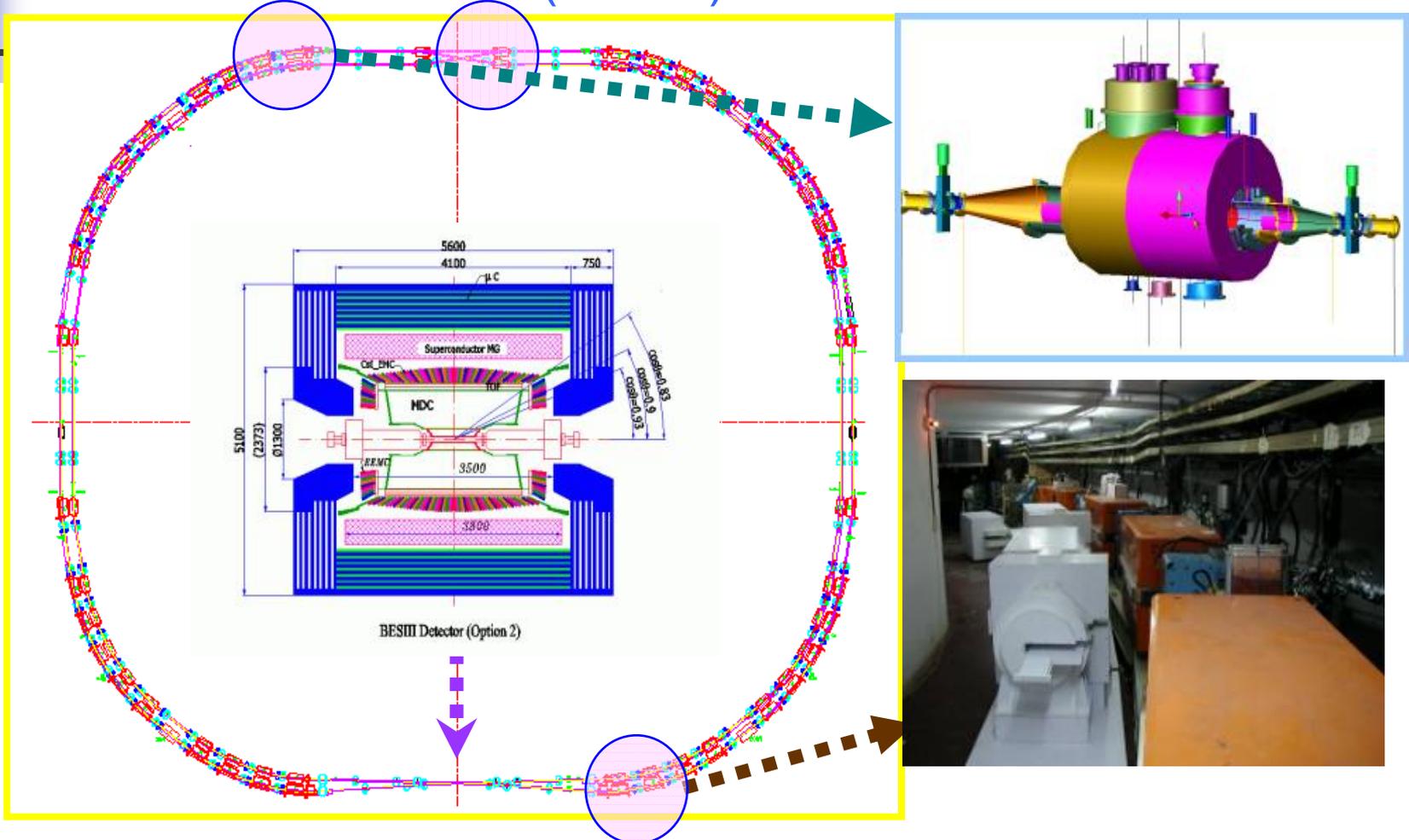
Новосибирск, ИЯФ
(на стадии запуска)



Новосибирск, ИЯФ
(работает)

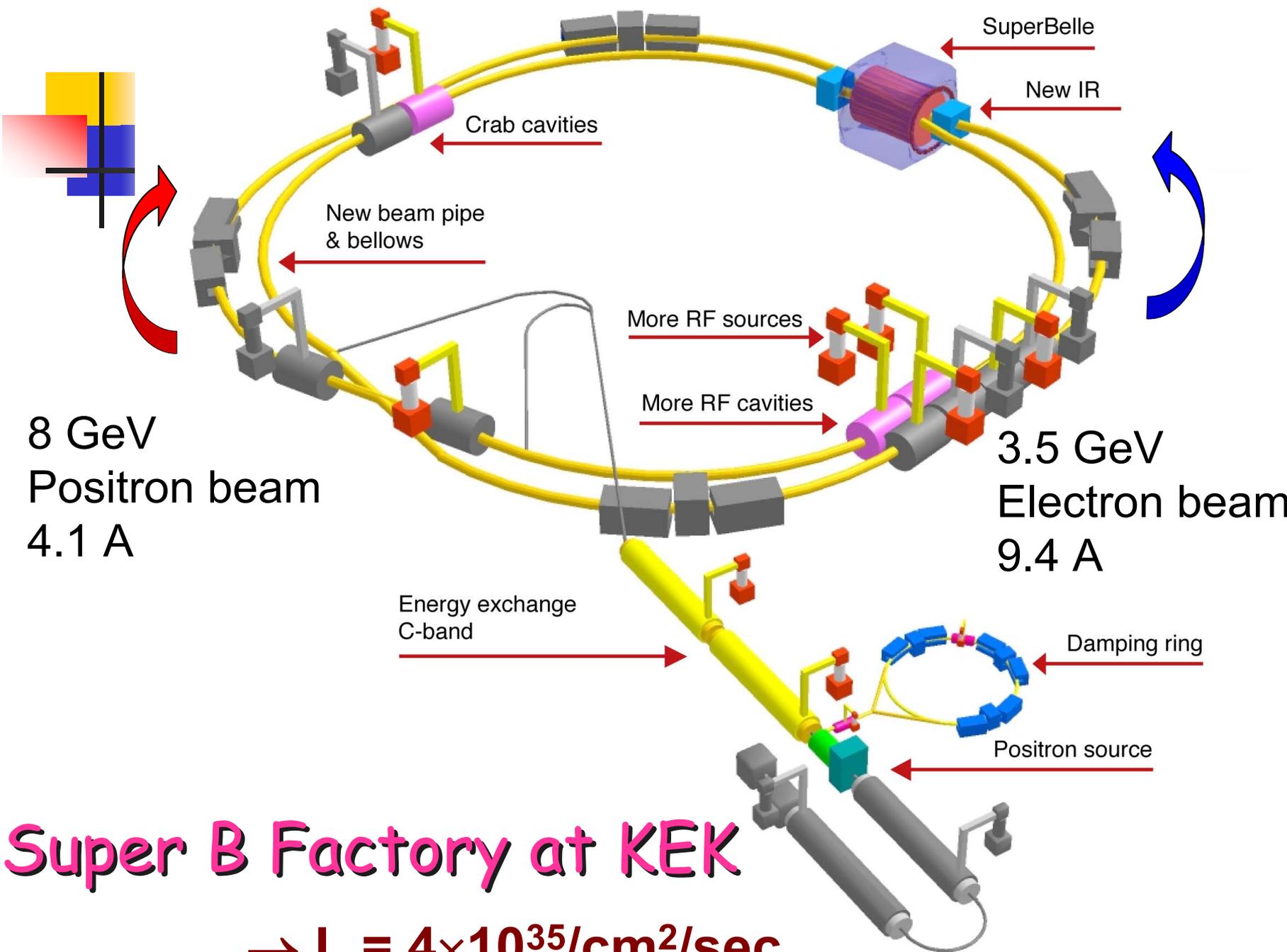


BEPCII: a high luminosity double-ring collider (Китай)



PAST: The BEPC was constructed (1984-1988) for both high energy physics and synchrotron radiation research. The machine operated successfully for more than 15 years since 1989. The peak luminosity was $1.2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} @ 1.89 \text{ GeV}$.
 Detailed study of J/Ψ and Ψ' rare decays. Будет $L=10^{33}$ (с,т фабрика) (работает с ~2008)

Лекции по современной экспериментальной физике
 В.И.Тельнов



Super B Factory at KEK

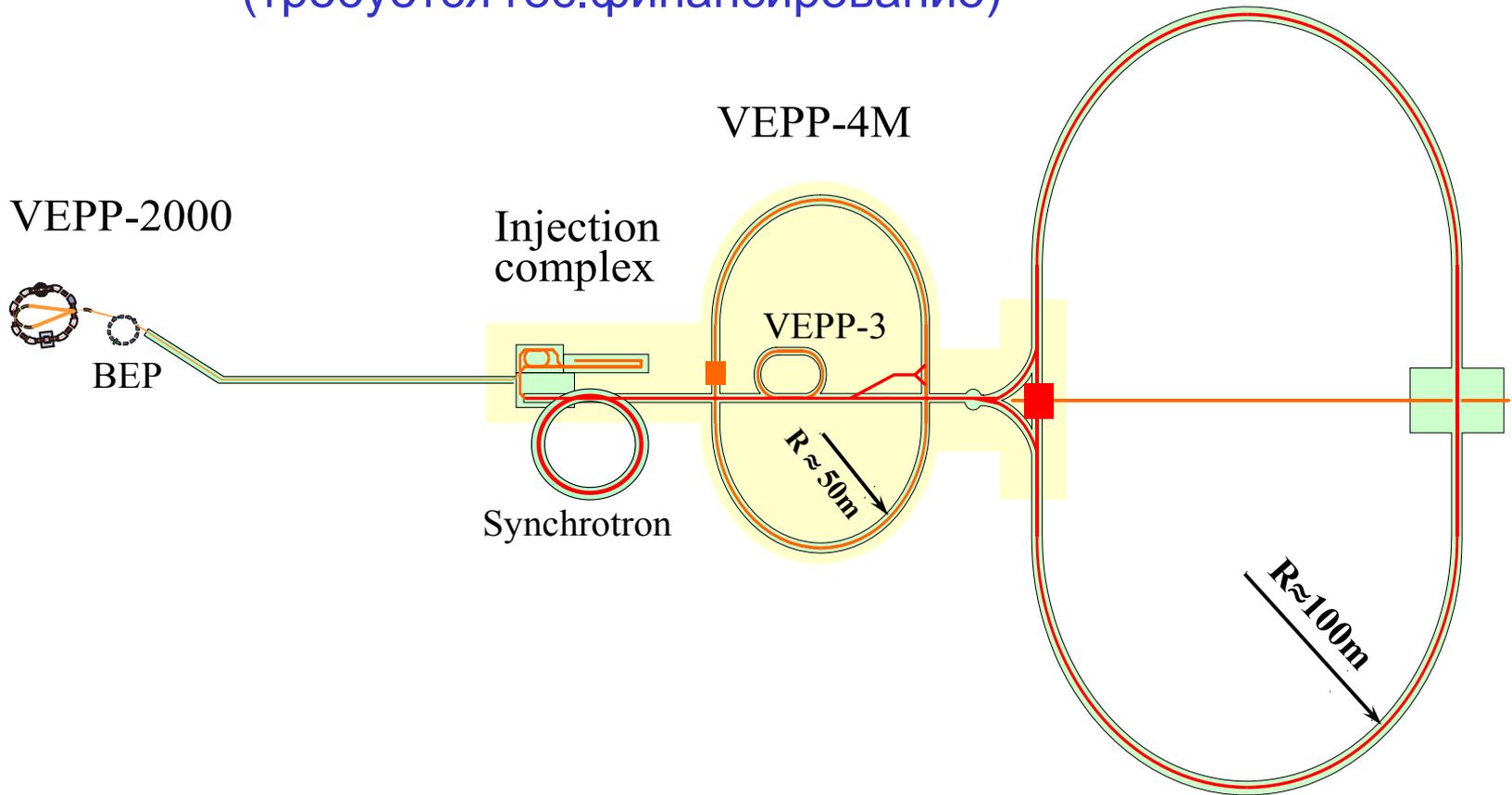
→ $L = 4 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$

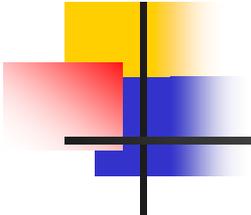
(Новосибирск, ИЯФ)

C/tau – фабрика

(требуется гос.финансирование)

Charm/Tau Factory
(double ring)



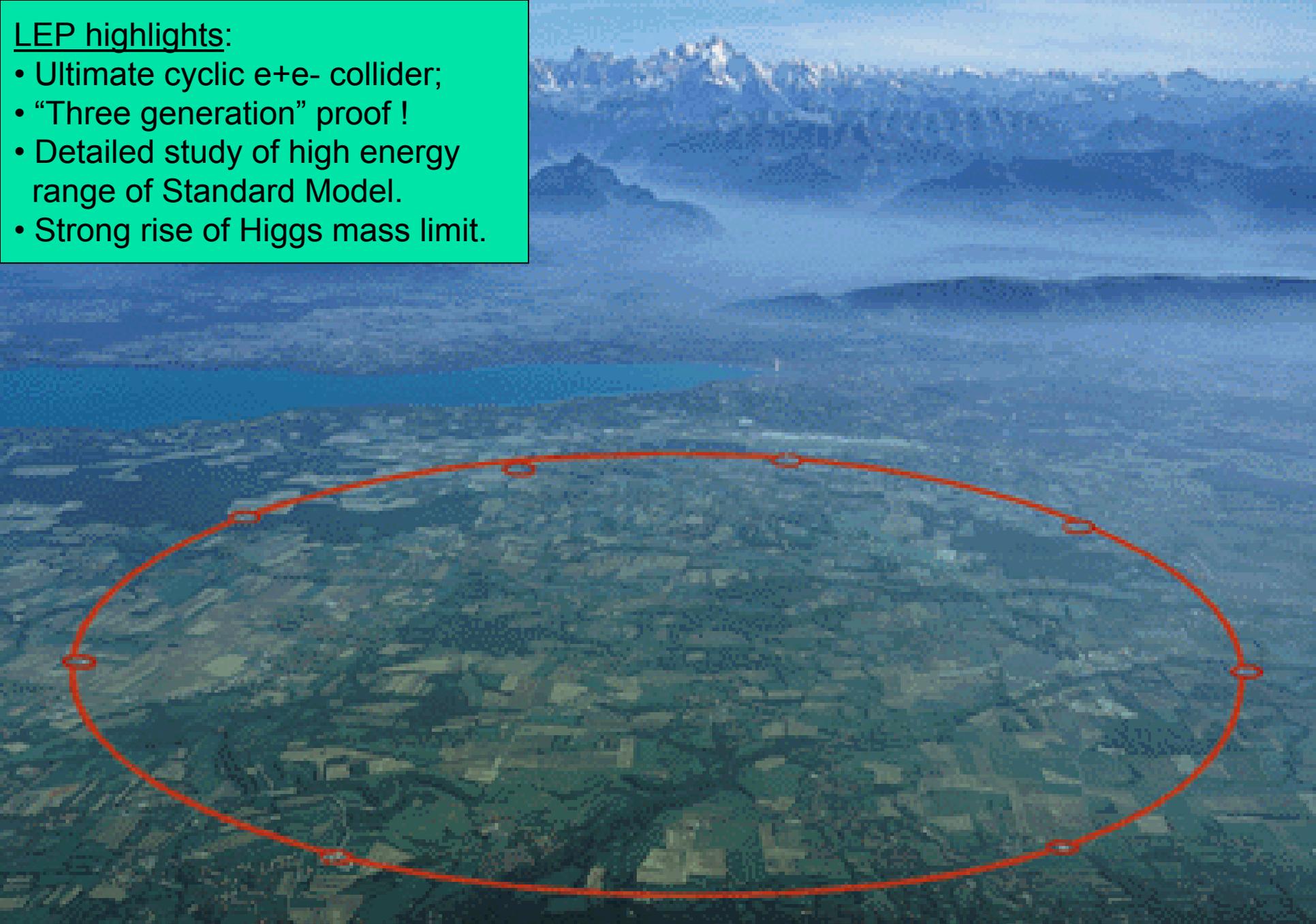


Высокие энергии

LHC (pp), ILC (e+e-) $\mu^+\mu^-$???

LEP highlights:

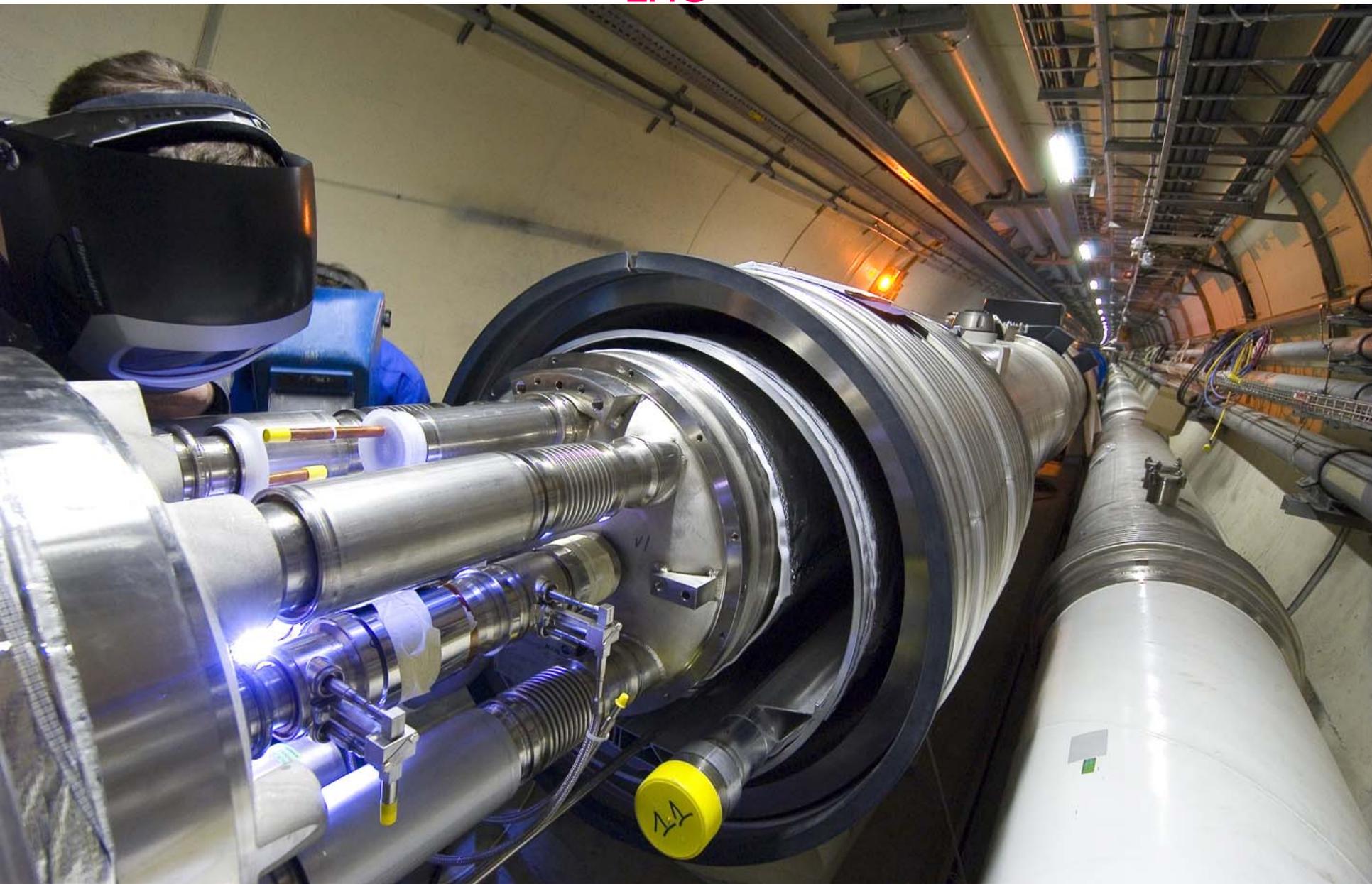
- Ultimate cyclic e^+e^- collider;
- “Three generation” proof !
- Detailed study of high energy range of Standard Model.
- Strong rise of Higgs mass limit.



CERN from the AIR

LEP → LHC !)

LHC



Assembly welding of LHC magnets in the tunnel

В.И. Тельнов

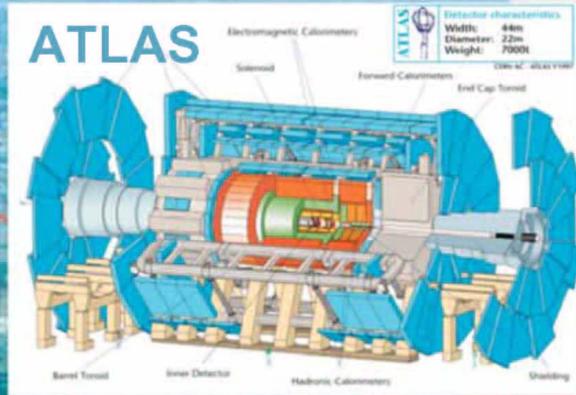
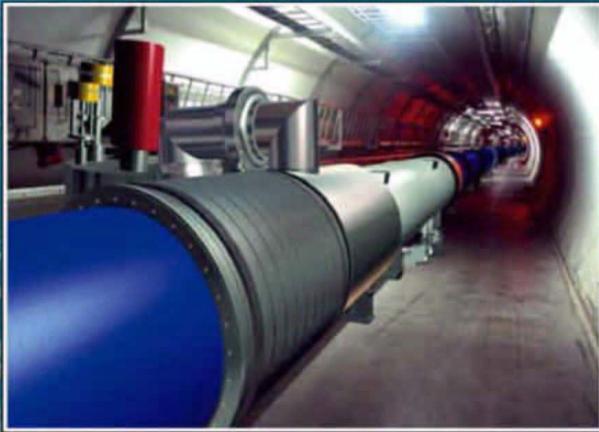
Начало работы 2008 г.

LHC, эксперименты

pp, B-Physics,
CP Violation



LHC : 27 km long
100m underground



General Purpose,
pp, heavy ions



Heavy ions, pp



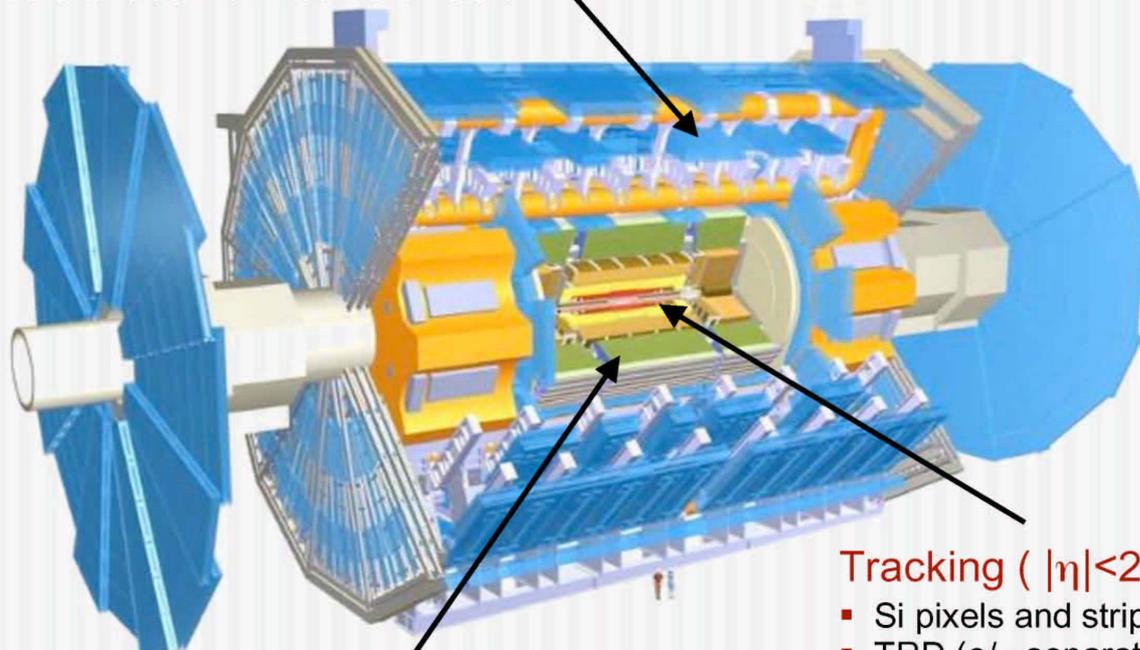


ATLAS

- Introduction
- Status of
- Machine
- Detectors**
- Startup of
- Machine
- Detectors
- First Physics
- Phys. Reach

Muon Spectrometer ($|\eta| < 2.7$)

- air-core toroids with muon chambers



Tracking ($|\eta| < 2.5, B=2T$)

- Si pixels and strips
- TRD (e/π separation)

Calorimetry ($|\eta| < 5$)

- EM : Pb-LAr
- HAD : Fe/scintillator (central), Cu/W-Lar (fwd)

Diameter	25 m
Barrel toroid length	26 m
End-cap end-wall chamber span	46 m
Overall weight	7000 tons

Gomes
Tartarelli
Gonzalez
Teuscher
Dubbart
Haller
Gossens

25.7.05

G. Dissertori - LHC expectations

7

ИЯФ участвует в эксп-те

В.И.Тельнов



CMS

- Introduction
- Status of Machine
- Detectors**
- Startup of Machine
- Detectors
- First Physics
- Phys. Reach

Cavallari
Colaleo
Klein
Hernandez
Varela

Superconducting Coil, 4 Tesla

CALORIMETERS

ECAL

76k scintillating PbWO4 crystals

HCAL

Plastic scintillator/brass sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Pixels
Silicon Microstrips
210 m² of silicon sensors
9.6M channels

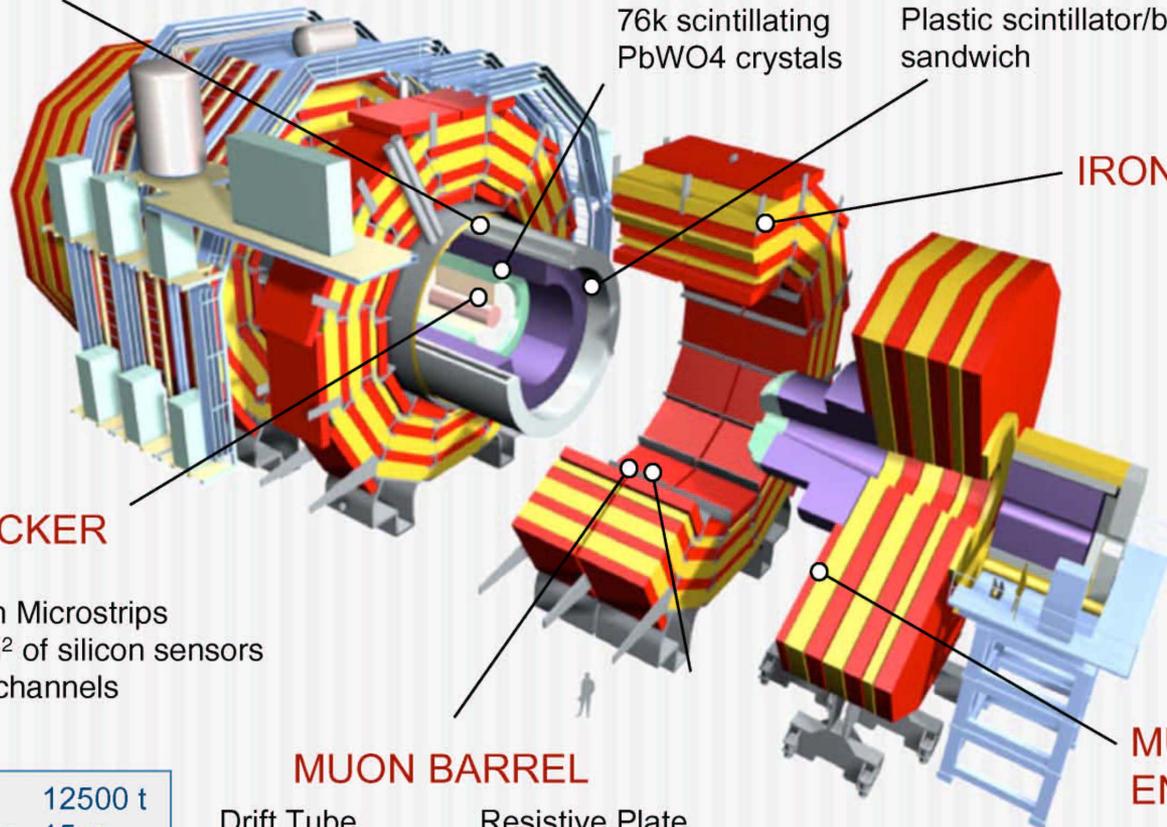
MUON BARREL

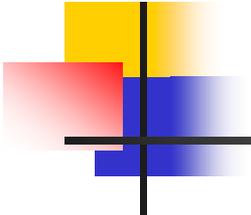
Drift Tube Chambers (**DT**) Resistive Plate Chambers (**RPC**)

MUON ENDCAPS

Cathode Strip Chambers (**CSC**)
Resistive Plate Chambers (**RPC**)

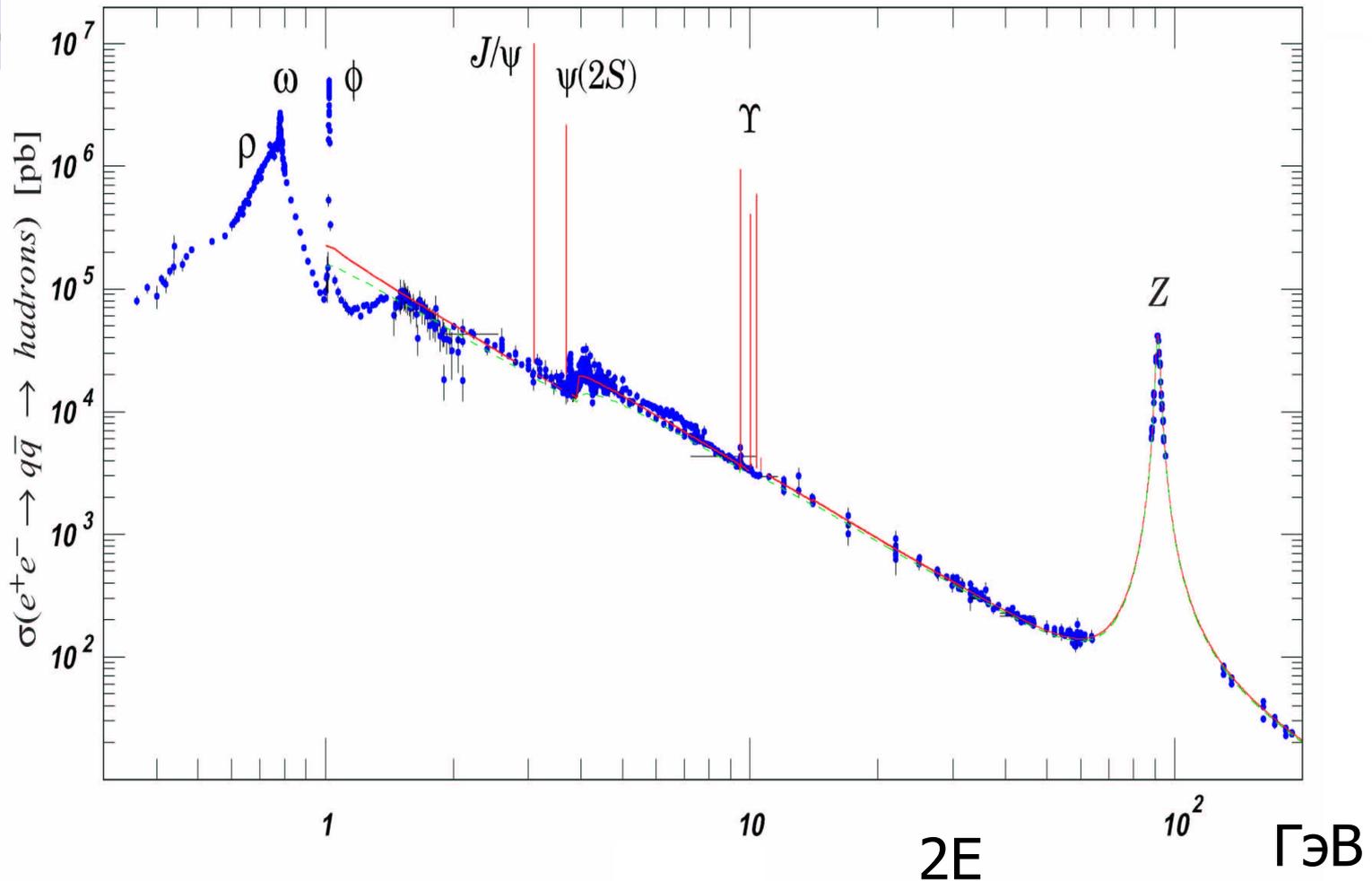
Total weight	12500 t
Overall diameter	15 m
Overall length	21.6 m





Линейные коллайдеры

Сечение аннигиляции e^+e^- в адроны, полученное на кольцевых e^+e^- накопителях

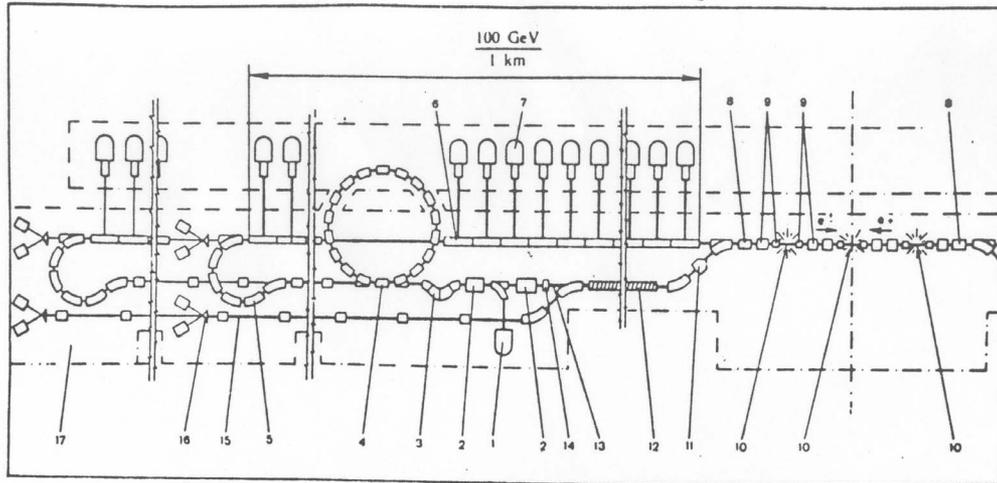


Революция в физики частиц (кварки, тау-лептон, Z и т.д.)

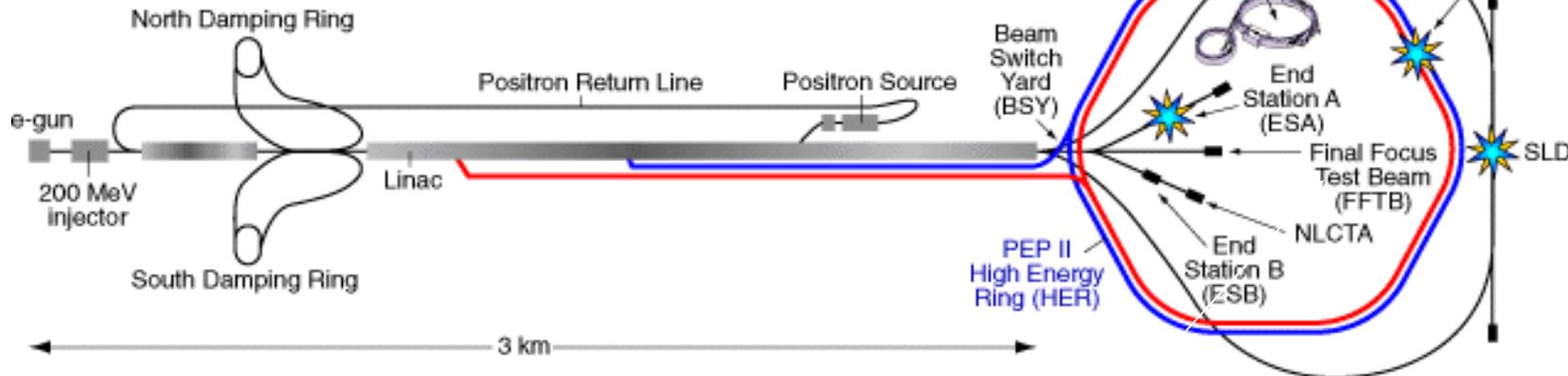
Большие энергии на кольцевых ускорителях невозможны из-за потерь энергии на синхротронное излучение

VLEPP (Novosibirsk)!

(Published proposal 1978)



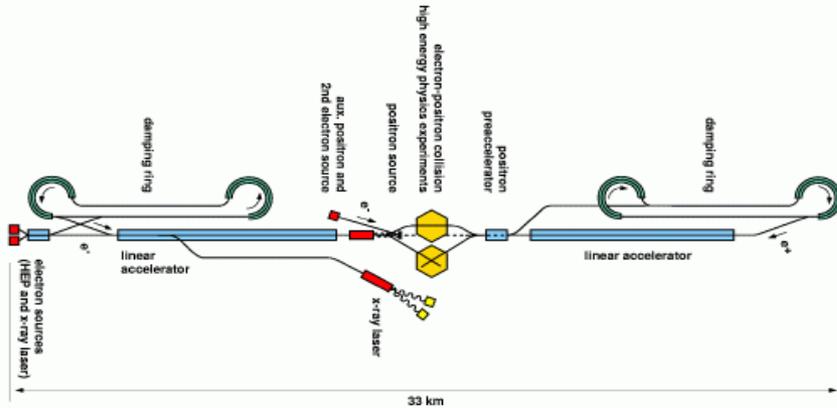
The general lay-out of the VLEPP facility:
 1—initial injector; 2—intermediate accelerator; 3—debuncher-monochromatizer; 4—storage ring; 5—buncher; 6—accelerating sections; 7—RF-generators; 8—pulse deflector; 9—focusing lenses; 10—collision points; 11—spectrometer; 12—helical undulator; 13—the beam of γ -quanta; 14—conversion target; 15—residual electron (positron) beam; 16—electron (positron) beam experiments; 17—the second stage.



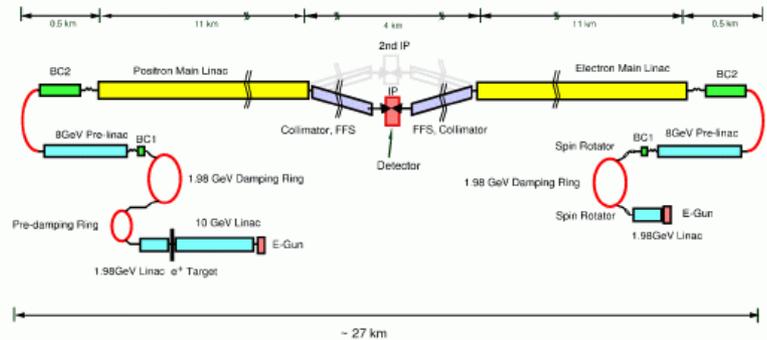
(раб. 1990-2000) **SLC**

Линейные e^+e^- коллайдеры

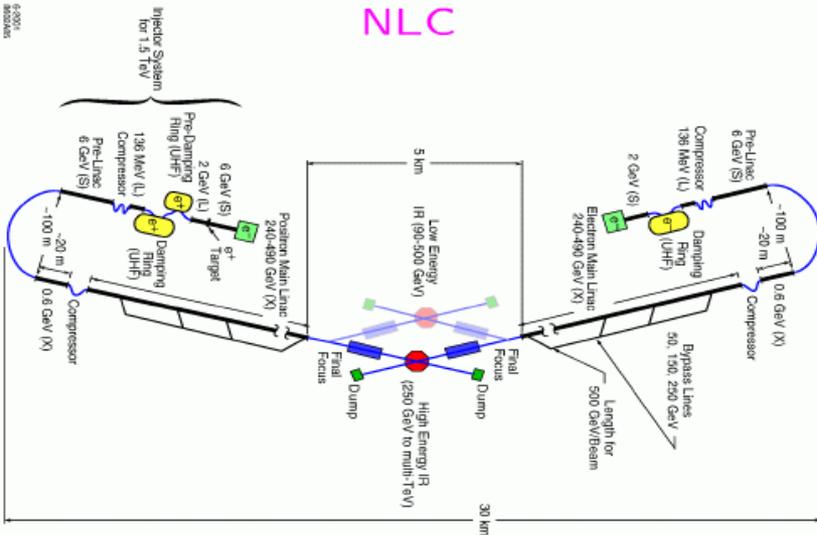
TESLA



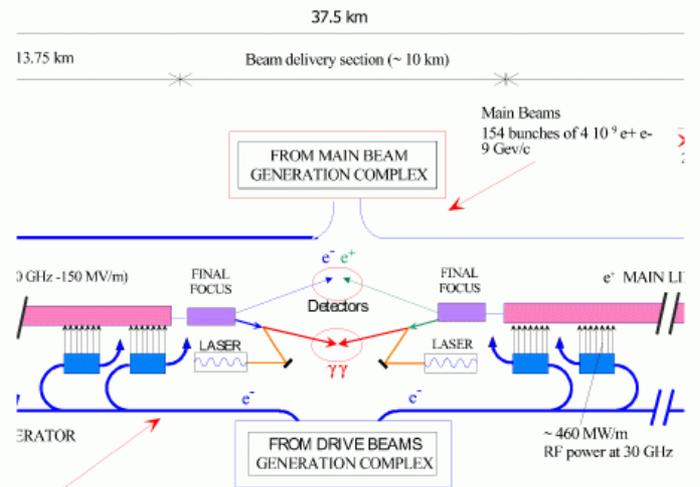
JLC

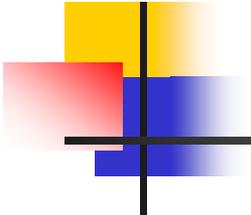


NLC



CLIC





В 2004 году принято решение объединить работы по лин.коллайдерам и вместо TESLA, NLC, JLC начаты работы над

International Linear Collider (ILC)

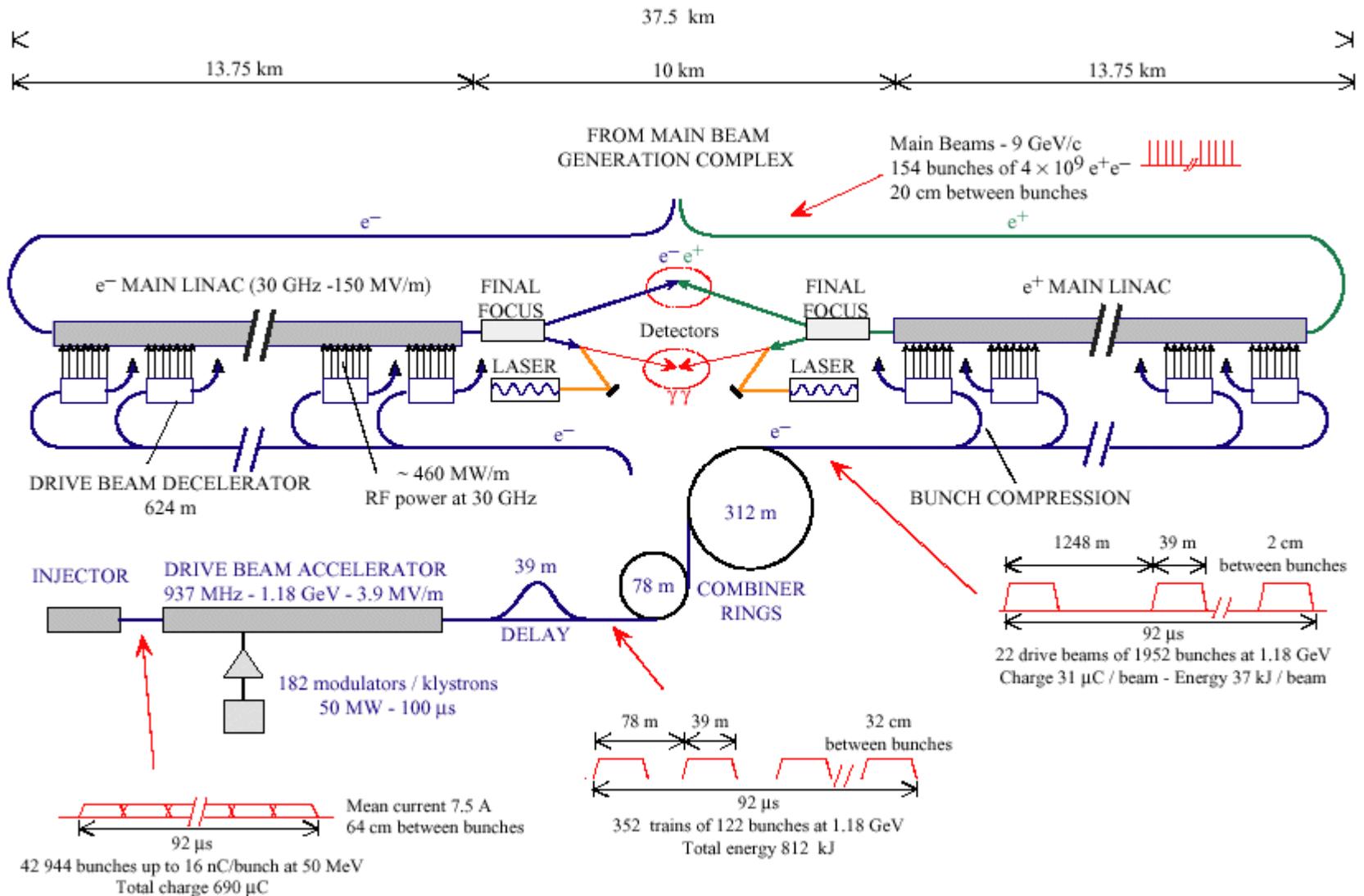
на базе сверхпроводящей технологии (как TESLA)
на энергию $2E=500-1000$ ГэВ.

Где строить еще не решено



For higher energies – possibly, CLIC.

CLIC Complex at 3-5 TeV



Пути к высоким энергиям

Ways to high energies:

1. Proton colliders.

Now: TEVATRON (FNAL, US), $2E = 2$ TeV.

Future: LHC(CERN), ~ 2007 , $2E = 14$ TeV.

Far future: VLHC, $2E \sim 100$ TeV

2. e^+e^- colliders

• Storage rings

the last (due to synch. rad.) LEP(CERN),
 $2E = 200$ GeV, $2\pi R = 27$ km, synch. rad
 power about 20 MW, AC power ~ 100 MW.

• Linear Colliders

SLC(SLAC) (1989-1999), $2E_0 = 90$ GeV.

The next generation of LC:

Collider	Leader	2E (TeV)	Zero Des.Rep.	Techn. Des.Rep.
VLEPP	BINP	0.5 -1	terminated	
NLC	SLAC	0.5-1	1996	
JLC	KEK	0.5-1	1997	
TESLA	DESY	0.5-0.8	1997	2001
CLIC	CERN	0.5-5	2007	

3. Muon colliders.

≥ 2040 ? (Snowmass 2001)

Why LC is necessary?

LHC(pp) $2E = 14$ TeV 2007 (2008)
 LC(e^+e^-) $2E = 0.5-1$ TeV ~ 2012 (~ 2020)

- 1. $E_{eff}(pp) \sim \frac{1}{6} \times 2E_p$ $E_{eff}(e^+e^-) = 2E_e$
 $p \equiv 3q + gluons$

— difference in energies is not big

- 2. Historically

$pp(p\bar{p})$ discovered c, b, t quarks, W, Z - bosons

e^+e^- discovered c -quark, τ lepton, g gluon.

With pp it is easier to reach higher energy

But, main results on c, b, W, Z, τ have been obtained and the SM has been tested with a very high precision at e^+e^- colliders

Because in e^+e^- collisions

- a) simpler initial state
- b) much lower backgrounds (no strong interactions)
- c) much higher accuracy

LHC - search for signatures of new phenomena

LC - gives physics answer to the new phenomena

Физическая программа ILC

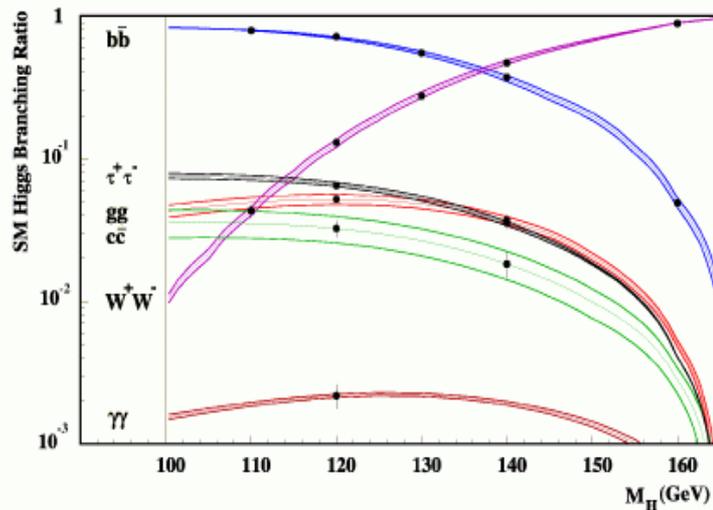
Outline of LC physics program

Origin of mass, structure of vacuum

Higgs boson, $M_H \sim 115 - 200$ GeV (LEP data)

$e^+e^- \rightarrow ZH$, $e^+e^- \rightarrow H\nu\bar{\nu}$, $\gamma\gamma \rightarrow H$

Measurement of H-branchings with a high accuracy to test $\lambda_f \propto m_f$



Supersymmetry

(between fermions and bosons)

$e(1/2), \mu(1/2), \dots q(1/2), W(s=1)$

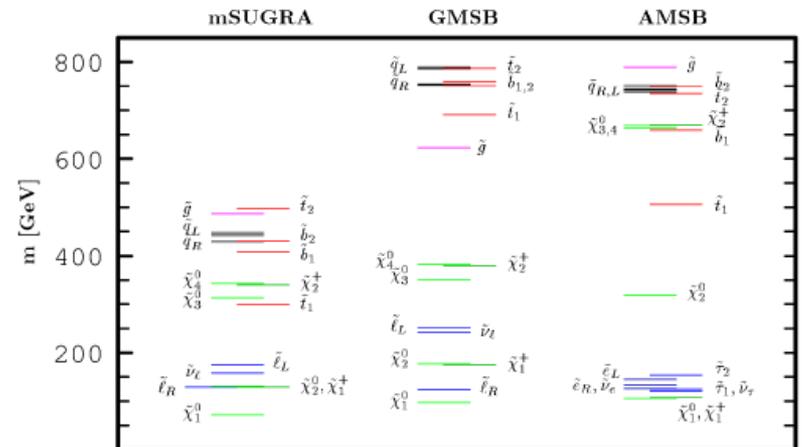
\iff

$\tilde{e}(0), \tilde{\mu}(0), \dots \tilde{q}(1/2), \tilde{W}(1/2)$

Supersymmetry is needed to cancel divergences in theories.

Supersymmetric particles are primary candidates for dark matter in Universe ($\rho_{dark} \sim 2\rho_{barionic}$)

Expected mass spectrum of SUSY particles in TeV region



All these particles can be detected and precisely studied at LC

Great physics !

Supersymmetry

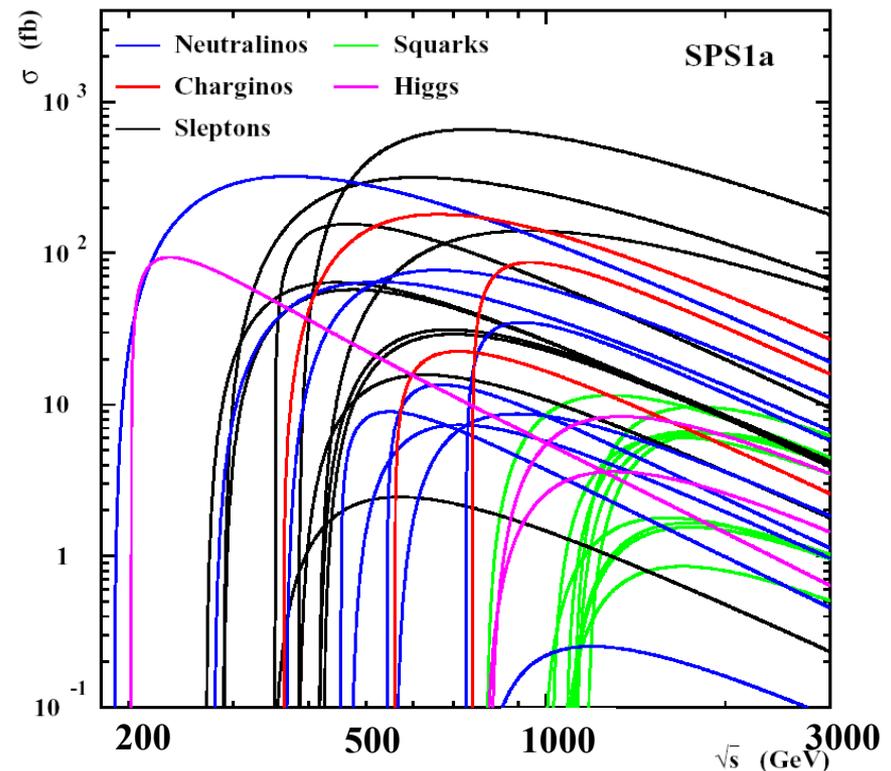
After SUSY discovery at the LHC many burning questions will arise:

- is it really SUSY? (measurement of quantum numbers)
- how is it realized? (MSSM, NMSSM, ...)
- how is it broken?

ILC will be indispensable to answer these questions!

Make full use of the flexibility of the machine:

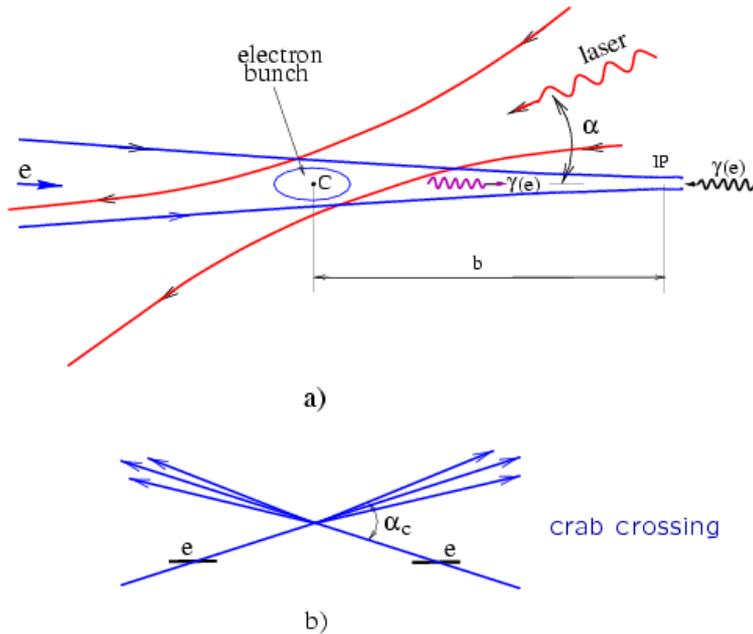
- tunable energy
- polarized beams
- possibly e^-e^- and $\gamma\gamma$ collisions



в 2011 г на LHC поставлено ограничение на массу суперсимметричных частиц $M > 700$ ГэВ, похоже теория не верна?!

Фотонный коллайдер на базе ILC

Scheme of $\gamma\gamma$, γe collider

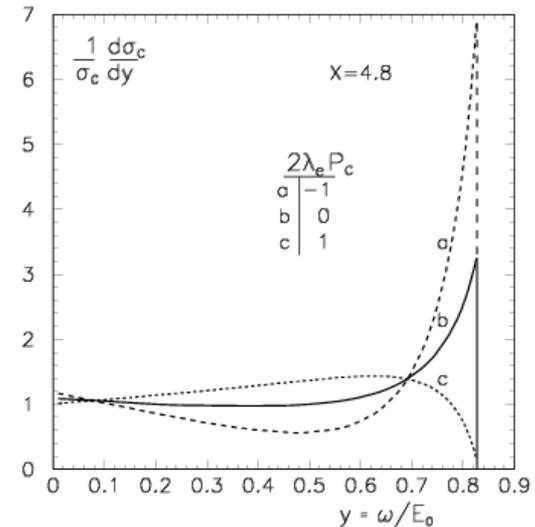


$$\omega_m = \frac{x}{x+1} E_0; \quad x \approx \frac{4E_0\omega_0}{m^2c^4} \approx 15.3 \left[\frac{E_0}{\text{TeV}} \right] \left[\frac{\omega_0}{\text{eV}} \right]$$

$E_0 = 250 \text{ GeV}$, $\omega_0 = 1.17 \text{ eV}$ ($\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$) $\Rightarrow x = 4.5$ and $\omega_m = 0.82E_0 = 205 \text{ GeV}$

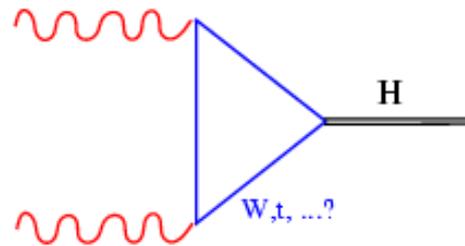
Electron to Photon Conversion

Spectrum of the Compton scattered photons

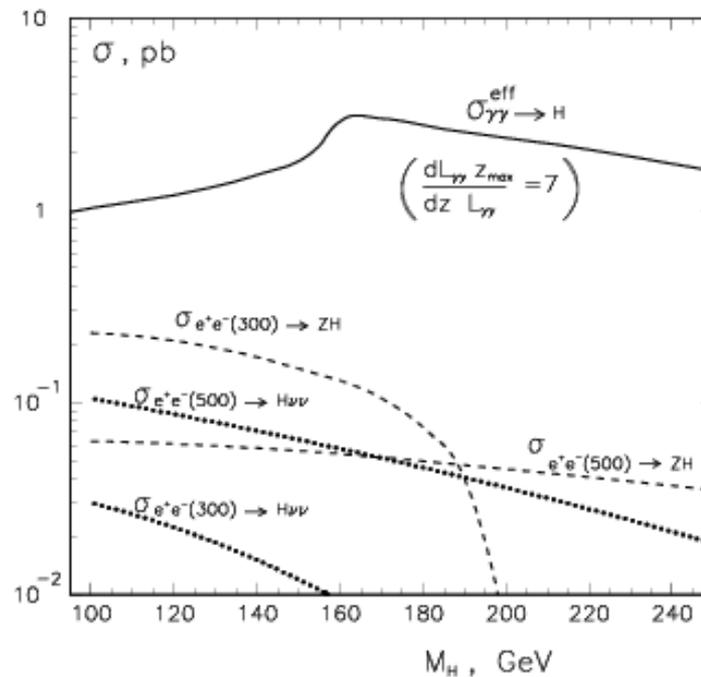


λ_e – electron longitudinal polarization
 P_c – helicity of laser photons

Higgs boson

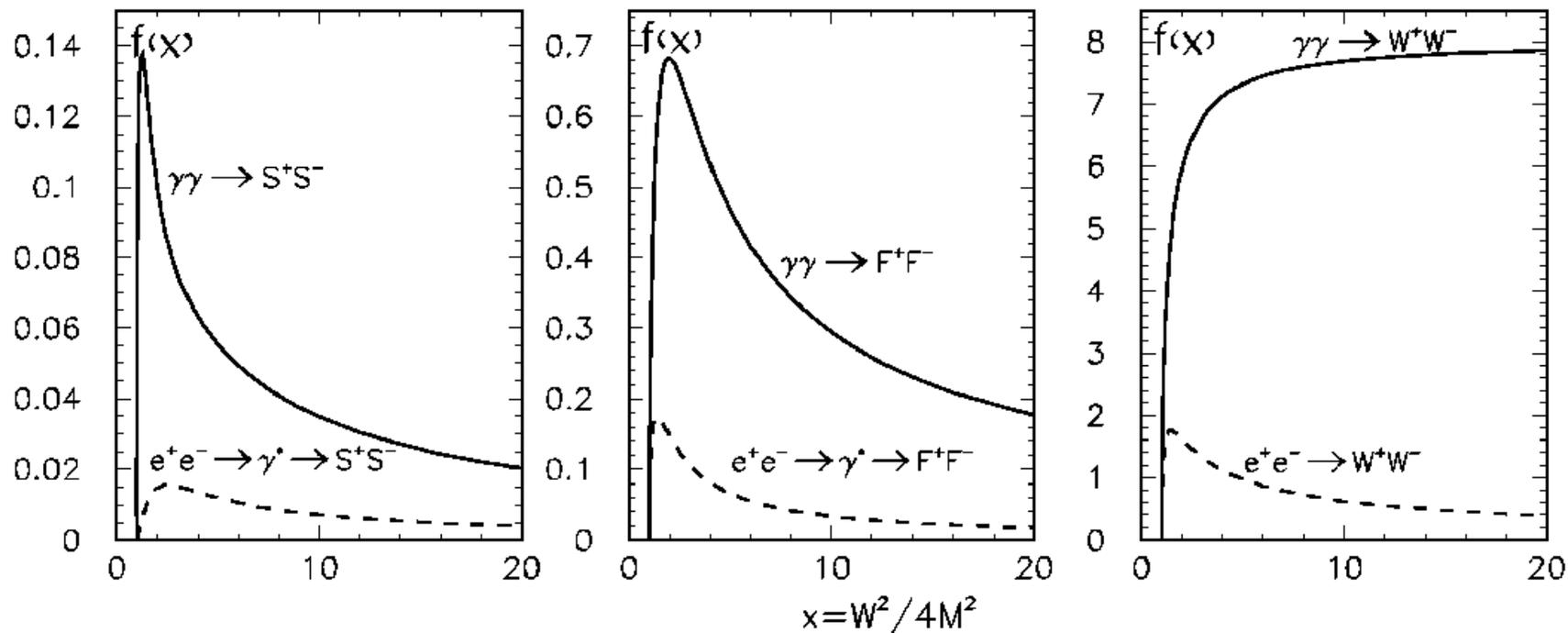


Cross sections of the Higgs boson production in $\gamma\gamma$ and e^+e^- collisions



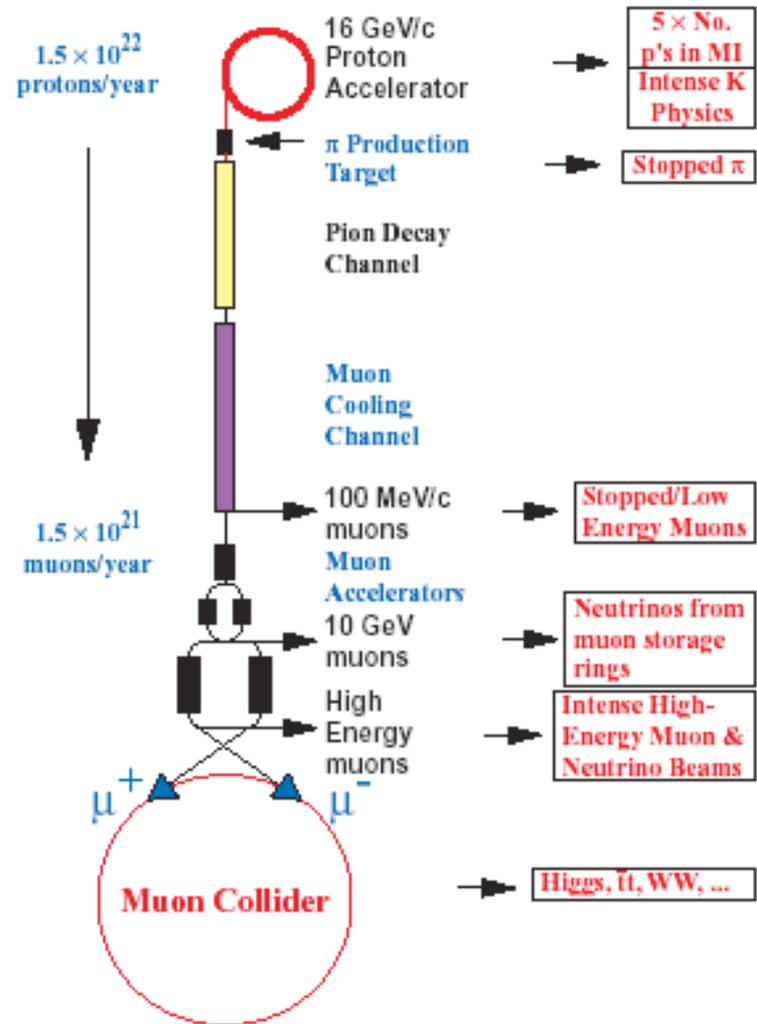
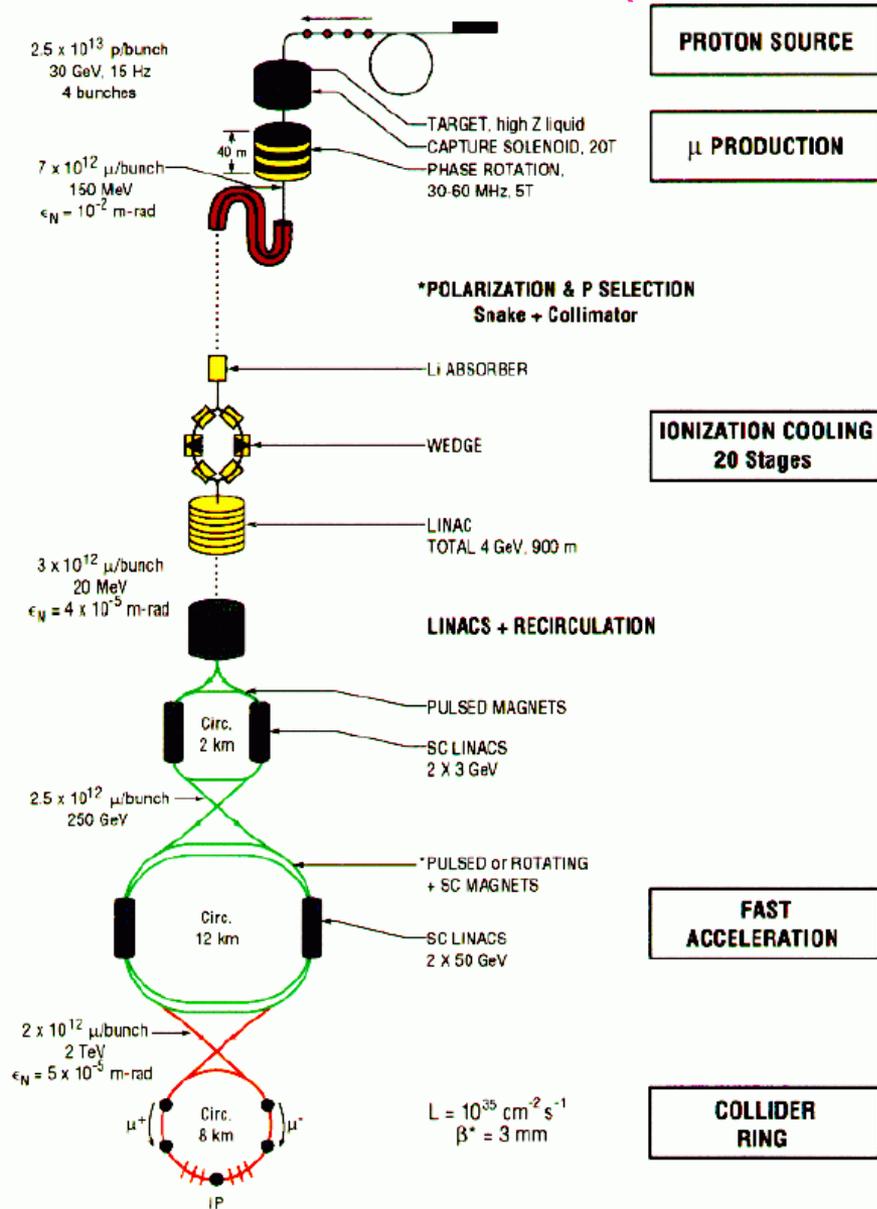
$$\dot{N}_{\gamma\gamma \rightarrow h} = L_{\gamma\gamma} \times \frac{dL_{\gamma\gamma} M_h}{dW_{\gamma\gamma} L_h} \frac{4\pi^2 \Gamma_{\gamma\gamma} (1 + \lambda_1 \lambda_2)}{M_h^3} \equiv L_{\gamma\gamma} \times \sigma^{\text{eff}}$$

Относительные сечения рождения заряженных частиц в e^+e^- и $\gamma\gamma$ -столкновениях



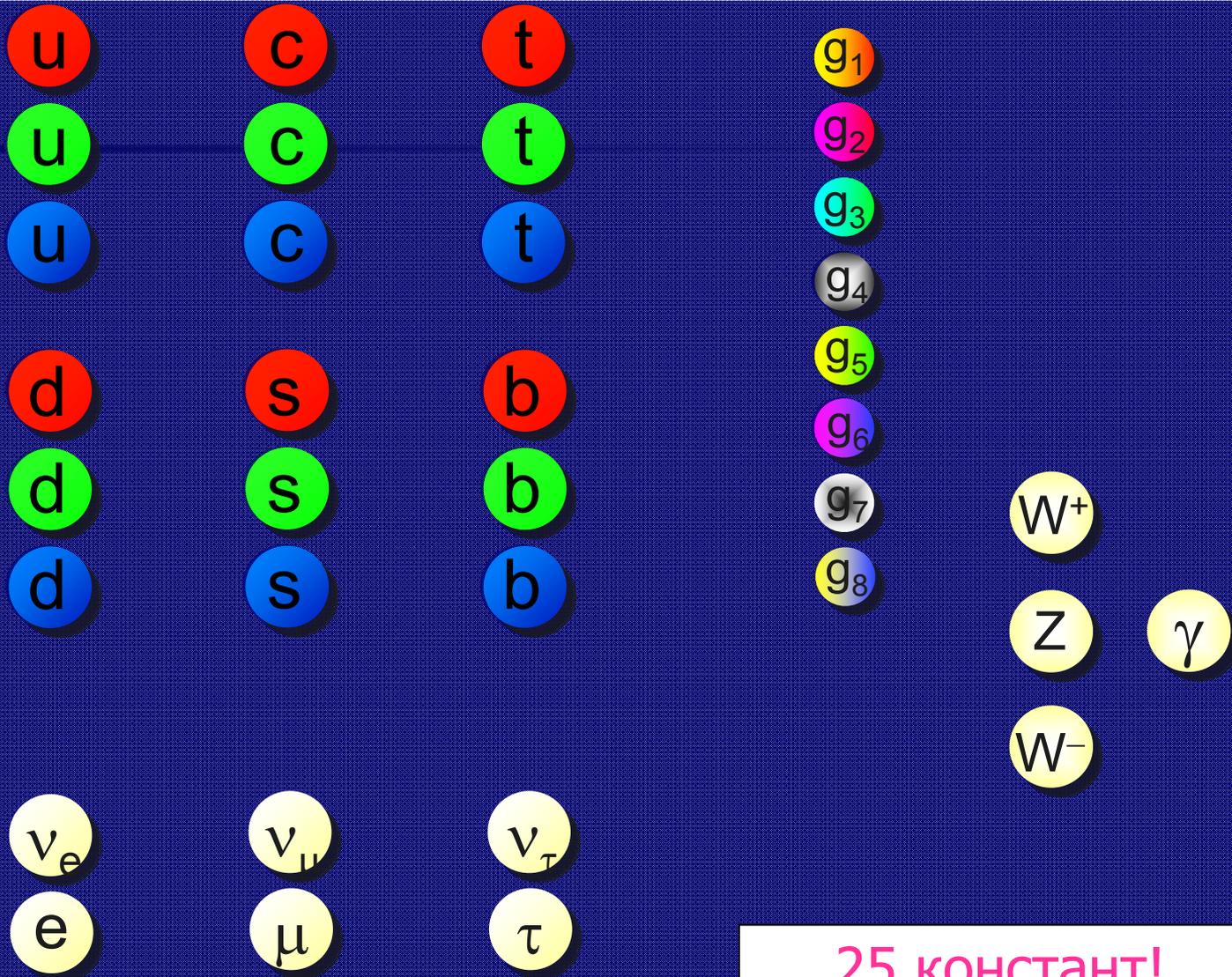
Мюонный коллайдер ($2E=0.1-10$ ТэВ)

20??

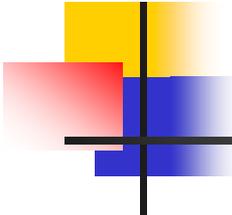


экспериментальной физике
Тельнов

Стандартная модель

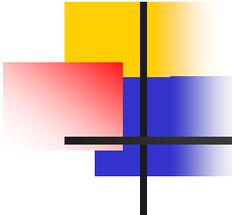


25 констант!
(слишком много)



Кварки

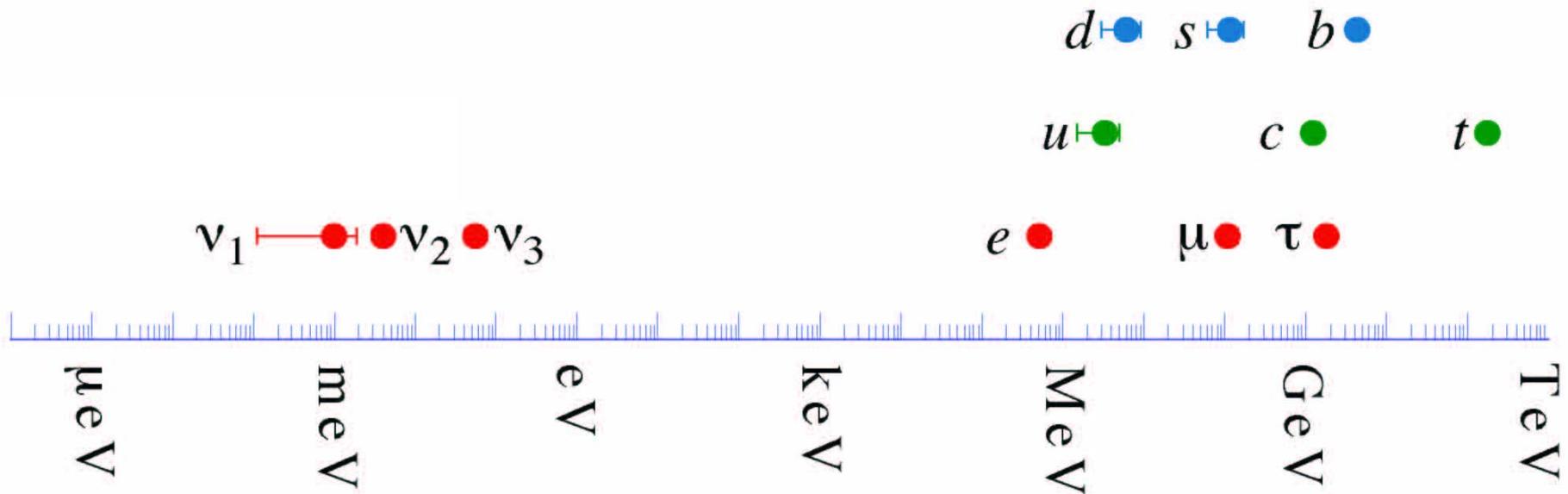
Тип	Масса, МэВ	Эл. заряд	Бар. заряд	Аромат
u	2–3	+2/3,	1/3	–
d	4–6	–1/3	1/3	–
s	100	–1/3	1/3	strange
c	1 300	+2/3	1/3	charm
b	4 200	–1/3	1/3	beauty
t	171 000	+2/3	1/3	truth



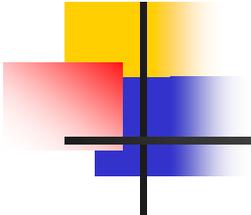
ЛЕПТОНЫ

Тип	Масса, МэВ	Электр. заряд	Лепт. число
e	0.51	1	$L_e=1$
μ	106.6	1	$L_\mu=1$
τ	1777	1	$L_\tau=1$
ν_e	$<10^{-6}$	0	$L_e=1$
ν_μ	<0.19	0	$L_\mu=1$
ν_τ	<18	0	$L_\tau=1$

Массы фермионов



(про нейтрино см. отдельную лекцию)

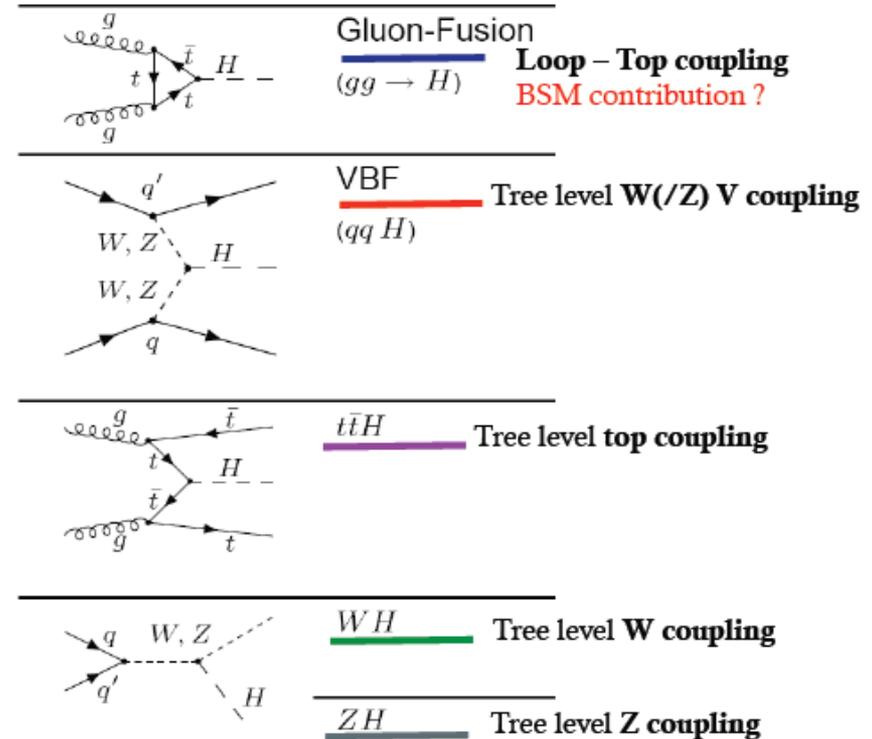
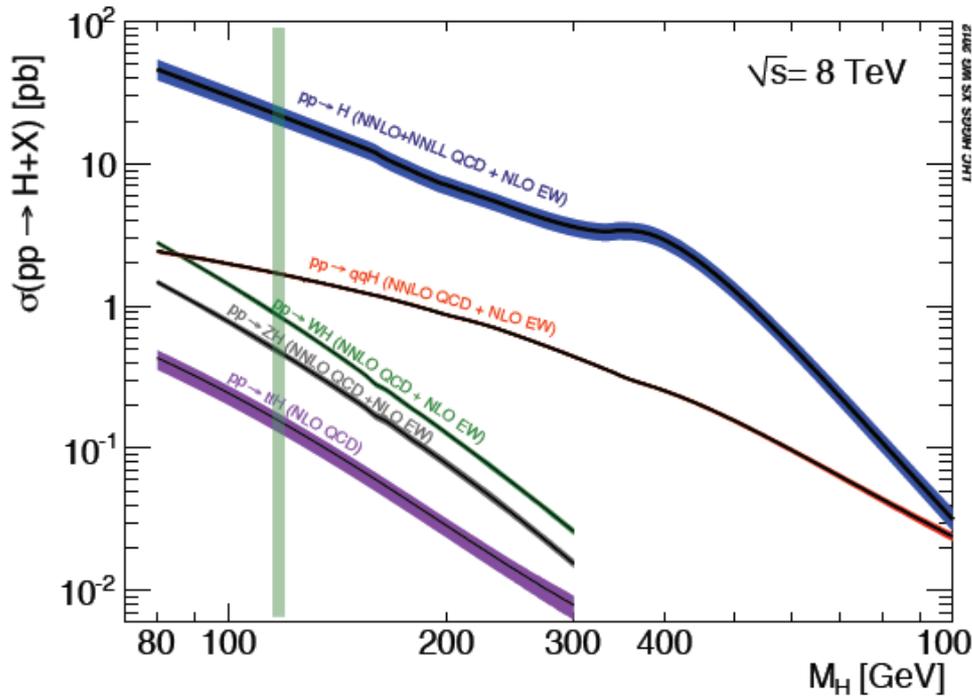


Калибровочные бозоны

Тип	Масса, МэВ	Элект. Заряд	Спин	Перен. взаимод.
γ	0	0	1	Электромаг
ГЛЮОНЫ	0	0	1	Сильное
W^{\pm}	80000	± 1	1	Слабое
Z	91000	0	1	Слабое
гравитон	0	0	2	Гравитац.

Бозон Хиггса

In July 2012 two detectors ATLAS and CMS working at LHC have announced the discovery of the particle with the mass $M \sim 125.9 \text{ GeV}$ with properties very similar to the predicted Higgs boson.



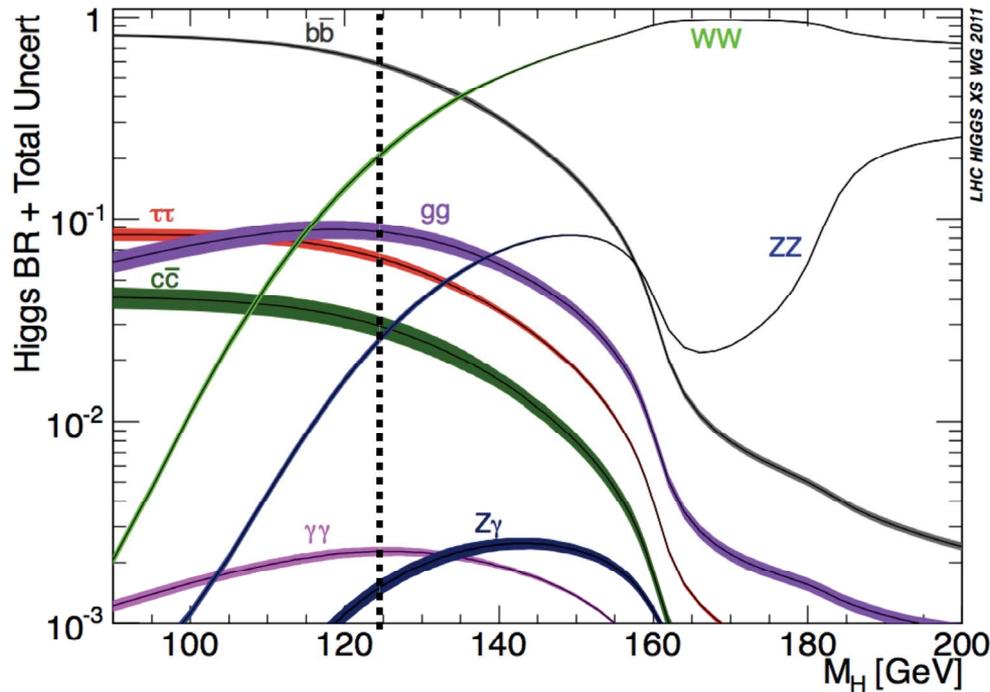
The LHC is a Higgs Factory !

1M Higgs already produced – more than most other Higgs factory projects.

But much less detected due to serious backgrounds, this was sufficient only for discovery

Situation today (cont)

We are here (or thereabout):



$m_H = 125 \text{ GeV}$

Decay	BR [%]	Unc. [%]
bb	57.9	3.
$\tau\tau$	6.4	6.
cc	2.8	12.
$\mu\mu$	0.022	6.
WW	21.6	4.
gg	8.2	10.
ZZ	2.6	4.
$\gamma\gamma$	0.27	5.
Z γ	0.16	9.
Γ_H [MeV]	4.0	4.

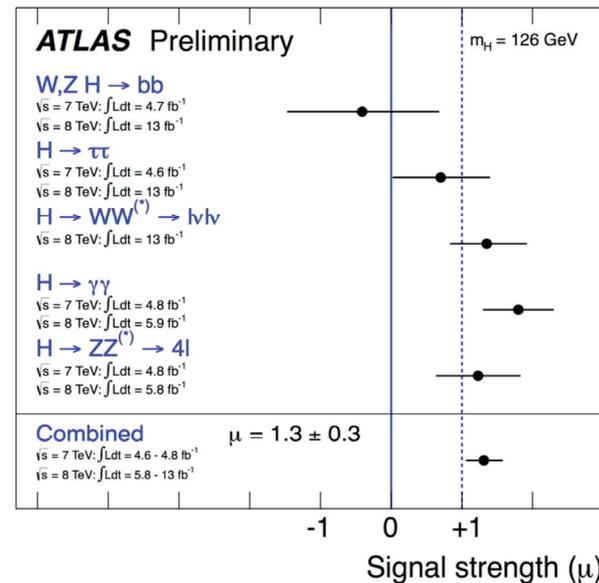
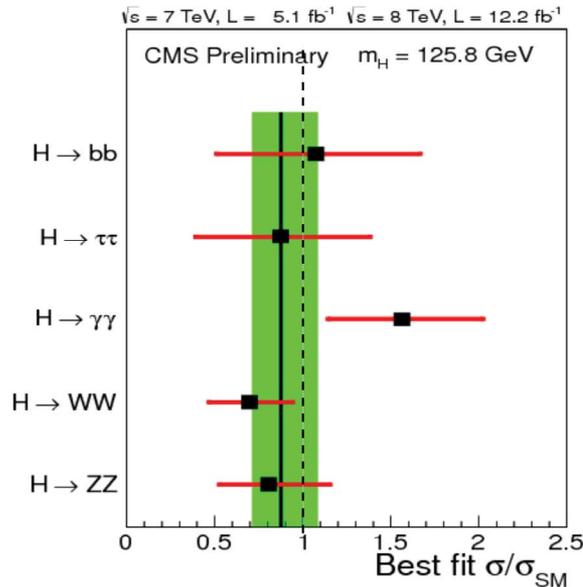
Note : The LHC is a Higgs Factory !

- ◆ Total cross section at 8 TeV : 22 pb

- 1M Higgs already produced – more than most other Higgs factory projects.
- 15 Higgs bosons / minute – and more to come.

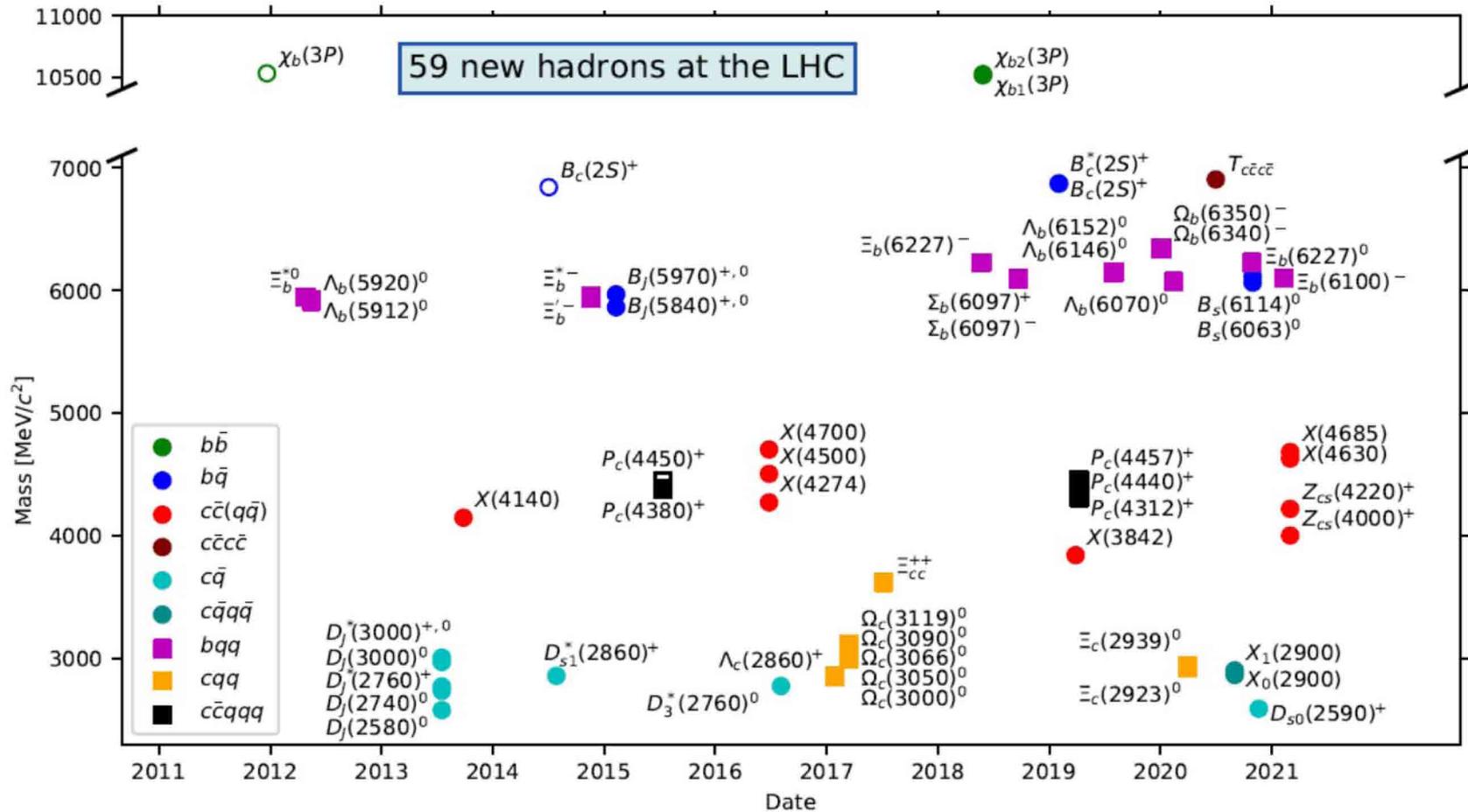
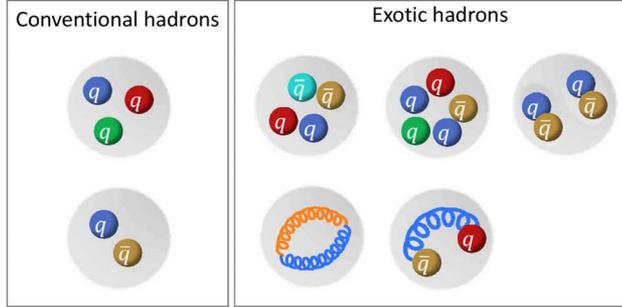
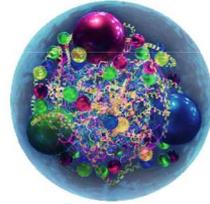
The situation today

Decays to $ZZ, \gamma\gamma, WW, \tau\tau$ and bb ; Properties very much like those of a SM Higgs boson;



В последующие годы на LHC будет набрано в десятки раз больше Хиггсов, но для более детального их изучения с точностями лучше 1% нужны специальные хиггсовские фабрики (e^+e^- , $\gamma\gamma$, $\mu^+\mu^-$)

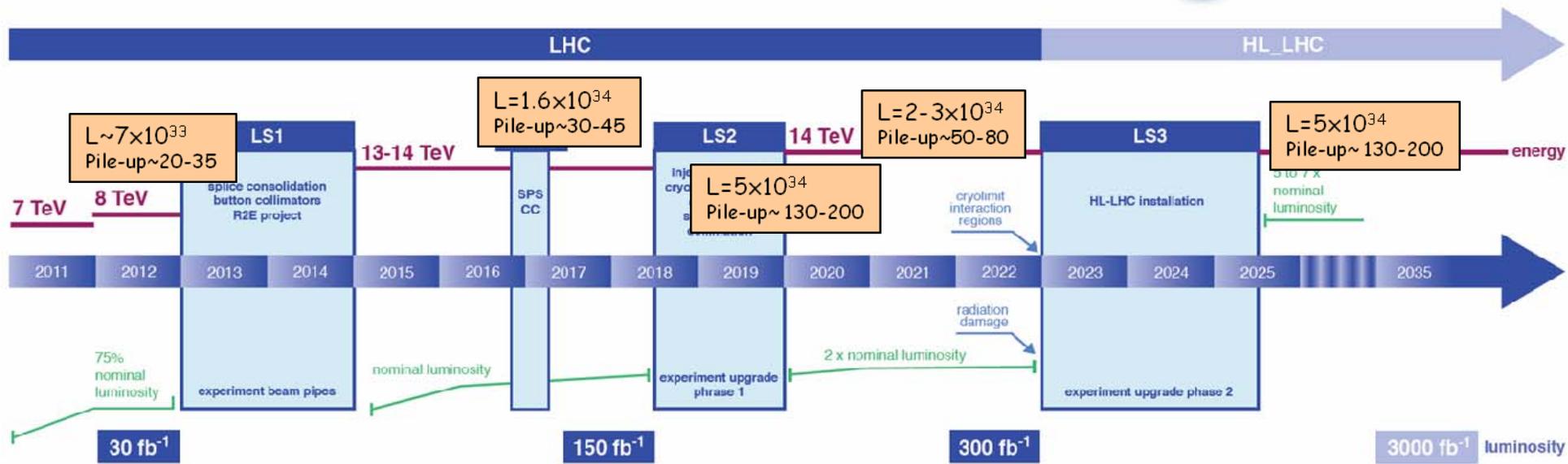
Exotic multi-quark particles found at the LHC



LHC plans

L.Rossi

LHC / HL-LHC Plan

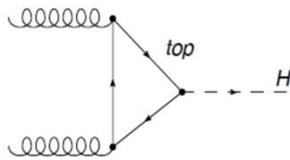


Situation in 2022 and with lum. upgrade (2035)

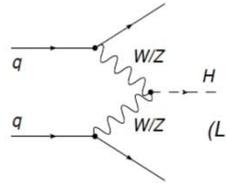
The approved LHC programme will be completed

- ◆ With 300 fb^{-1} @ 13 TeV, CMS and ATLAS will measure five production modes

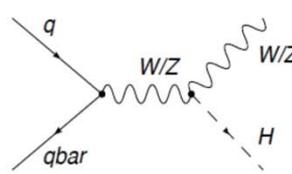
- $gg \rightarrow H$



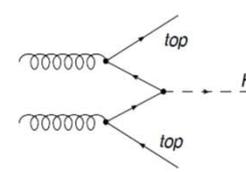
- VBF



- WH, ZH



- ttH



- ... and six decay modes : $\gamma\gamma$, ZZ, WW, $\tau\tau$, bb, $\mu\mu$

Approved LHC 300 fb^{-1} at 14 TeV:

- Higgs mass at 100 MeV
- Disentangle Spin 0 vs Spin 2 and main CP component in ZZ*
- Coupling rel. precision/Exper.
 - Z, W, b, t 10-15%
 - t, m 3-2 s observation
 - gg and gg 5-11%

HL-LHC 3000 fb^{-1} at 14 TeV:

Higgs mass at 50 MeV

More precise studies of Higgs CP sector

Couplings rel. precision/Exper.

- Z, W, b, τ , t, μ 2-10%
- $\gamma\gamma$ and gg 2-5%
- $H \rightarrow HH$ $>3 \sigma$ observation (2 Exper.)

LHC can't measure $\text{Br}(cc, \text{invisible})$ and Γ_{tot}

Precision needed after LHC

□ New physics affects the Higgs couplings

◆ SUSY $\frac{g_{hbb}}{g_{h_{SM}bb}} = \frac{g_{h\tau\tau}}{g_{h_{SM}\tau\tau}} \simeq 1 + 1.7\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_A}\right)^2$, for $\tan\beta = 5$

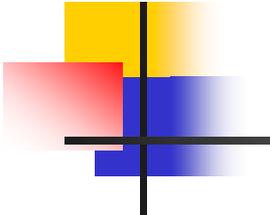
◆ Composite Higgs $\frac{g_{hff}}{g_{h_{SM}ff}} \simeq \frac{g_{hVV}}{g_{h_{SM}VV}} \simeq 1 - 3\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{f}\right)^2$

◆ Top partners $\frac{g_{hgg}}{g_{h_{SM}gg}} \simeq 1 + 2.9\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_T}\right)^2$, $\frac{g_{h\gamma\gamma}}{g_{h_{SM}\gamma\gamma}} \simeq 1 - 0.8\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_T}\right)^2$

◆ Other models may give up to 5% deviations with respect to the Standard Model

For observation (and some study) of new physics beyond standard Higgs one need precision better than 1%!

Colliders for precision Higgs study



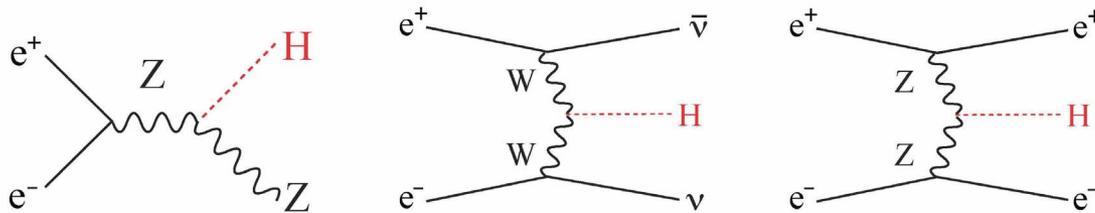
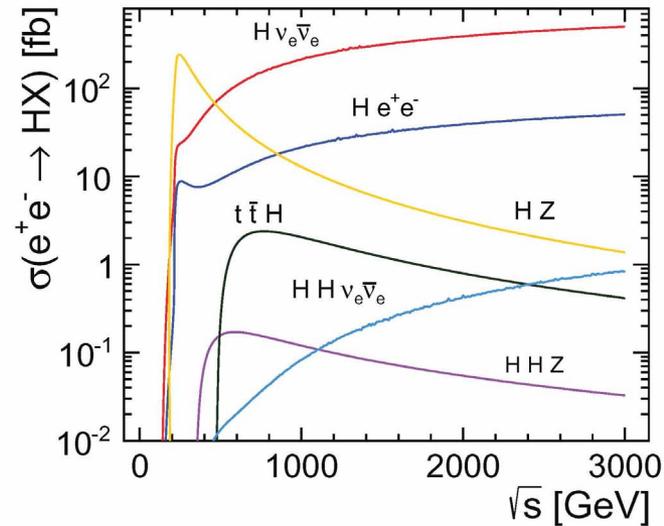
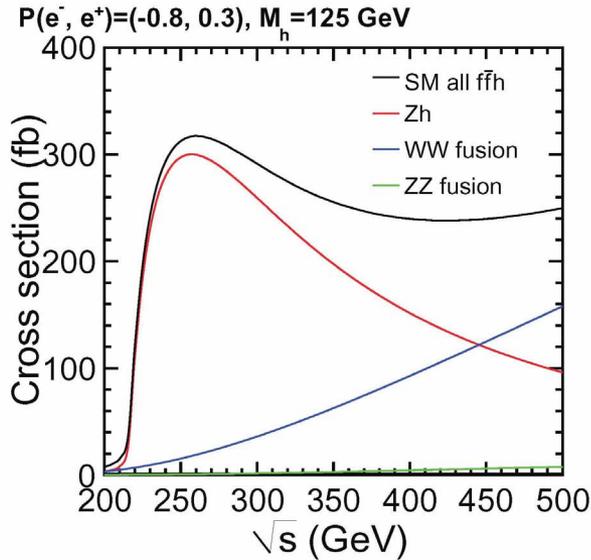
e^+e^- linear colliders

e^+e^- circular colliders

Photon colliders

Muon colliders

Higgs physics in e+e- collisions



Tagging Z in $e^+e^- \rightarrow ZH$ one can measure all $\text{Br}(H)$, even invisible decays width.

One can measure the Higgs total width:

$$\Gamma(H) \sim \sigma(e^+e^- \rightarrow ZH) / \text{Br}(H \rightarrow ZZ) \quad \text{and} \quad \Gamma(H) \sim \sigma(WW \rightarrow H) / \text{Br}(H \rightarrow WW)$$

At linear colliders $L \sim 10^{34}$, $N_H \sim 20000/\text{year}$ or 10^5 for life of the experiment;

At circular collider with $C \sim 100 \text{ km}$ and several IP one can have $N_H \sim 10^6$.

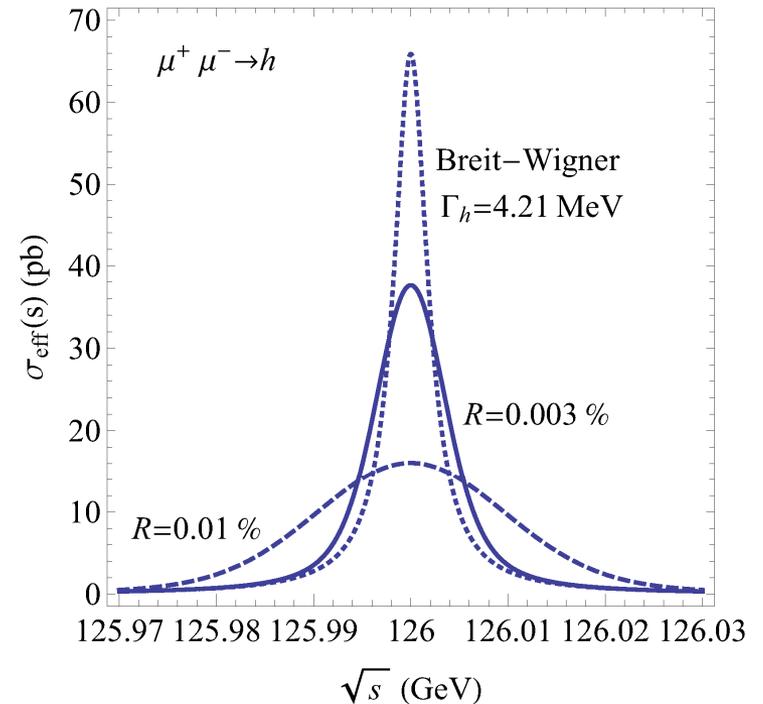
Higgs physics at muon collider

Resonance H production:

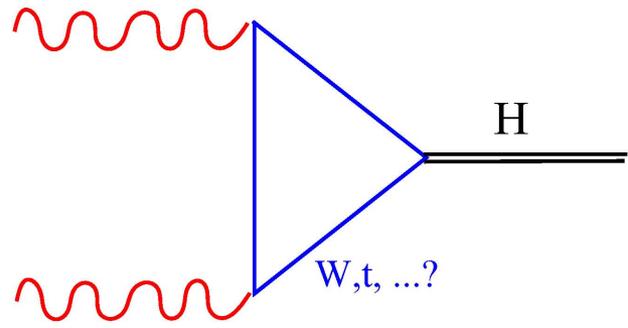
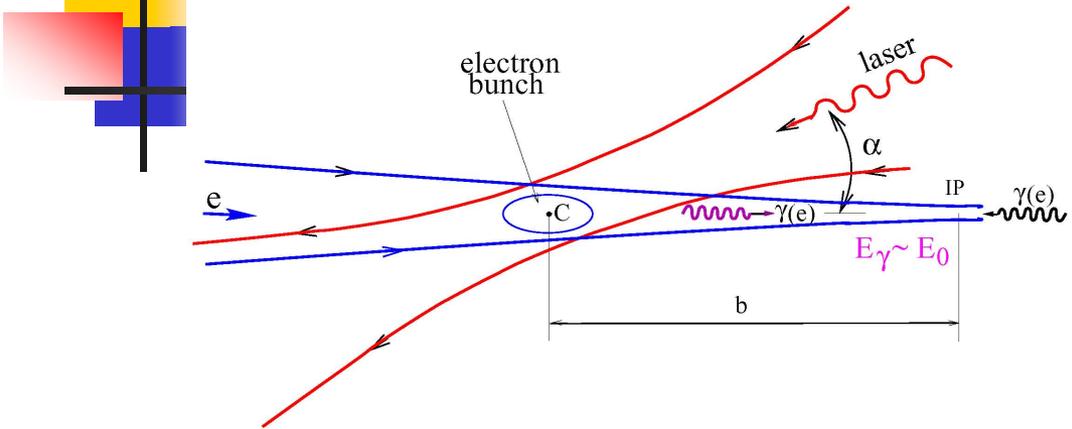
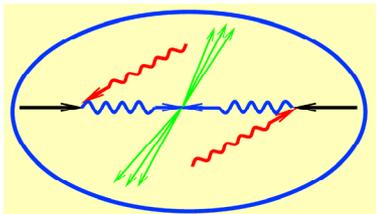
$$\sigma(\mu^+\mu^-\rightarrow H)\approx 40000 \quad \sigma(e^+e^-\rightarrow H)\approx 70 \text{ pb}$$

- The Higgs width is about 4 MeV, the muon collider with $\delta E/E=0.003\%$ can measure the Higgs width directly with an accuracy 5% (comparable that in $e+e-$).
- The Higgs mass can be measured with an accuracy 0.1 MeV, 100 times better than in $e+e-$.
- Coupling $H\rightarrow\mu^+\mu^+$ can be measured with 1.5% accuracy.

The number of Higgs boson is about 2500/year at expected $L\sim 10^{31}$ (small L due to transverse-longitudinal emittance exchange for obtaining a high monochromaticity).



Higgs study at photon colliders ($\gamma\gamma, \gamma e$)



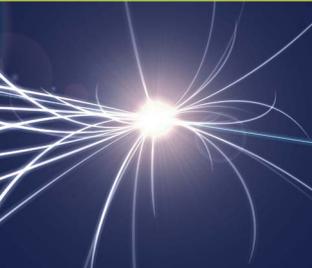
$\Gamma_{\gamma\gamma}$ is determined by contributions of all charge particles (even with $M > 2E_0$), therefore this process is most sensitive to new physics!

In $\gamma\gamma$ collisions the $\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma)$ width can be measured with statistics ≈ 90 times higher than in e^+e^- collisions. This is the most important argument for the photon collider.

However, e^+e^- beams are much better for Higgs study (due to Z tagging). Therefore PLC has sense only in combination with e^+e^- : parallel work or second stage.

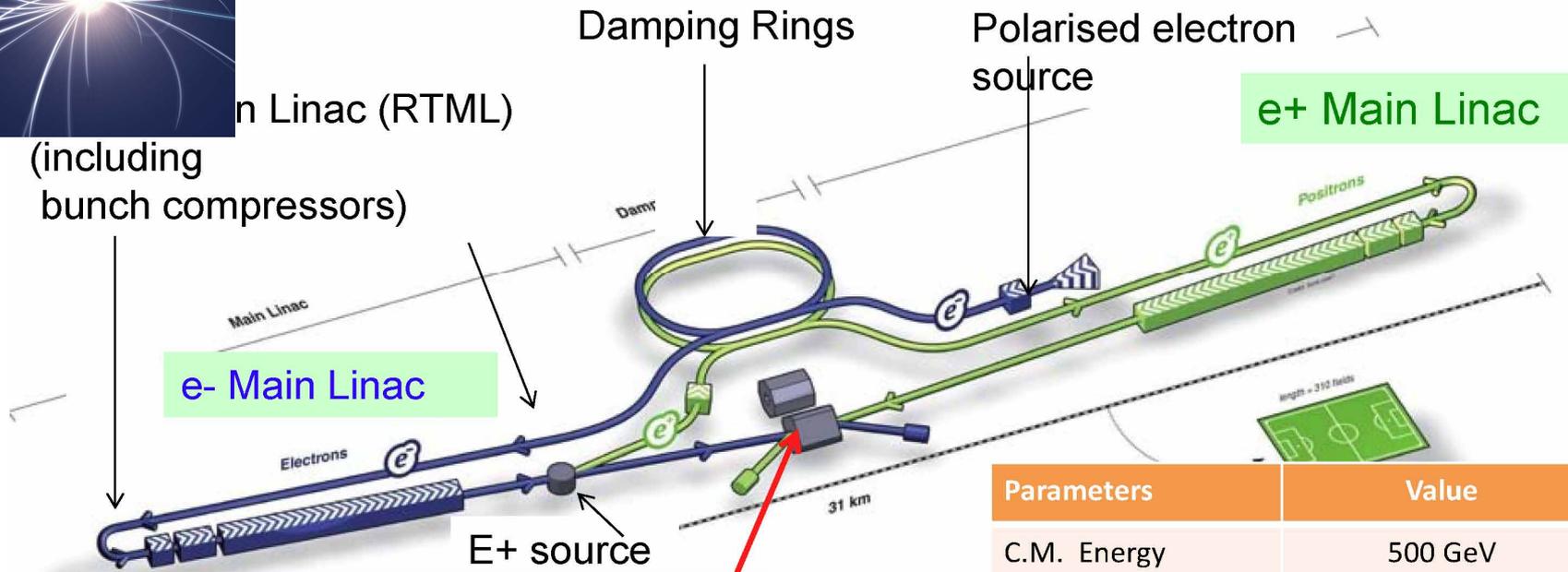
ILC Status





ILC TDR 6.2013

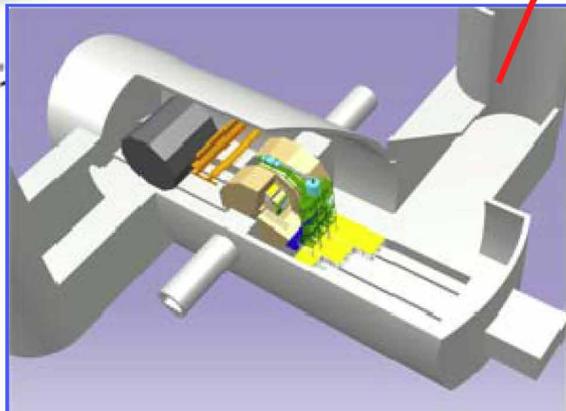
ILC TDR Layout



e- Main Linac

e+ Main Linac

Parameters	Value
C.M. Energy	500 GeV
Peak luminosity	$1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam Rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.73 ns
Average current	5.8 mA (in pulse)
E gradient in SCRF acc. cavity	$31.5 \text{ MV/m} \pm 20\%$ $Q_0 = 1E10$

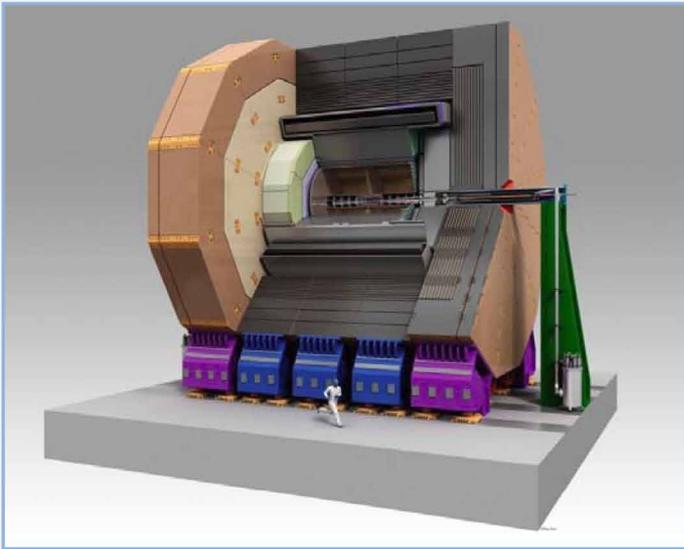


L=31 km
2E=500 GeV

2E=250-500 GeV, upgradable to 1000 GeV

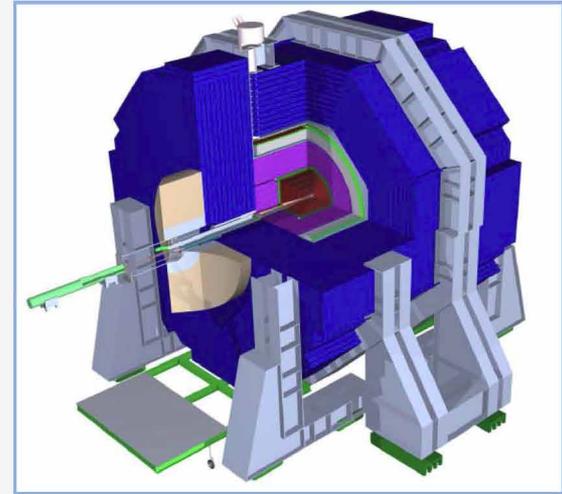
2 Detector Concepts: **Detailed Baseline Design**

ILD



- **Large R** with TPC tracker
 - 32 countries,
 - 151 institutions,
 - ~700 members
- **B=3.5T**, TPC + Si trackers
- ECal: **R=1.8m**

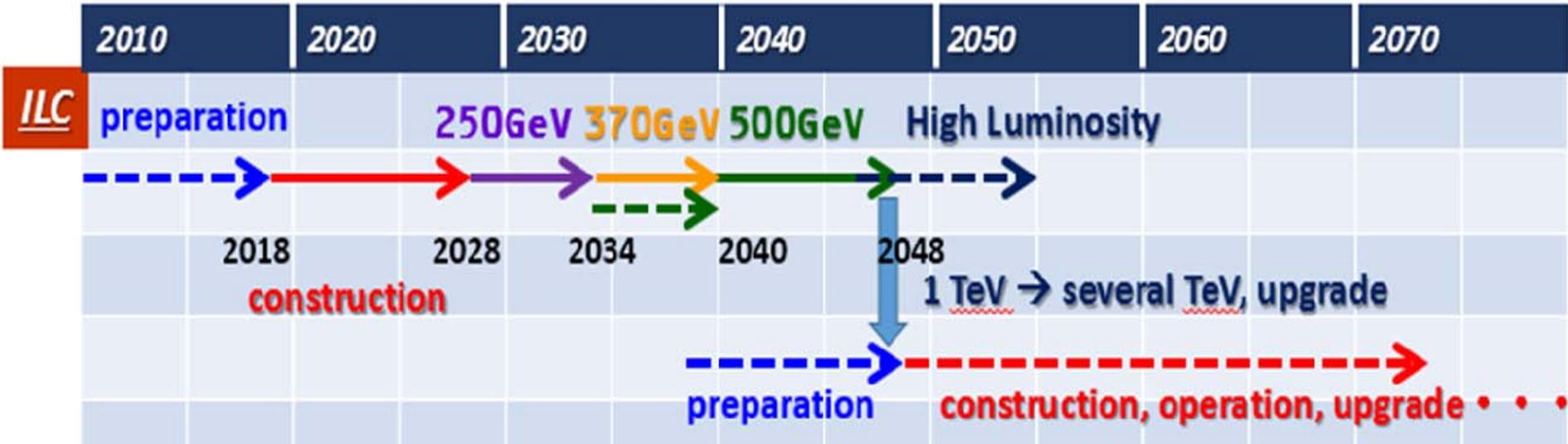
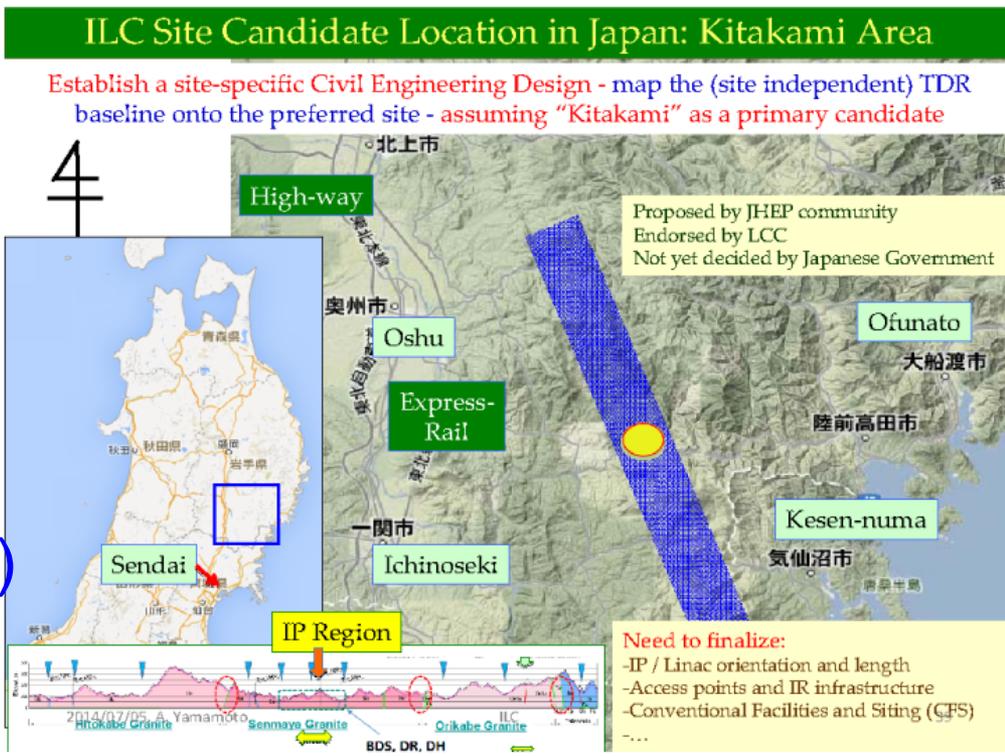
SiD

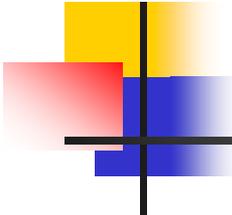


- **High B** with Si strip tracker
 - 18 countries,
 - 77 institutions,
 - ~240 members
- **B=5T**, Si only tracker
- ECal: **R=1.27m**



Japan is interested to host
 -decision ~2018
 -construction ~2019 (~10 years)
 -physics ~2030





Known physics, ILC stages

- $2E=250$ GeV Higgs boson
- 350 top quark
- 500 ZHH –Higgs self coupling
- 500 and higher ttH - top Yukawa
coupling
- 1000 and higher Beyond

FCC project (CERN)

FCC-hh hadron collider with
100TeV proton cms energy

~16 T \Rightarrow 100 TeV pp in 100 km

~20 T \Rightarrow 100 TeV pp in 80 km

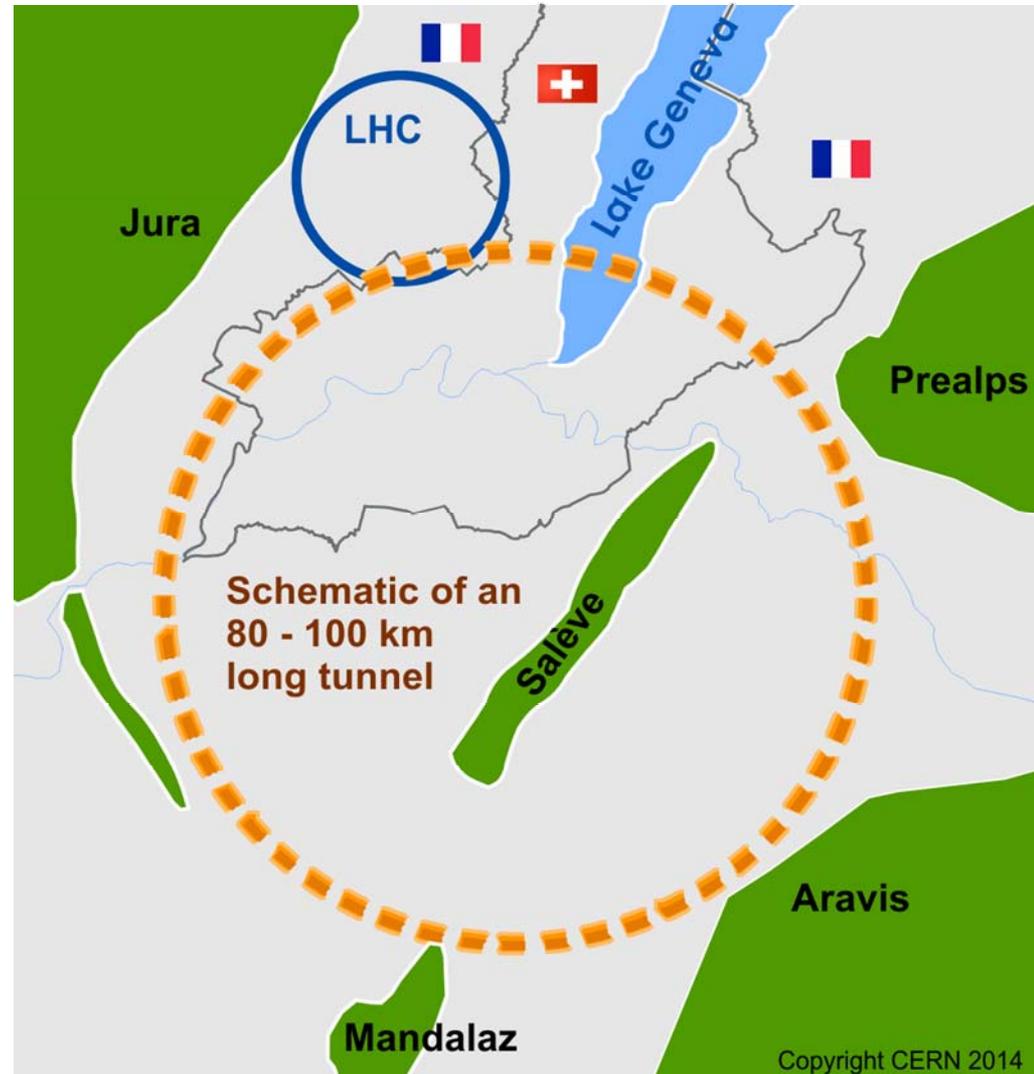
FCC-ee a lepton collider as a
potential intermediate step

FCC-eh lepton hadron option

International collaboration

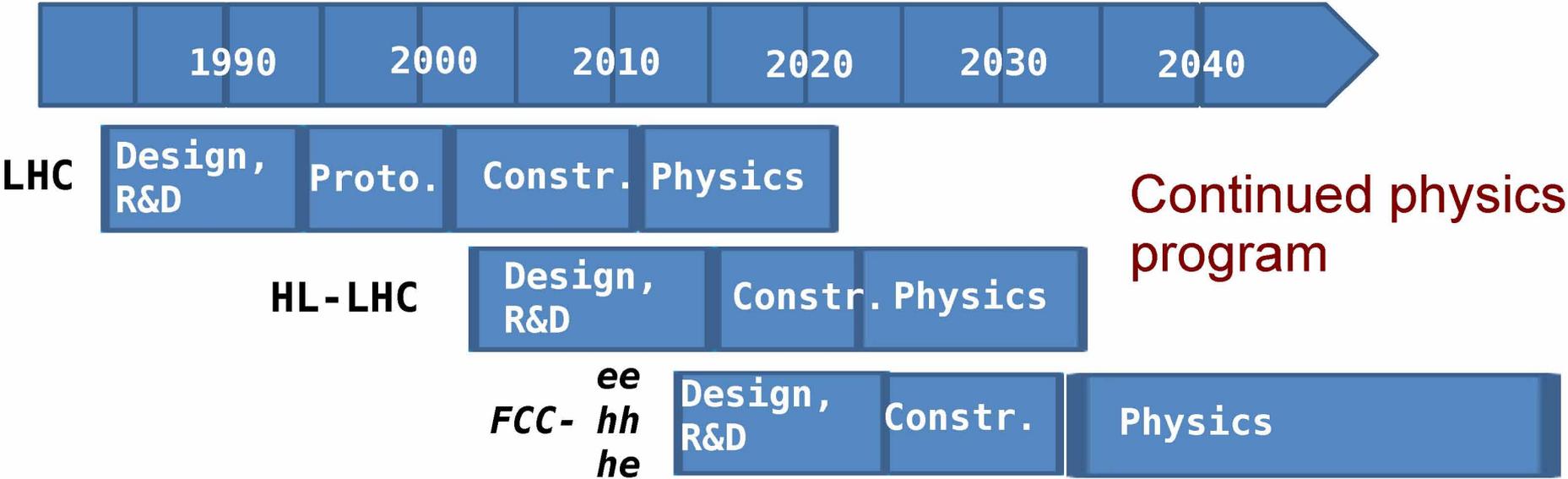
Site studies for Geneva area

CDR for EU strategy update
in 2018



tentative time line and milestones

F. Zimmermann, IPAC14





FCC-hh baseline parameters



parameter	LHC	HL-LHC	FCC-hh
c.m. energy [TeV]		14	100
dipole magnet field [T]		8.33	16 (20)
circumference [km]		36.7	100 (83)
luminosity [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1	5	5 [$\rightarrow 20?$]
bunch spacing [ns]		25	25 {5}
events / bunch crossing	27	135	170 {34}
bunch population [10^{11}]	1.15	2.2	1 {0.2}
norm. transverse emitt. [μm]	3.75	2.5	2.2 {0.44}
IP beta-function [m]	0.55	0.15	1.1
IP beam size [μm]	16.7	7.1	6.8 {3}
synchrotron rad. [W/m/aperture]	0.17	0.33	28 (44)
critical energy [keV]		0.044	4.3 (5.5)
total syn.rad. power [MW]	0.0072	0.0146	4.8 (5.8)
longitudinal damping time [h]		12.9	0.54 (0.32)

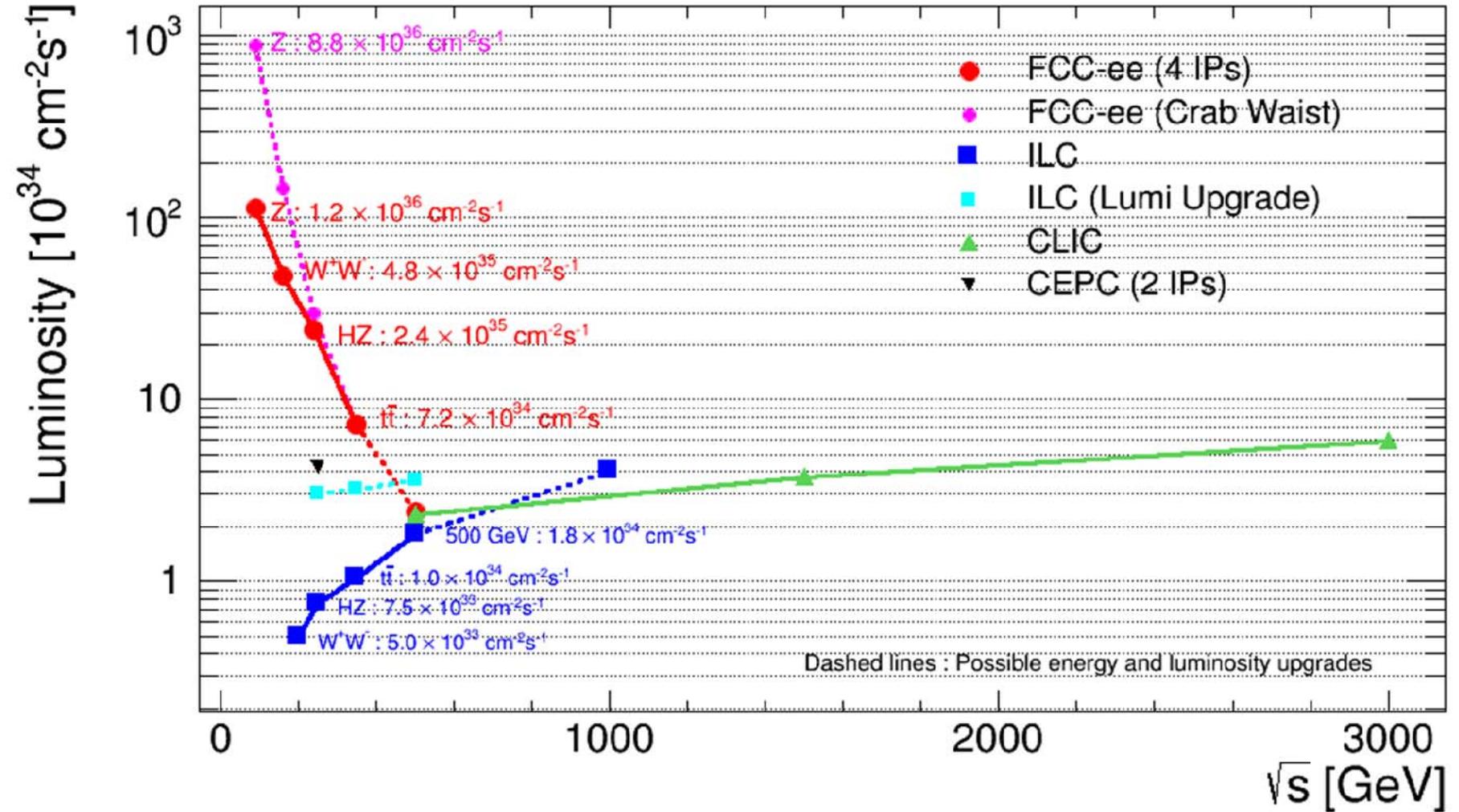


FCC-ee baseline parameters



parameter	LEP2	FCC-ee				
		Z	Z (c.w.)	W	H	t
E_{beam} [GeV]	104	45	45	80	120	175
circumference [km]	26.7	100	100	100	100	100
current [mA]	3.0	1450	1431	152	30	6.6
$P_{\text{SR,tot}}$ [MW]	22	100	100	100	100	100
no. bunches	4	16700	29791	4490	1360	98
N_b [10^{11}]	4.2	1.8	1.0	0.7	0.46	1.4
ϵ_x [nm]	22	29	0.14	3.3	0.94	2
ϵ_y [pm]	250	60	1	1	2	2
β_x^* [m]	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
β_y^* [mm]	50	1	1	1	1	1
σ_y^* [nm]	3500	250	32	84	44	45
$\sigma_{z,\text{SR}}$ [mm]	11.5	1.64	2.7	1.01	0.81	1.16
$\sigma_{z,\text{tot}}$ [mm] (w beamstr.)	11.5	2.56	5.9	1.49	1.17	1.49
hourglass factor F_{hg}	0.99	0.64	0.94	0.79	0.80	0.73
L/IP [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	0.01	28	212	12	6	1.7
τ_{beam} [min]	434	298	39	73	29	21

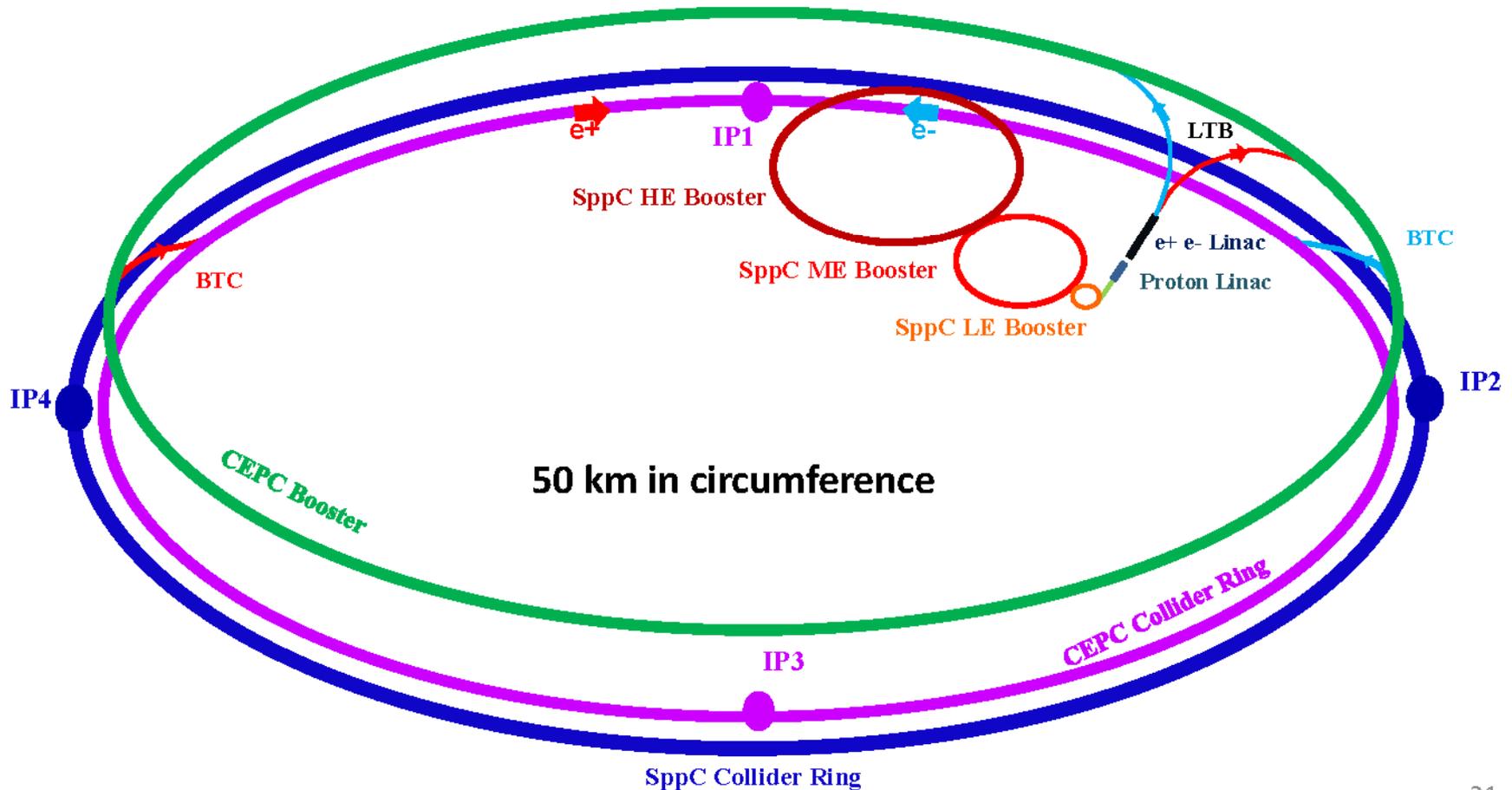
$10^5 Z$ per sec



CEPC-SppC

(Китай)

CEPC is an 240 GeV Circular Electron Positron Collider, proposed to carry out high precision study on Higgs bosons, which can be upgraded to a 70 TeV or higher pp collider **SppC**, to study the new physics beyond the Standard Model.



CepC/SppC study (CAS-IHEP), CepC CDR end of 2014, e^+e^- collisions ~2028; pp collisions ~2042



CEPC-SppC Project Timeline (dream)



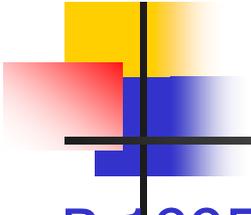
CEPC



1st Milestone: pre-CDR (by the end of 2014) → R&D funding request to Chinese government in 2015 (China's 13th Five-Year Plan 2016-2020)

SppC





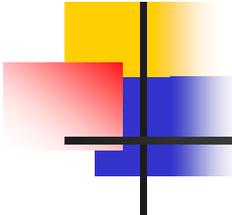
Другие крупнейшие открытия последних лет

В 1995-2002 - открытие нейтринных осцилляций (взаимопревращений), найдены недостающие солнечные нейтрино, нейтрино имеют массы и большое кв. мех. смешивание - выход за рамки Стандартной Модели
(см. отдельную лекцию про нейтринные исследования)

1998- Открытие ускорение расширения вселенной (вместо ожидаемого замедления).

Возможно это является свидетельством наличия энергии и давления вакуума – выход за рамки современной концепции мироздания. Измерана кривизна и (примерный) состав Вселенной:

(см. лекцию Астрофизические исследования)



Природа бросила вызов физикам!

Обычная материя	5%
Темная материя (неизвестной природы)	25%
Темная энергия (вызывающая антигравитацию в космологических масштабах)	70%

Размерность масс

e, \hbar, c

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

нет разм. массы

e, \hbar

$$m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ эв} \sim 10^{19} \text{ геВ/с}$$

масса Планка.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\hbar \hbar}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{ см} - \text{квант. гравит.}$$

Are there more forces?
particles? symmetries?

What is the right description
of gravity, and where does
it become relevant for
particle physics?

VLHC
100 TeV
pp

Muon
collider

Explain the masses of
the p and e, and the
relative strengths of
the fundamental forces

Is there a unification for
all forces?
What breaks it?

0.5–1.0 TeV
 e^+e^-
collider

What breaks electroweak
symmetry? What is the
origin of mass?

LHC
14 TeV
pp

Are there extra
dimensions? What is
the structure of
spacetime?

What is the physics beyond
the standard model?
New particles?
New interactions?

Neutrino
factory

High-
luminosity
Z factory

Do we understand the
structure and fate
of the universe?

Flavor puzzles:
Can we understand the
masses and mixing of
fermions? Where does
CP violation come from?

B, K, τ ,
charm
factories

Tevatron
2 TeV
pp collider

Can we explain the universe?
Is it matter dominated?
Cosmological constant?
Dark-matter problem?

Particle
astrophysics