



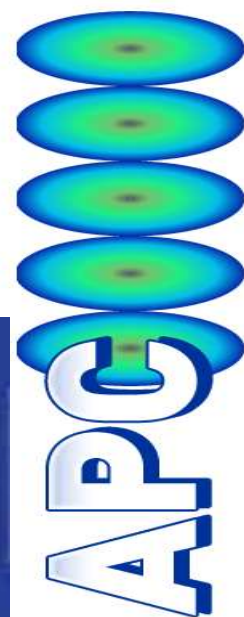
Что после Хиггса?

Будущее Физики Частиц Сверхвысоких Энергий

Владимир Дмитриевич Шильцев

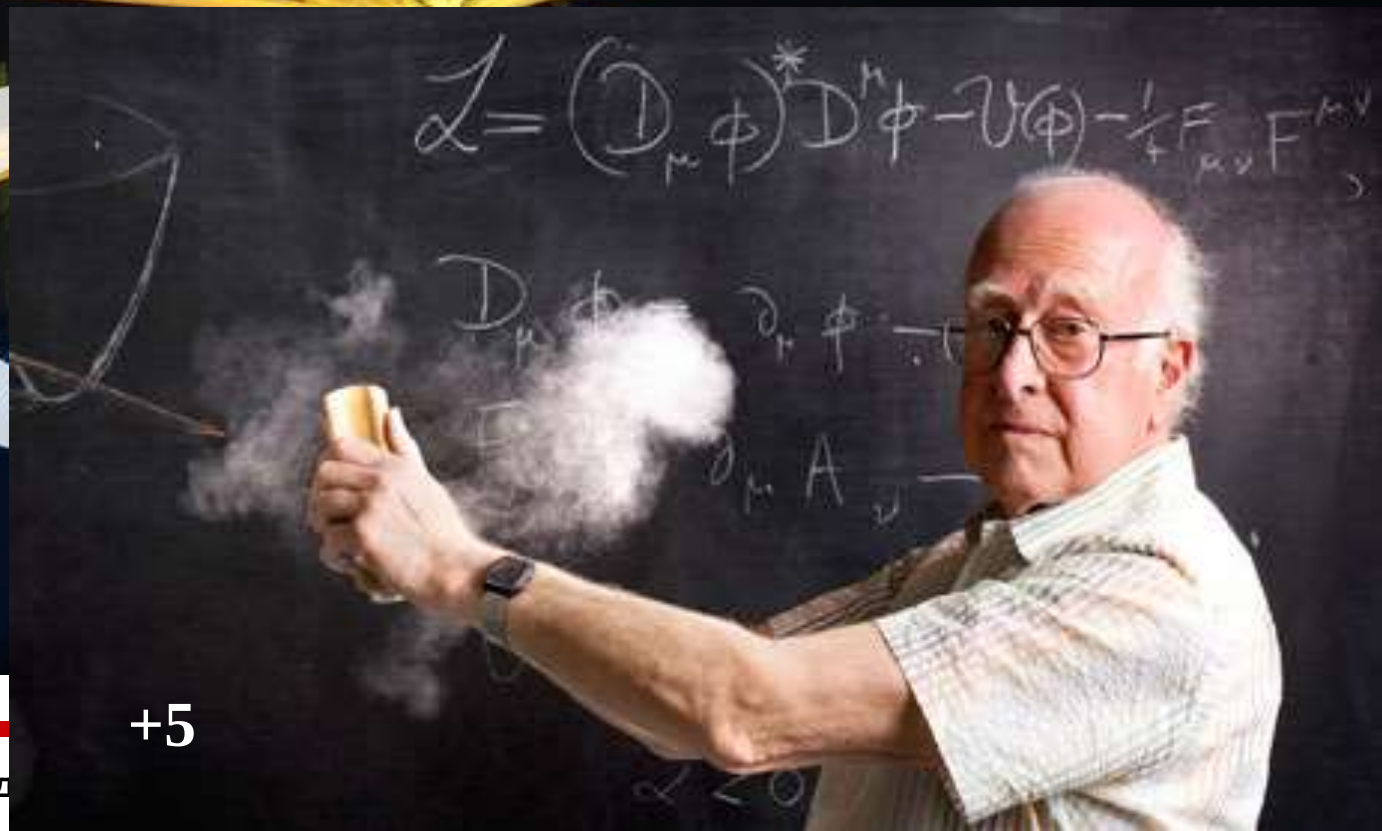
Директор Центра Ускорительной Физики
Лаборатория им.Э.Ферми (США)

ноябрь 2013



HIGGS

BO

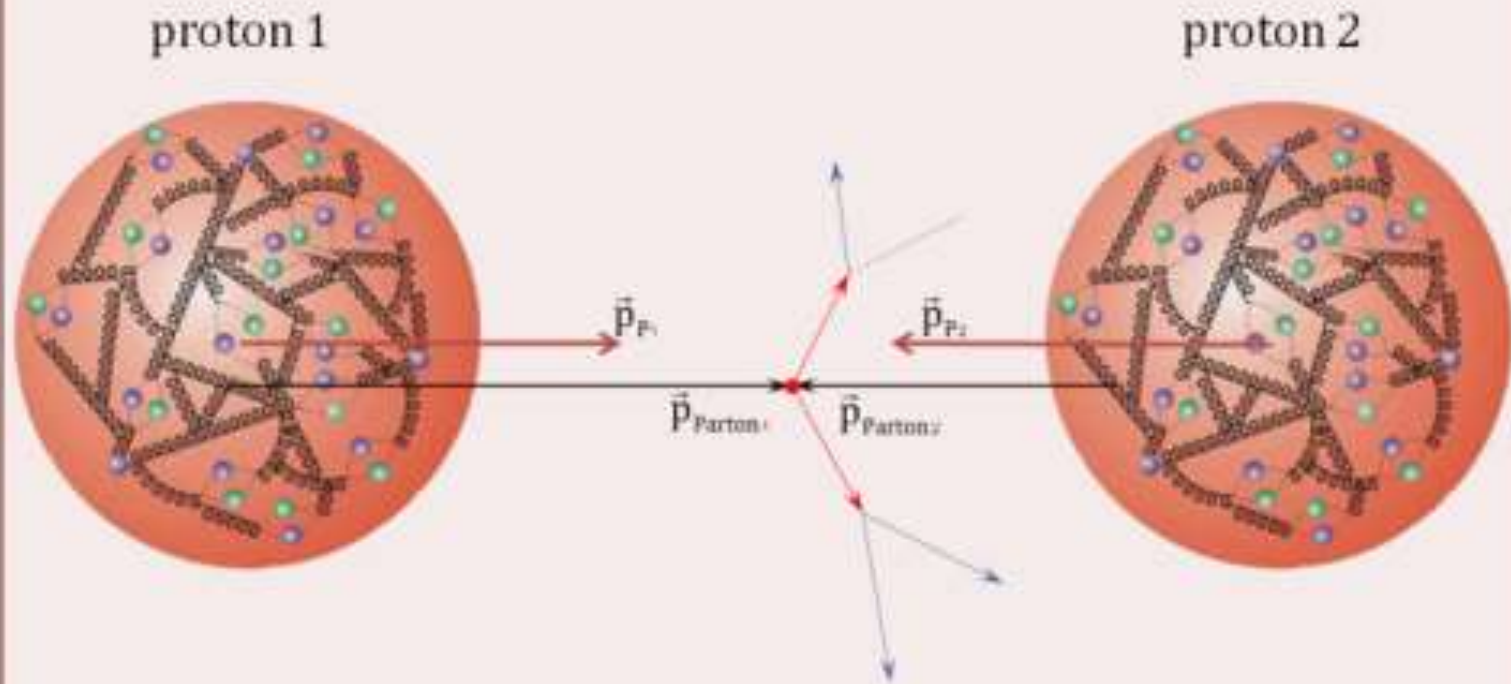


+5

Влад

Протон-Протонные Столкновения

Interactions of constituents of the colliding protons, the so called partons (quarks, gluons)



$\vec{p}_{P_1}$... momentum proton 1

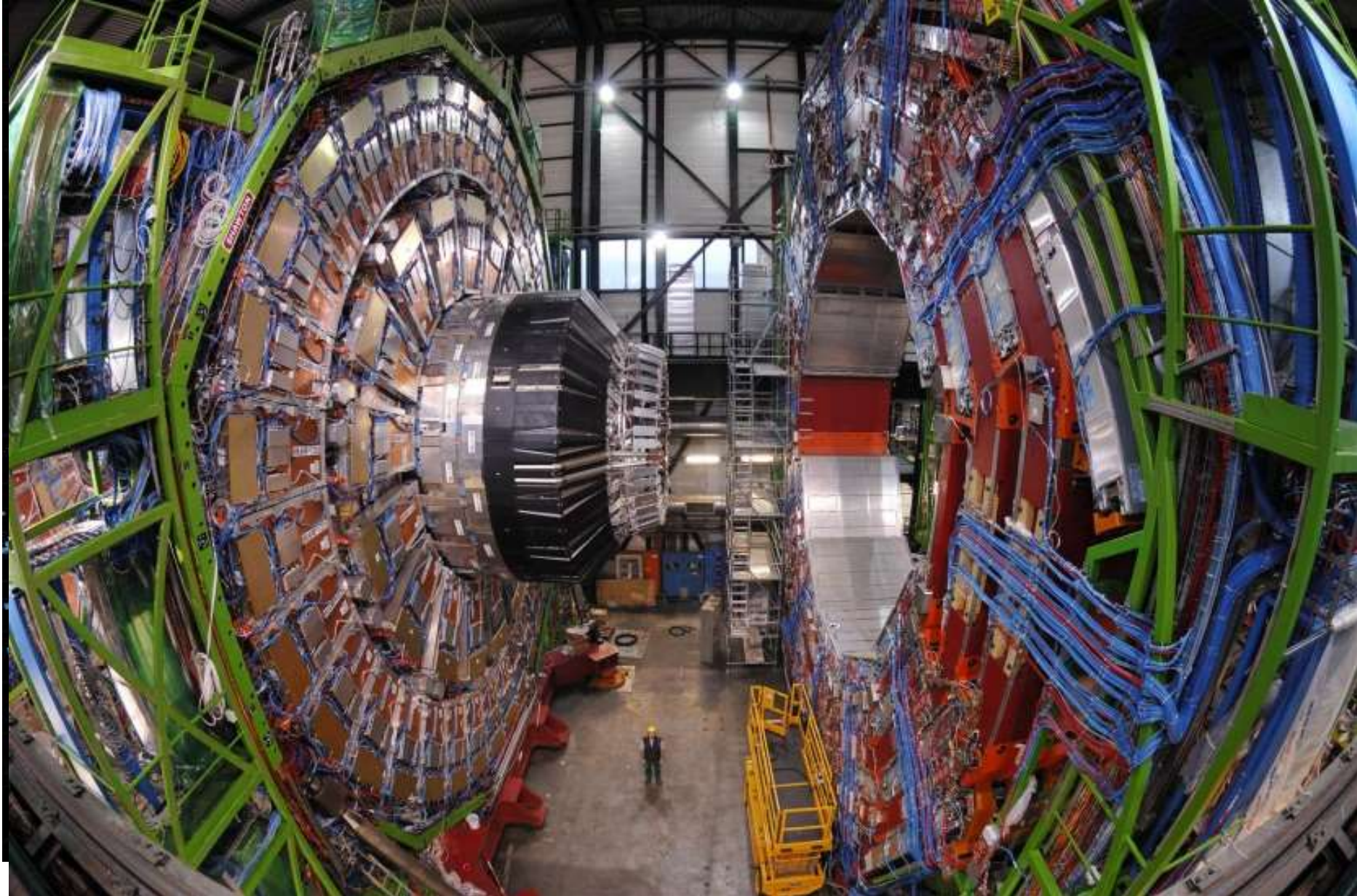
$\vec{p}_{P_2}$... momentum proton 2

• interaction vertex

$\vec{p}_{Parton_1}$... momentum parton 1

$\vec{p}_{Parton_2}$... momentum parton 2

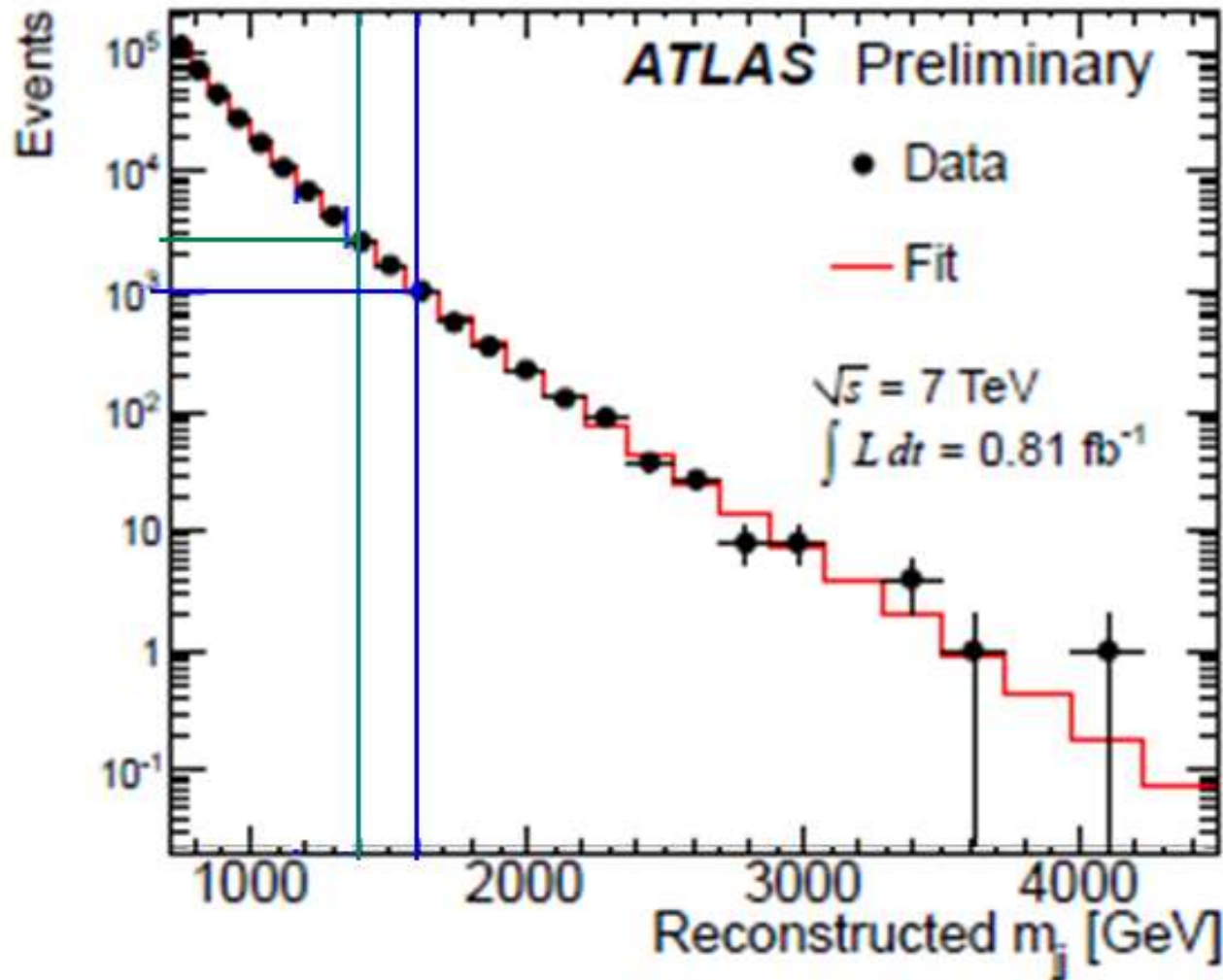
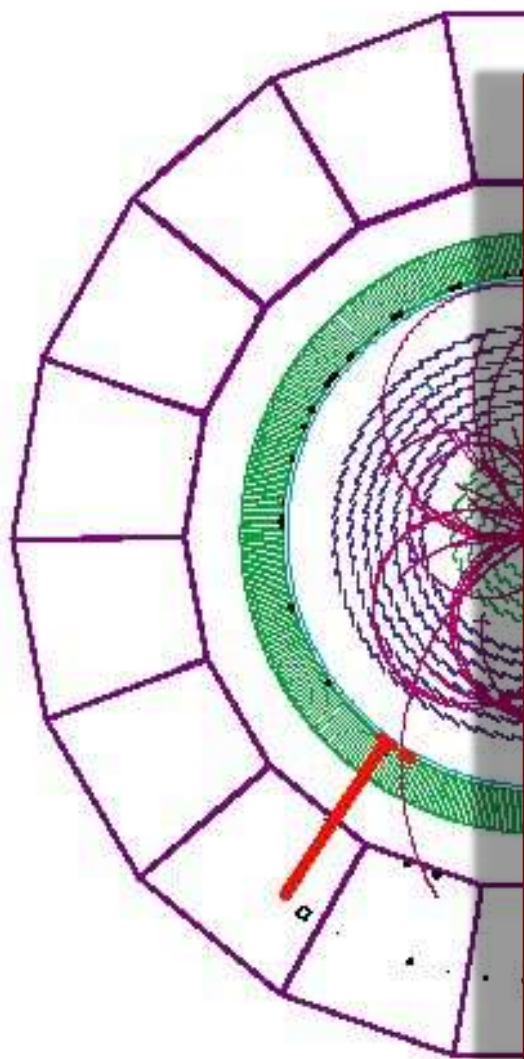
Детекторы частиц: CMS & ATLAS





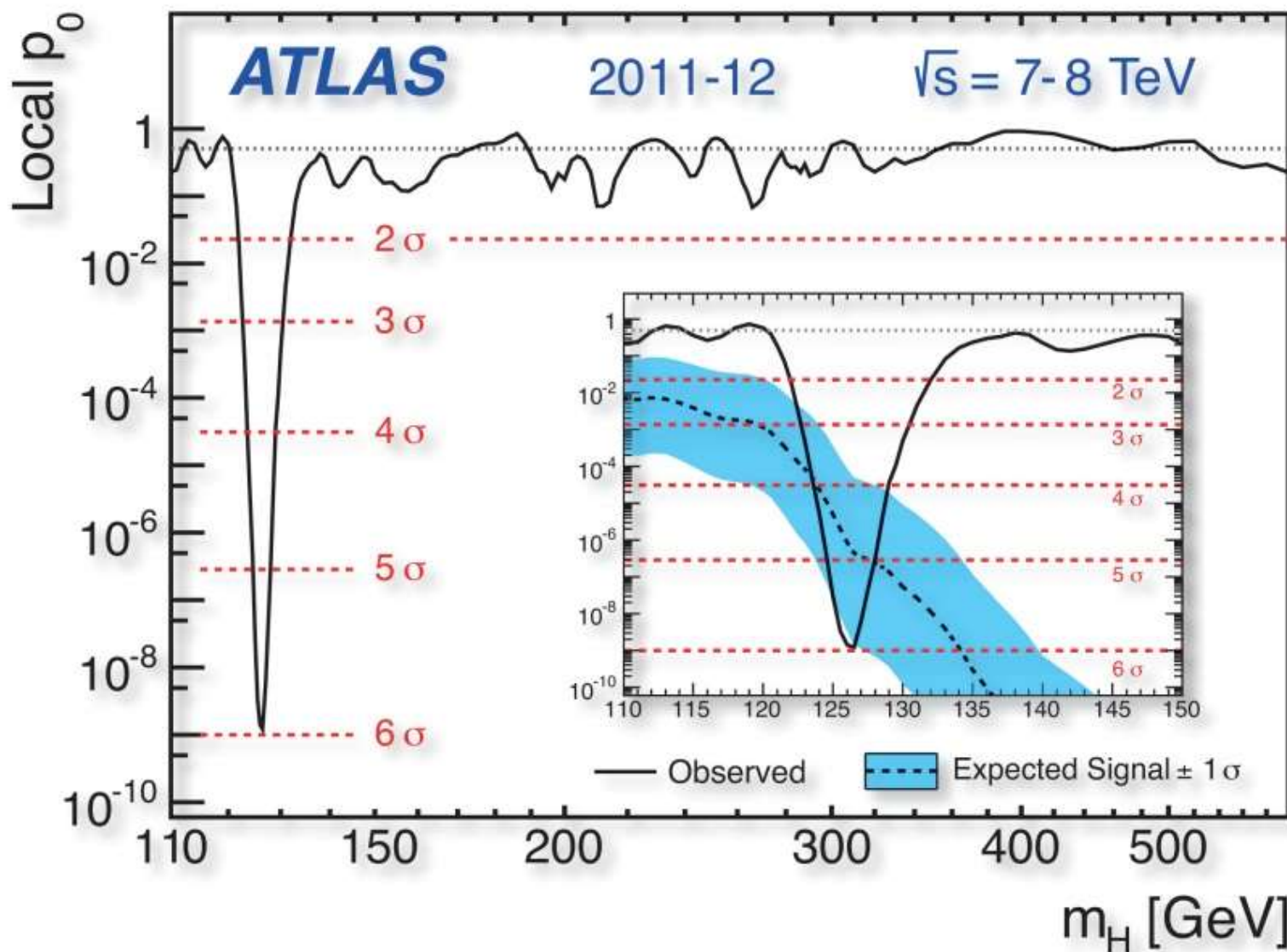
Обработка “событий” on/off line

50 $\rightarrow$ 25 ns, pileup 30





Выборка “особых” распадов и вероятность ошибки

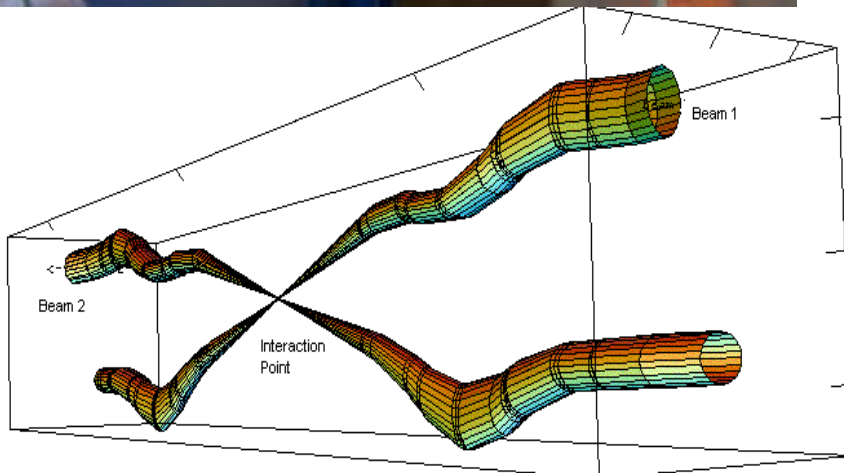
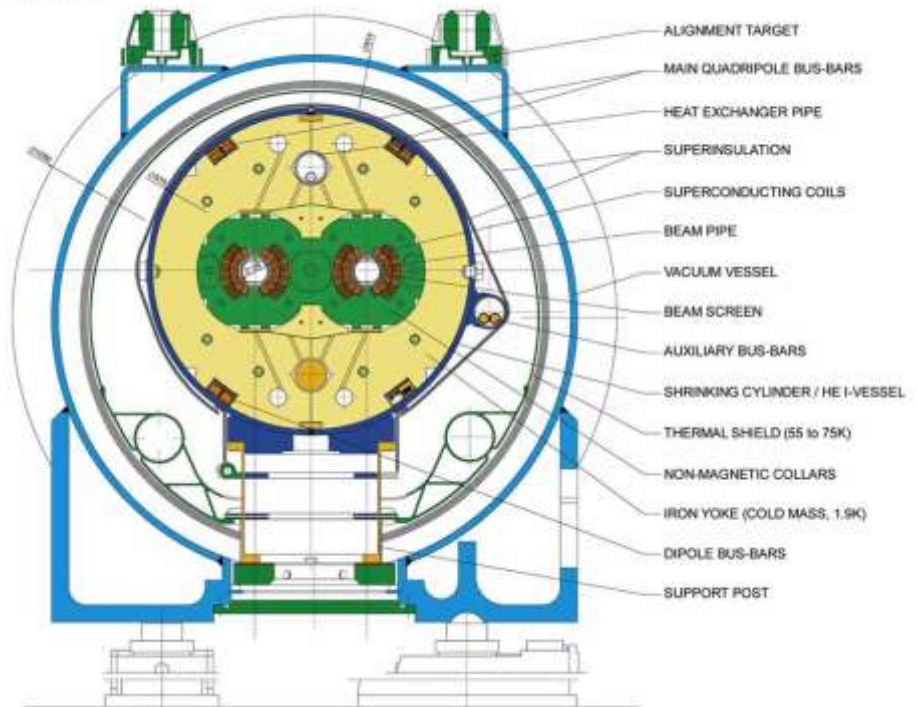




Что находится в 27 км тоннеле



LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

**1232 поворотных магнита 15м
NbTi кабель, 13 кА @ 1.9 К
до 9 Тесла (90 000 Гс), 10 GJ
Вакуум пучка <1e-12 атм**



БАК = бак





Квенч (Quench) : МРТ магнит*



№1 как починили
№2 Вакуумная камера

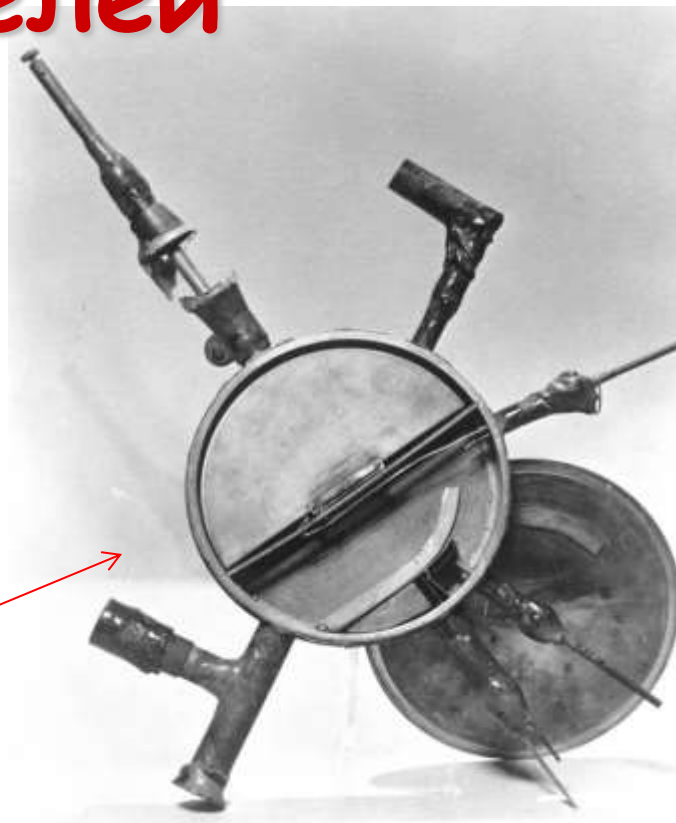
***pulled off the web. We recover our Helium.**



Дедушка Современных Ускорителей



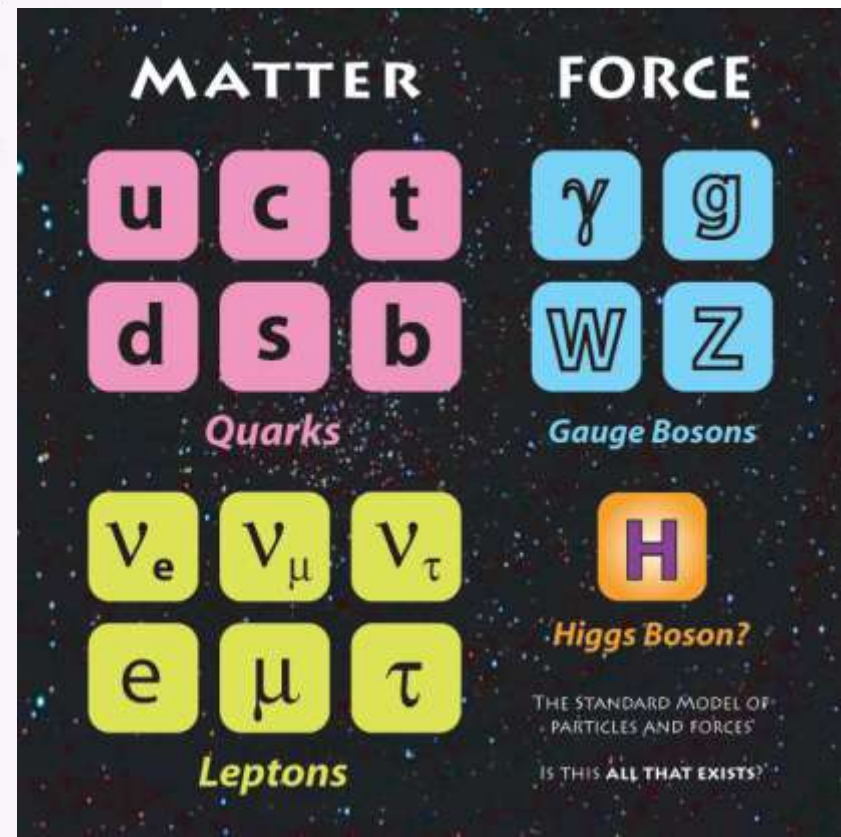
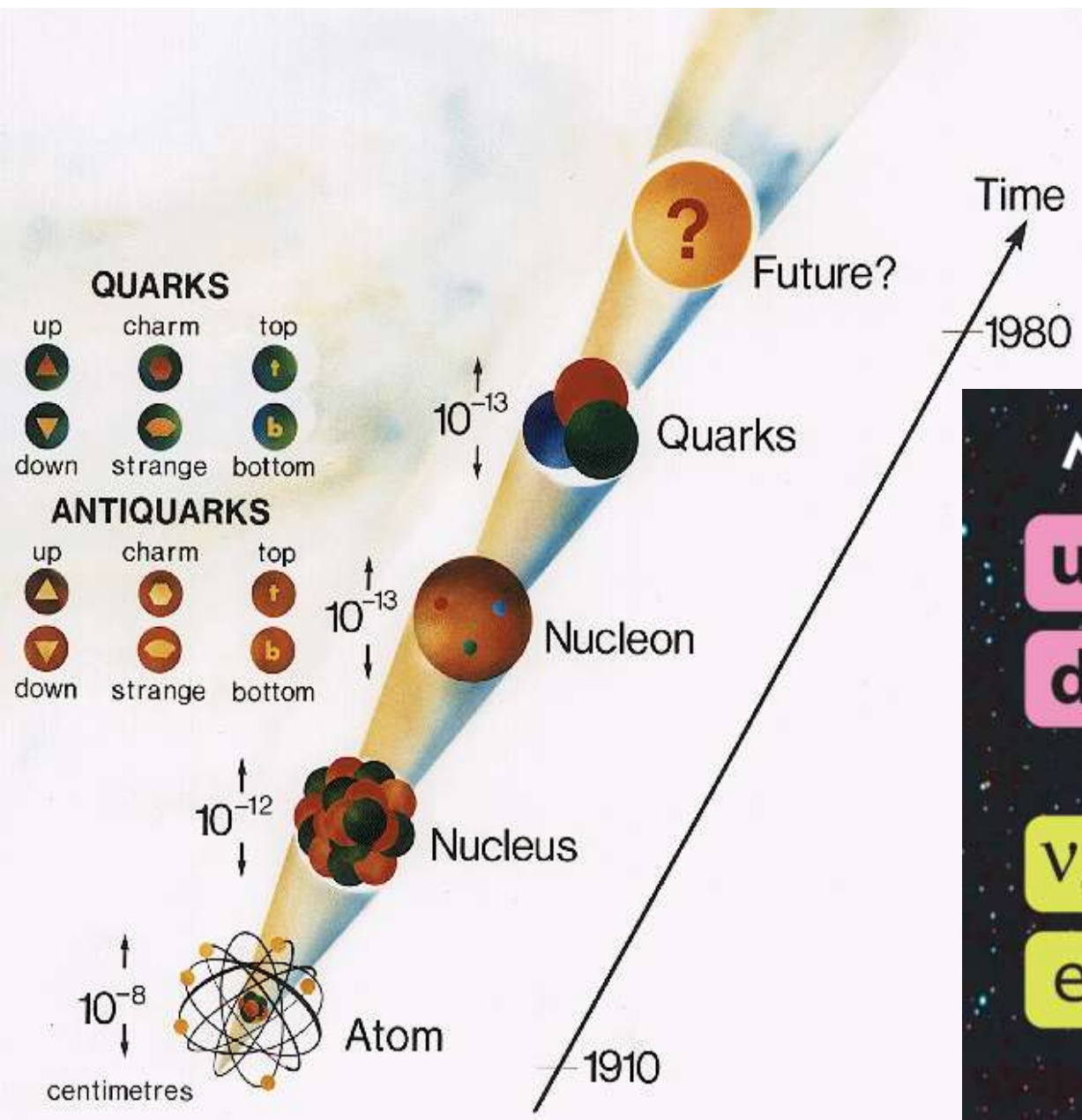
Эрнест Лоуренс



Циклотрон 25\$
80,000 Вольт

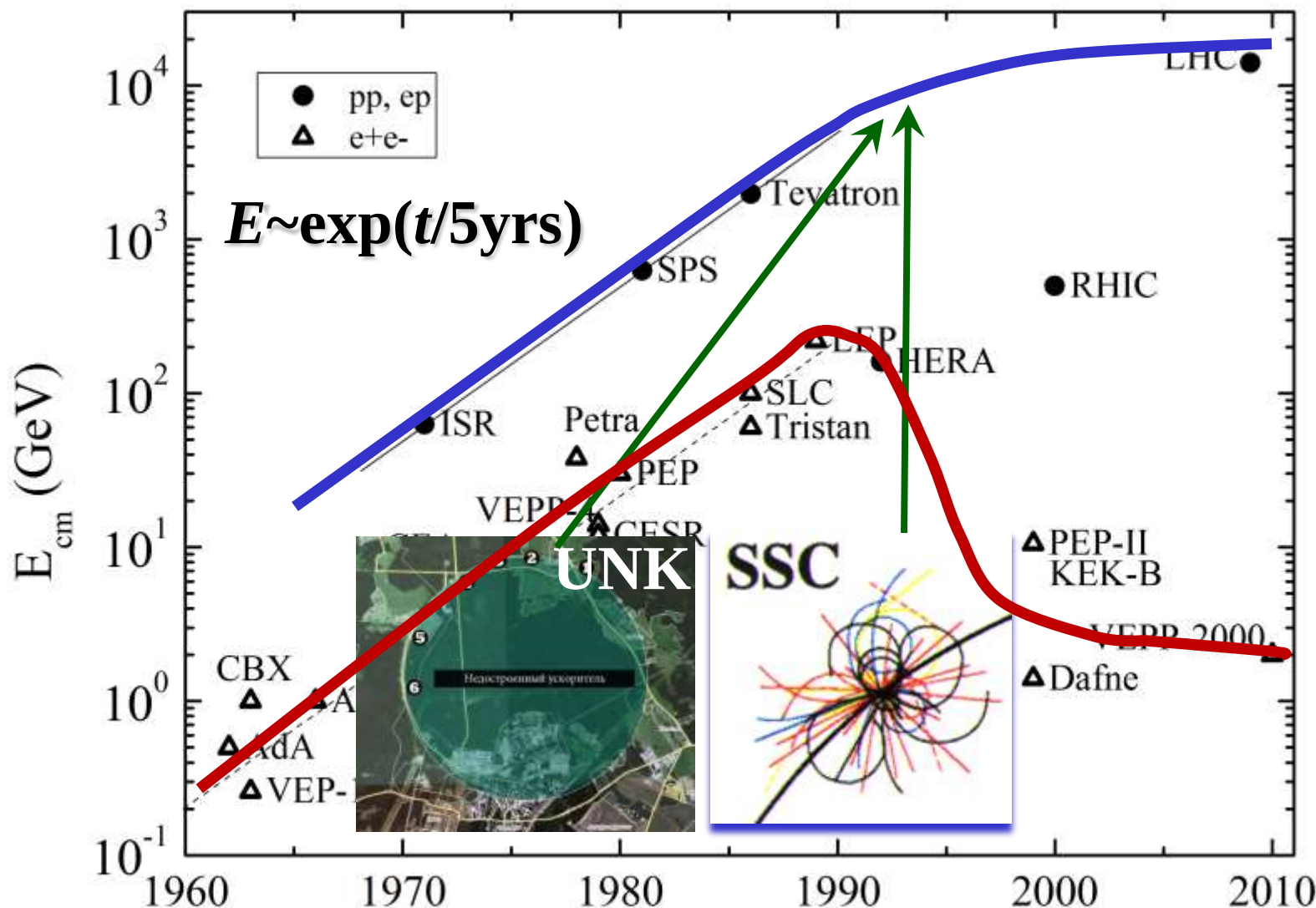
Переменное электрическое поле

Поиски элементарных частиц на ускорителях





Коллайдеры – “Героическое” Прошлое

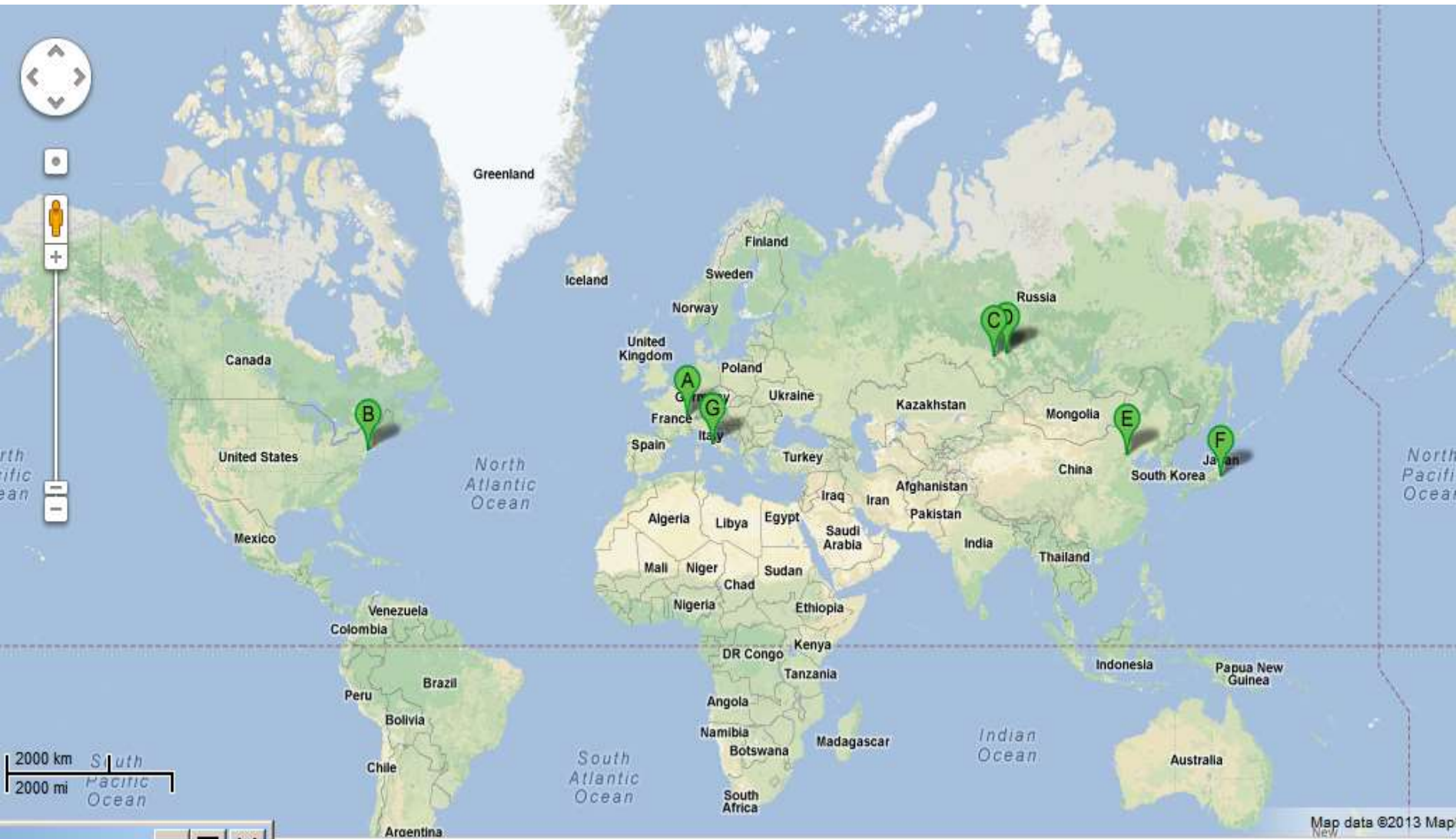


?

Всего построено - 29 Year



Работающие Коллайдеры





Итак, что имеем

- LHC протон-протон 4000 (7000) ГэВ

ЧТО ПОСЛЕ LHC?

(+20 лет)

- RHIC(США) протон-протон 250 ГэВ
- NICA (Дубна) протон...Au 1-5 GeV/нуклон
- Электрон-позитронные фабрики 1-10 GeV
 - b, C-tau, Phi - частицы
- Электрон-ионные коллайдеры: 15-50 ГэВ



Три Вопросы Для Физиков

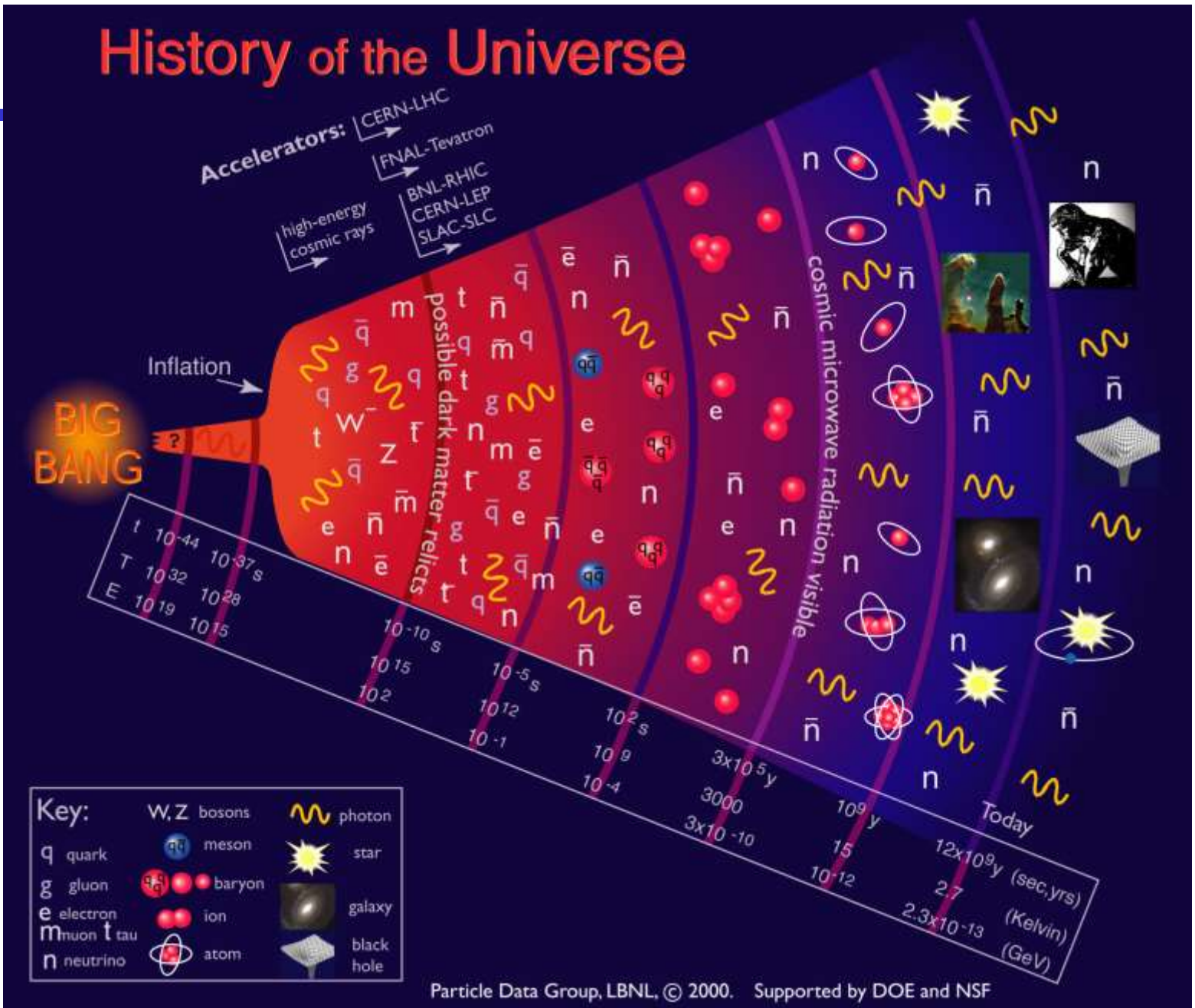
Почему все имеет вес?

Почему так мало антивещества
(почти нет)?

Из чего и как образовалась
Вселенная?



History of the Universe



We're currently probing down to a few picoseconds after the Big Bang

Владимир Шильцев - Коллайдеры - ИКИ, Март 2013



Нужны Энергии Выше БАКа ...x10? ...три подхода и два ограничения



СП Магниты Ускорителей

4.5T

Tevatron,
6 m, 76 mm
774 dipoles



4.5 K He, NbTi
+ warm iron
small He-plant

5.3T

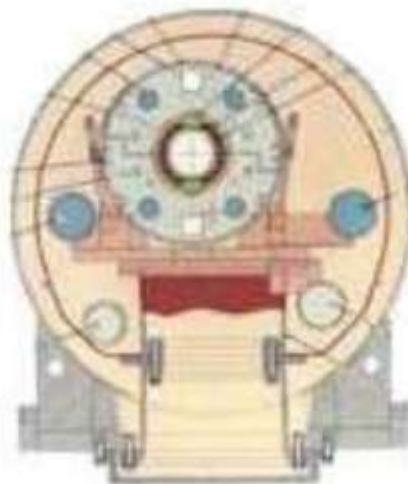
HERA,
9 m, 75 mm
416 dipoles



NbTi cable
cold iron
Al collar

3.5T

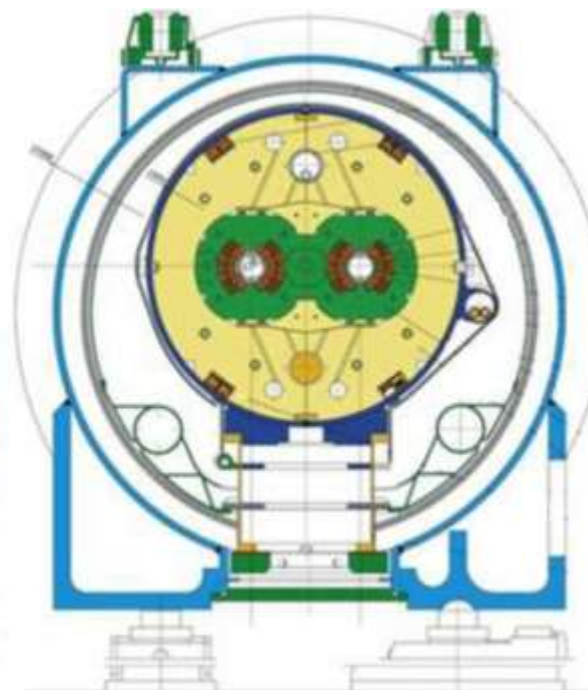
RHIC,
9 m, 80 mm
264 dipoles



NbTi cable
simple &
cheap

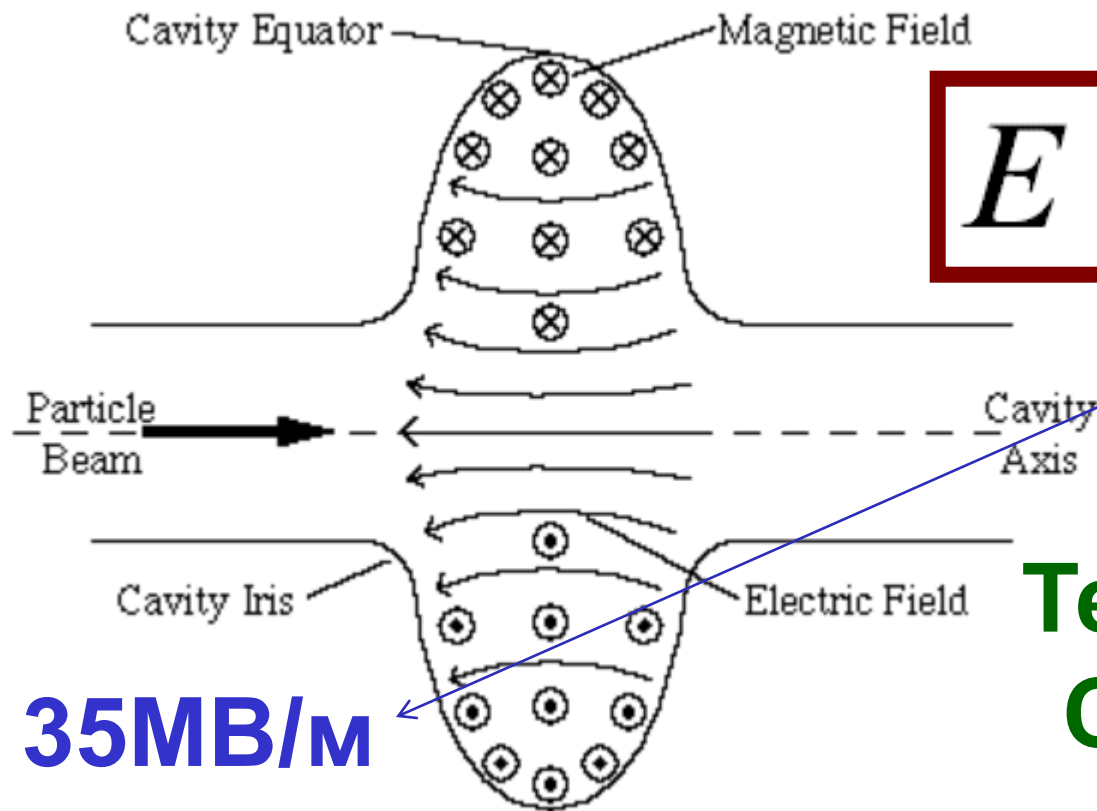
8.3T

LHC,
15 m, 56 mm
1276 dipoles



NbTi cable
2K He
two bores

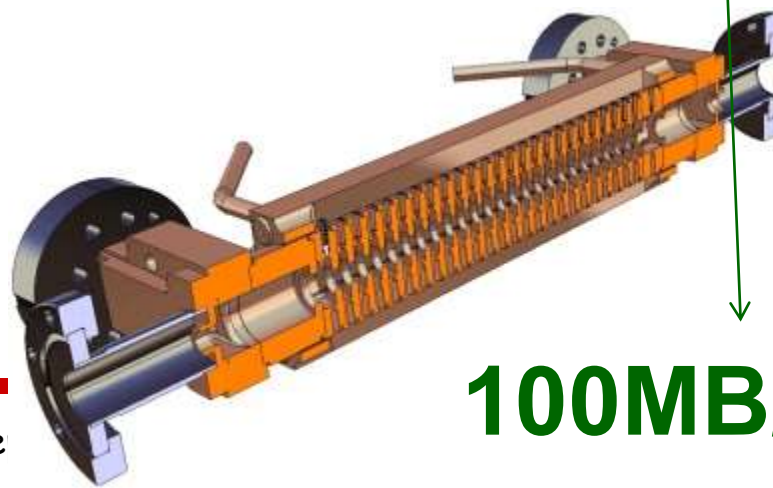
Технология Ускорения – ВЧ линак



$$E = eGl$$

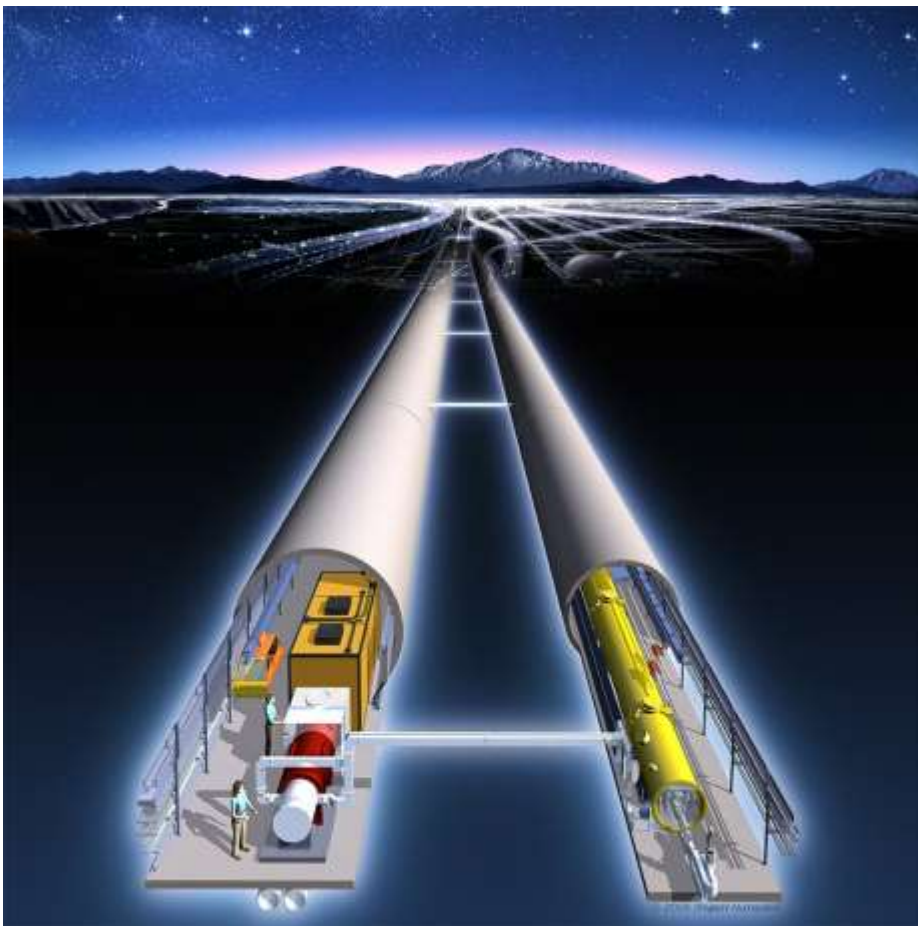
СП ВЧ 35МВ/м
Nb, 1.3 ГГц

Теплое ВЧ,
Cu, 12 ГГц



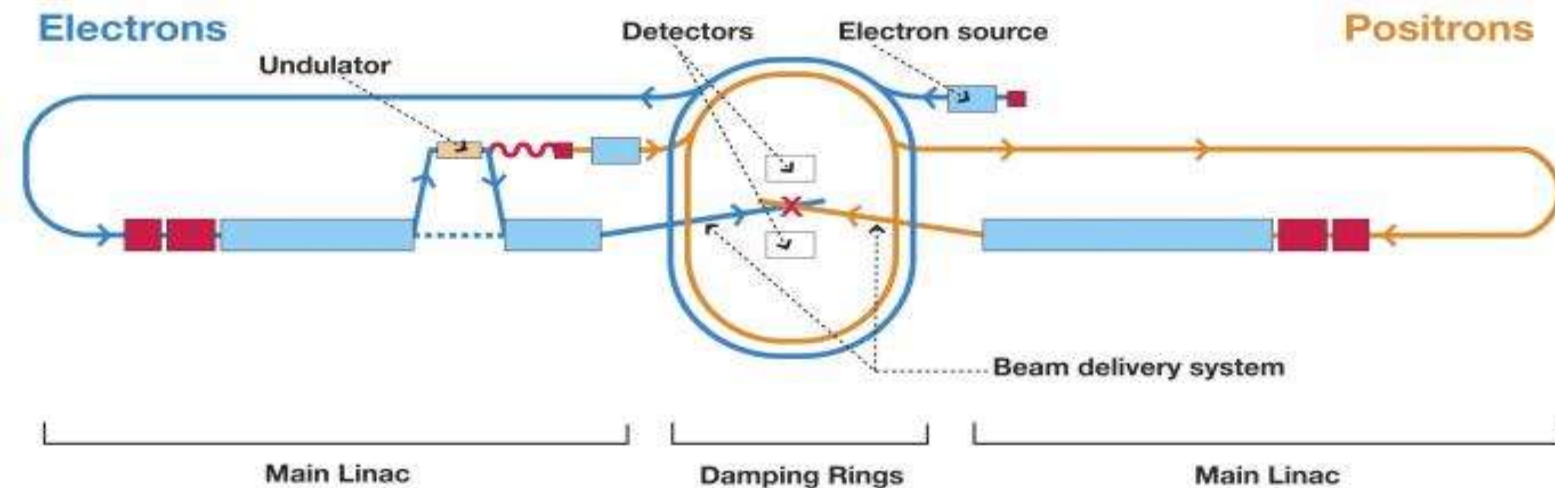
- Коллайде

100МВ/м

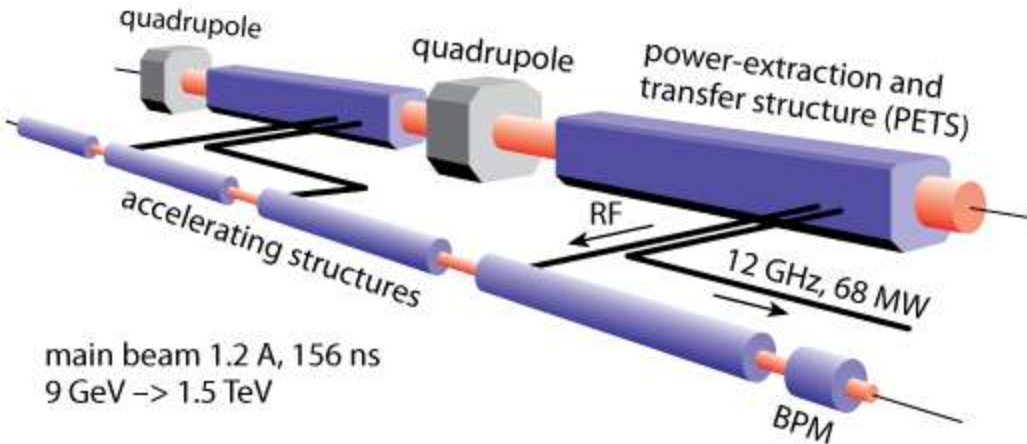


ILC – Международный Линейный Коллайдер

- СТ ВЧ 31.5 МВ/м @ 2К
- Тоннель для клистронов
- 230МВт, 9% эфф. e^+
- Светимость, 0.5 ТэВ



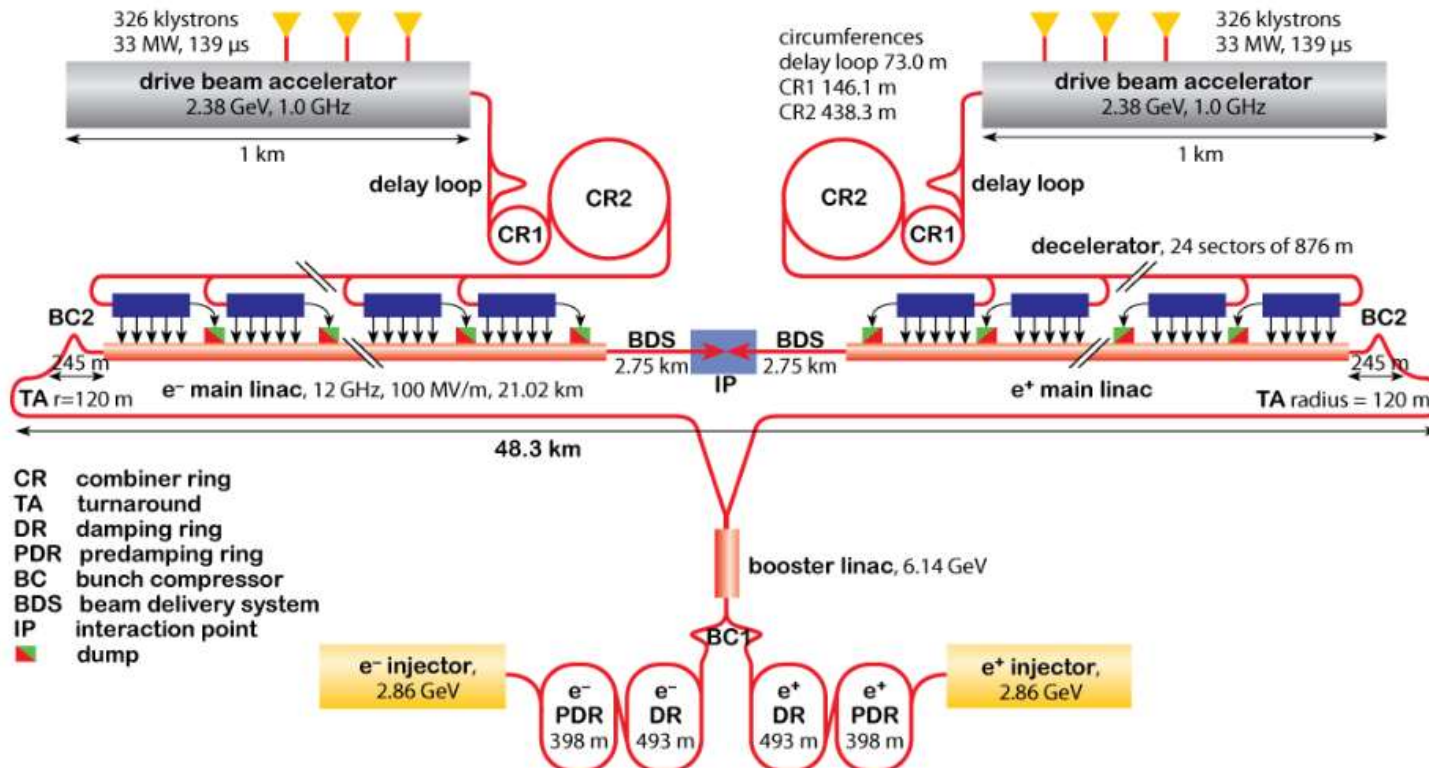
drive beam 100 A, 239 ns
2.38 GeV $\rightarrow$ 240 MeV



CLIC

- 100 MV/m @ 300K
- Мощный уск. driver
- 560 МВт, 7% эфф.
- 3 ТэВ, 2-5% beam strahlung

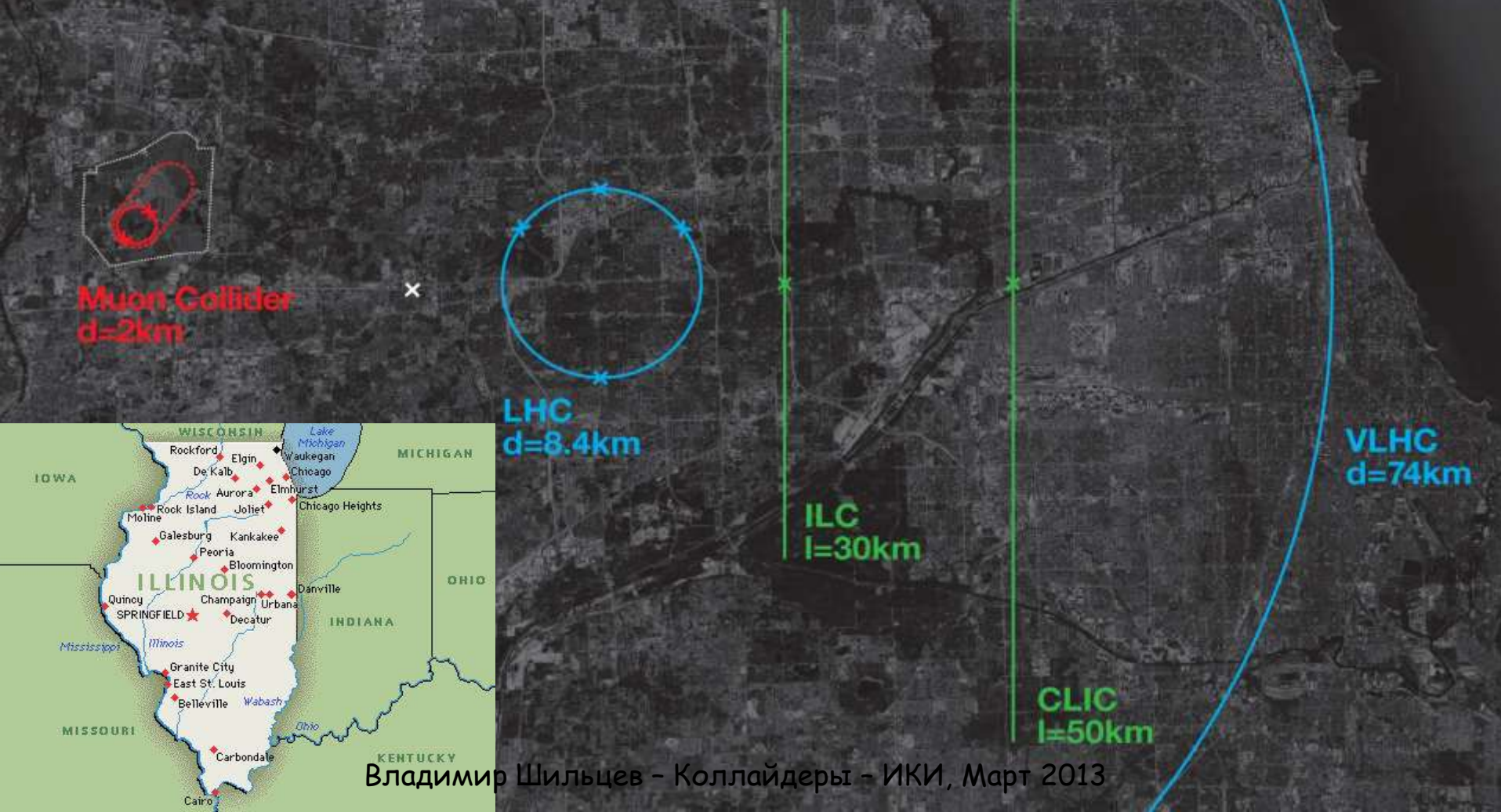
CLIC general layout



Comparison of Particle Colliders

To reach higher and higher collision energies, scientists have built and proposed larger and larger machines.

Следующее поколение?





Масштабы (в год)

- Мировой ВВП ~65,000 B\$
- Всего на исследования ~1,300 B\$
 - или ~2% ВВП
- На фундамент.науку ~250 B\$
 - или ~18% от НИР
- На физику частиц ~3 B\$
 - ~1.2% всей фонд. науки

Не так плохо для ~12,000 ученых (?)

“Большой” Ускоритель

- Даже в самом благополучном сценарии
 - международный проект
 - на 10 лет
 - 30% всех ресурсов (1B\$/год)
- При этом основные факторы цены
 - Длина туннеля
 - Стоимость ускорителя
 - Потребляемая мощность



10 млрд \$



Как итог - “Желаемое”

■ “Передовая Физика”

- ❖ $Physics \propto \log(Energy)$
- ❖ 100-1000 ТэВ = (10-100) × БАК
- ❖ чтобы работало (светимость)

■ ...но “в пределах доступного”:

- ❖ < 10 млрд \$
- ❖ < 10 км
- ❖ < 10 МВт пучка, ~100Вт полной

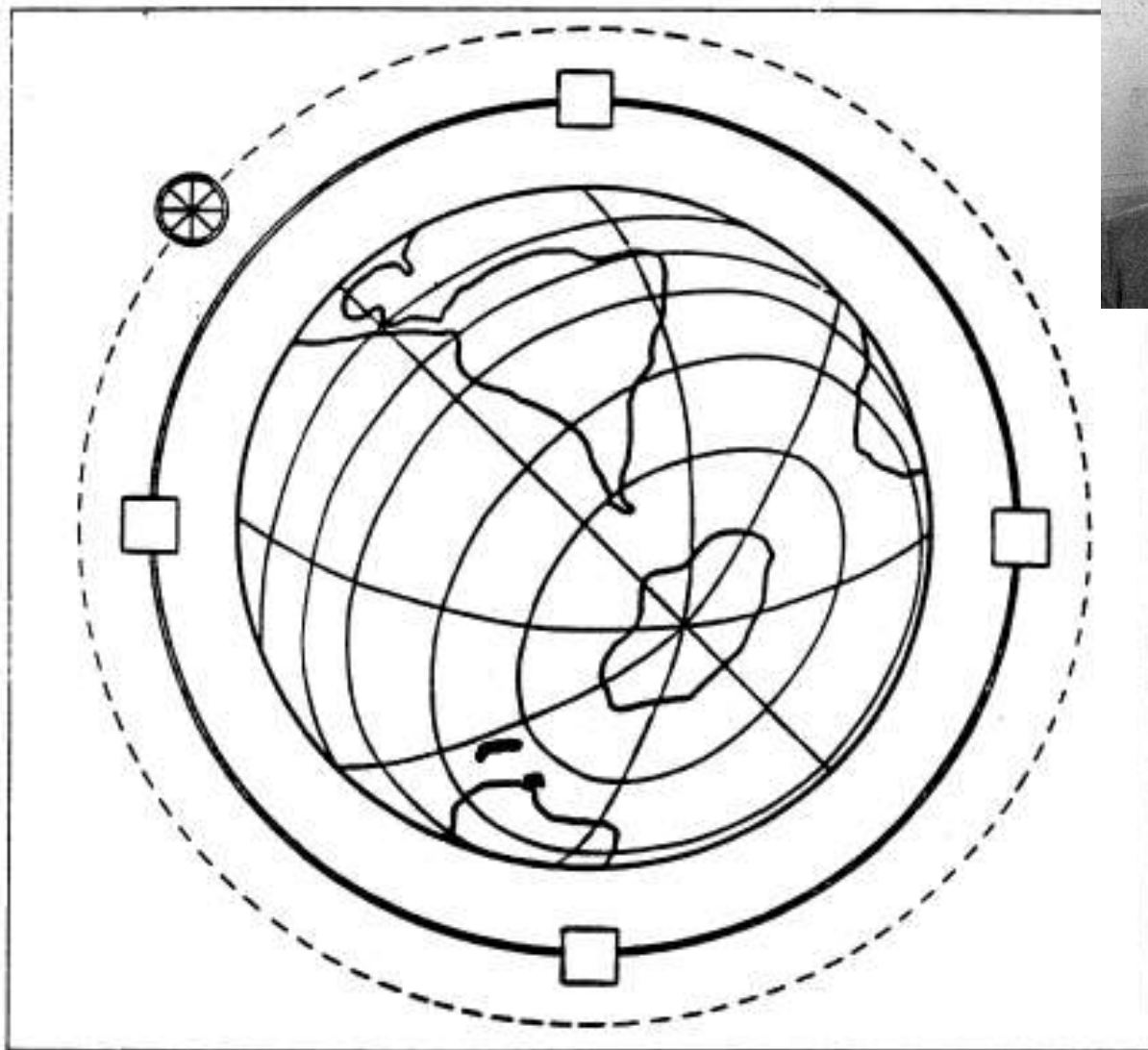


Предельный ускоритель Ферми

■ “globaltron”

➤ 40,000 km

➤ >> 1000 B\$



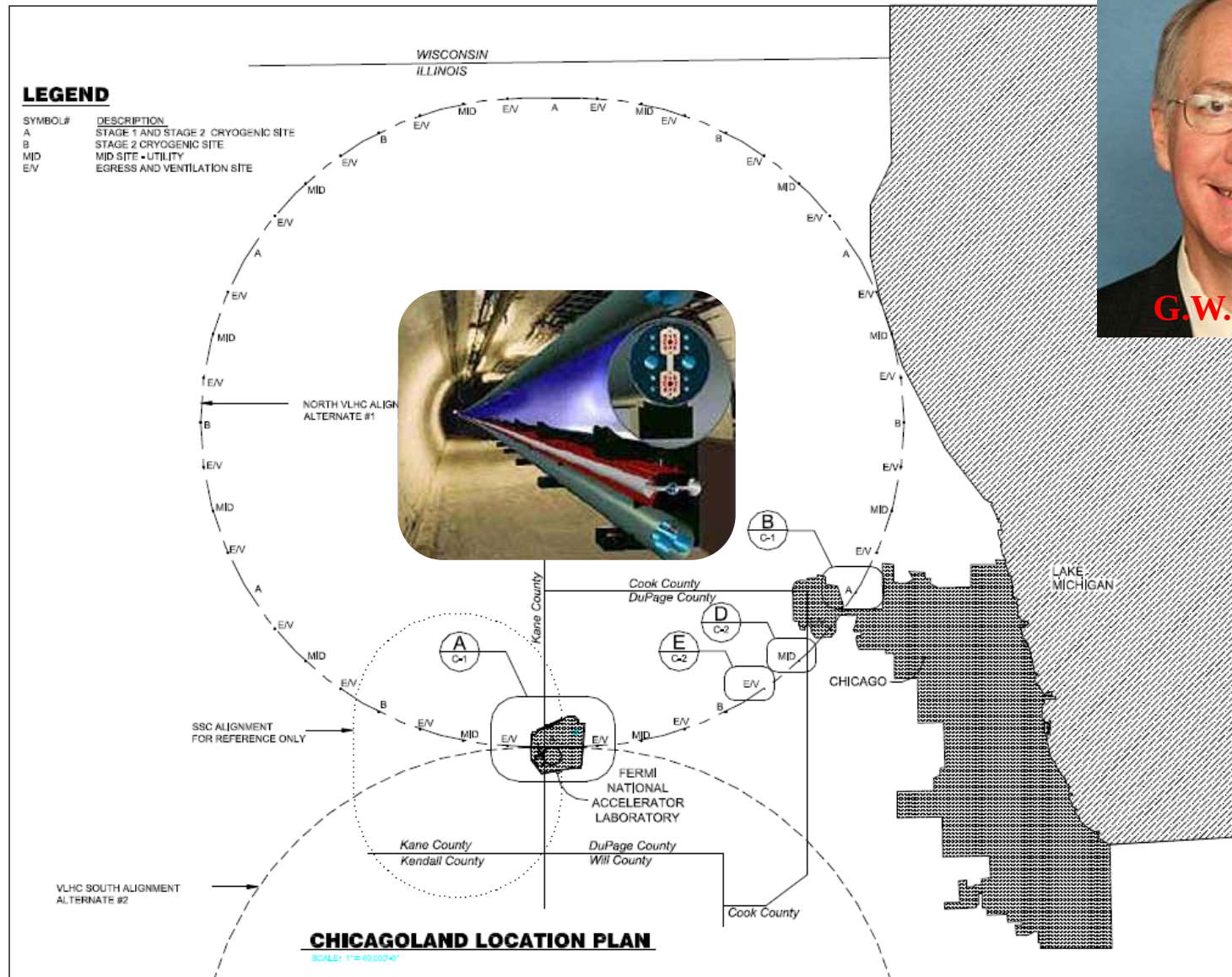
From a 1954 Slide by Enrico Fermi, University of Chicago Special Collections.



Another “Too Big of a Machine”

■ VLHC or “pipetron”

➤ 233 km , >20 B\$





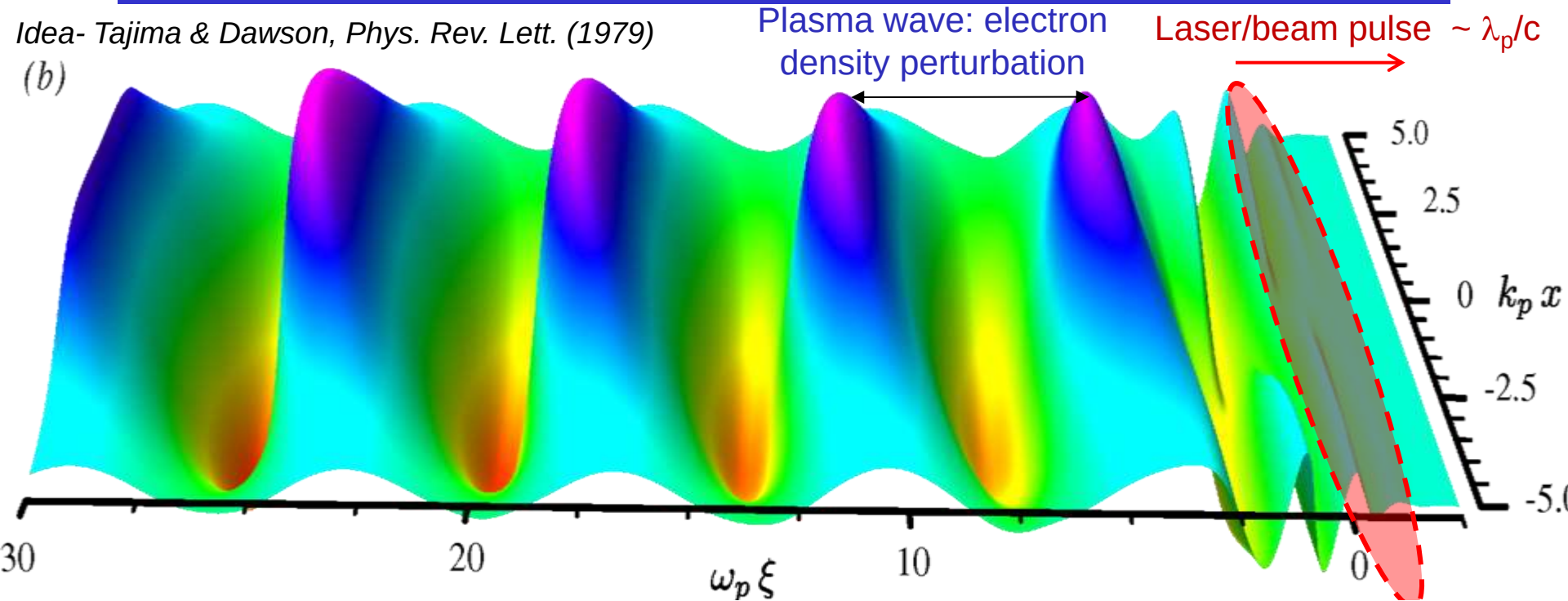
Поиски новых
принципов ускорения
- с целью
подготовиться к эре
“после БАКа”
+20 лет



Волны в Плазме

Idea - Tajima & Dawson, Phys. Rev. Lett. (1979)

(b)



$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[\frac{\text{GeV}}{m} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]}$$

Вариант #1:

Short intense e-/e+/p bunch

10^{18} cm^{-3} , 100 GV/m, $\lambda_p \sim 30 \mu\text{m}$

Вариант #2:

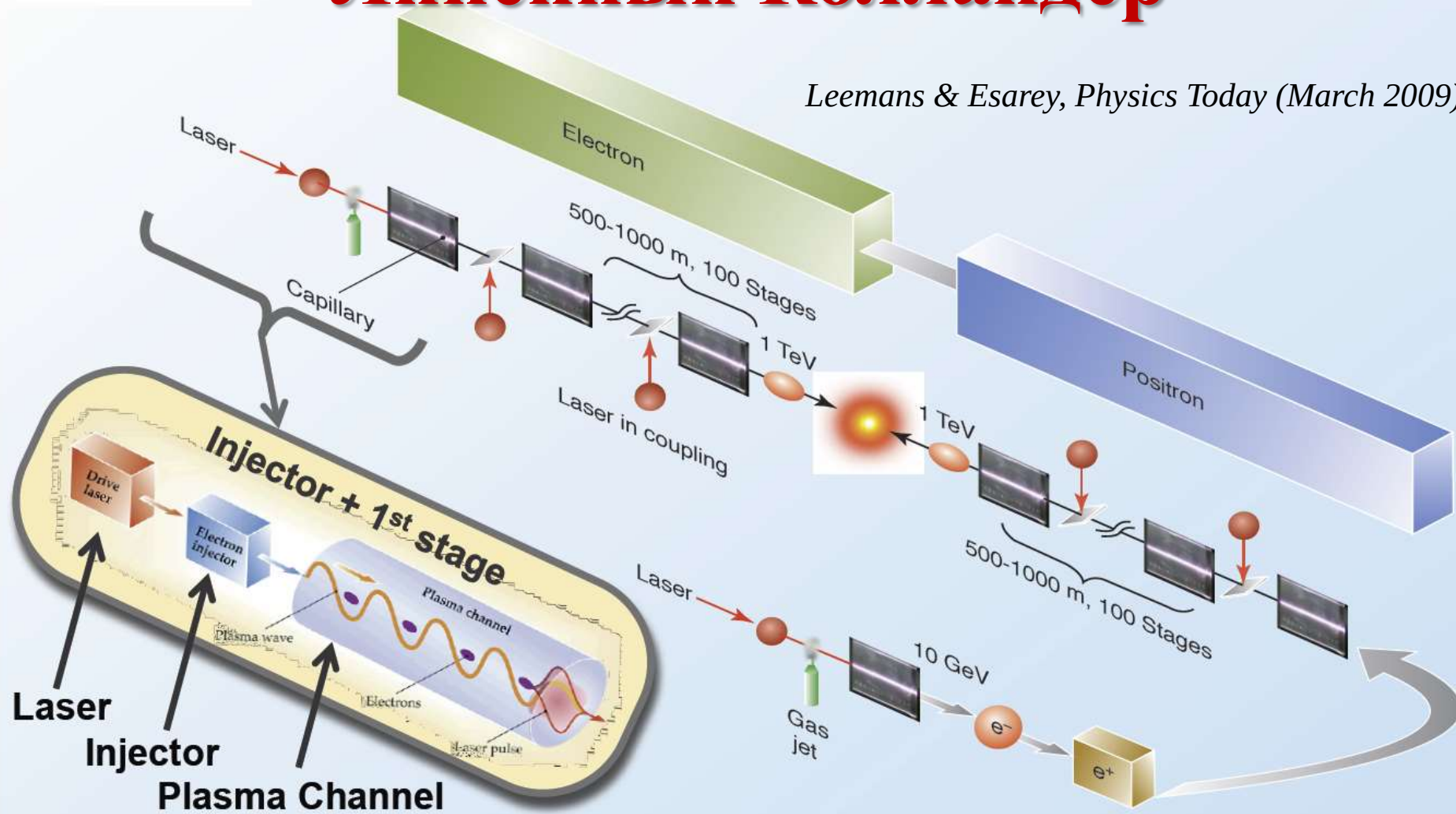
Short intense laser pulse

10^{17} cm^{-3} , 30 GV/m, $\lambda_p \sim 100 \mu\text{m}$



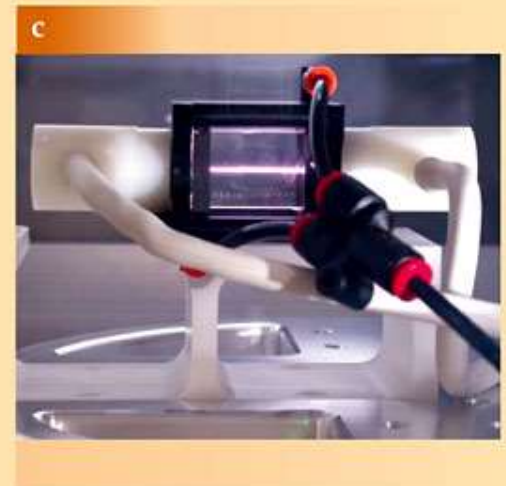
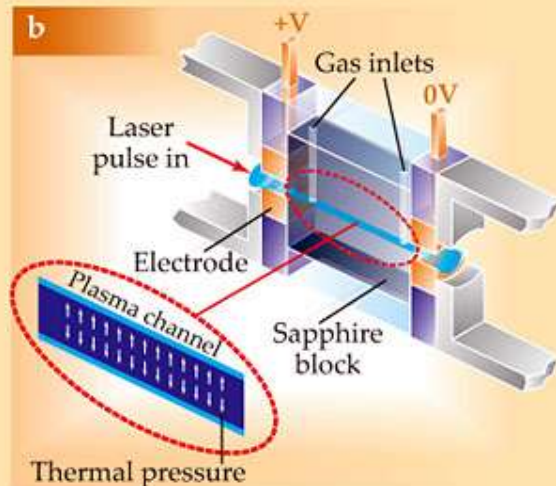
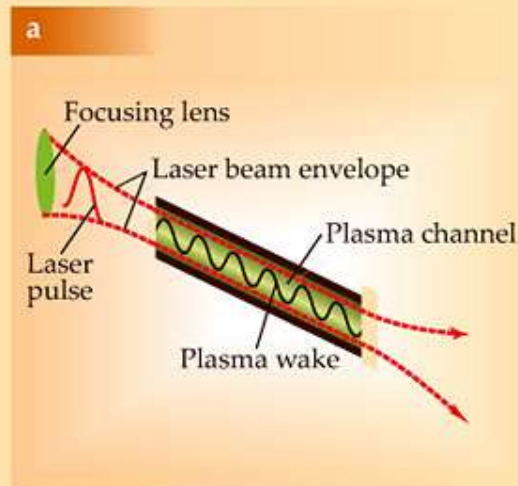
Лазерно-плазменный e^+e^- - Линейный Коллайдер

Leemans & Esarey, Physics Today (March 2009)

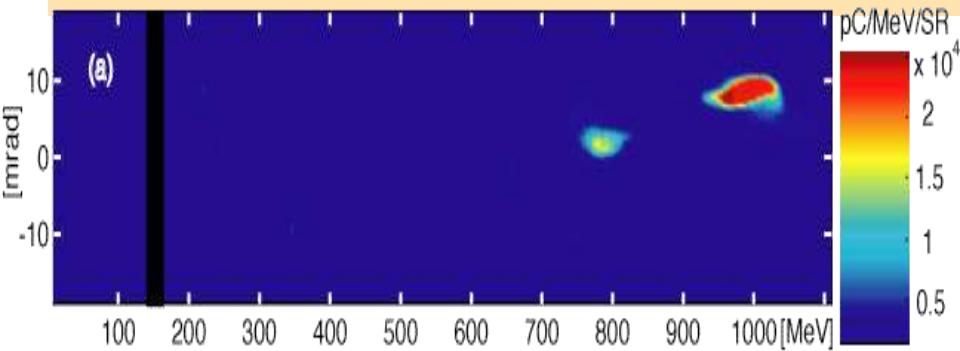




Первые результаты



LBNL



Ясны серьезные проблемы:

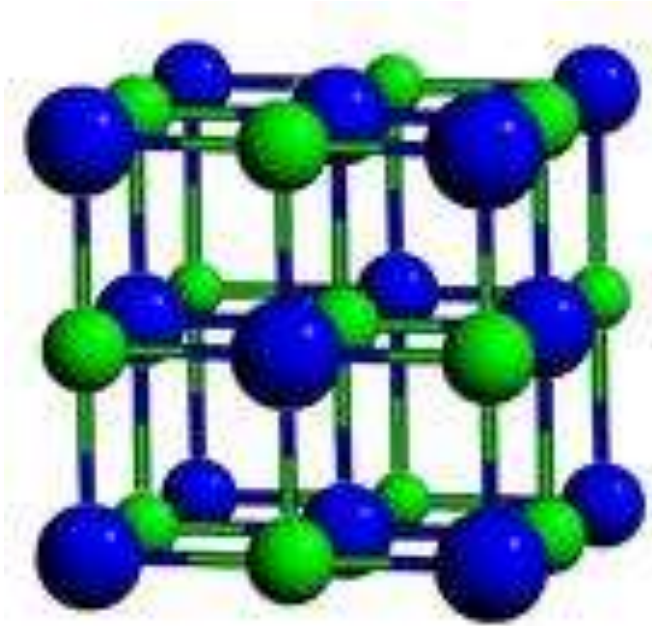
- скорость света в плазме $< c$
- надо много ступеней ускорения
- стоимость лазера запредельная
- ускорение e^+ проблематично
- e^- или e^+ неприемлемо много излучают при $E > 1-3$ ТэВ

■ Achieved ~ 30 GV/m (Berkeley)

- 1 GeV over 3 cm with 40 TW laser
- 2 J laser $\rightarrow$ 0.03 J beam ($\eta=1.5\%$)

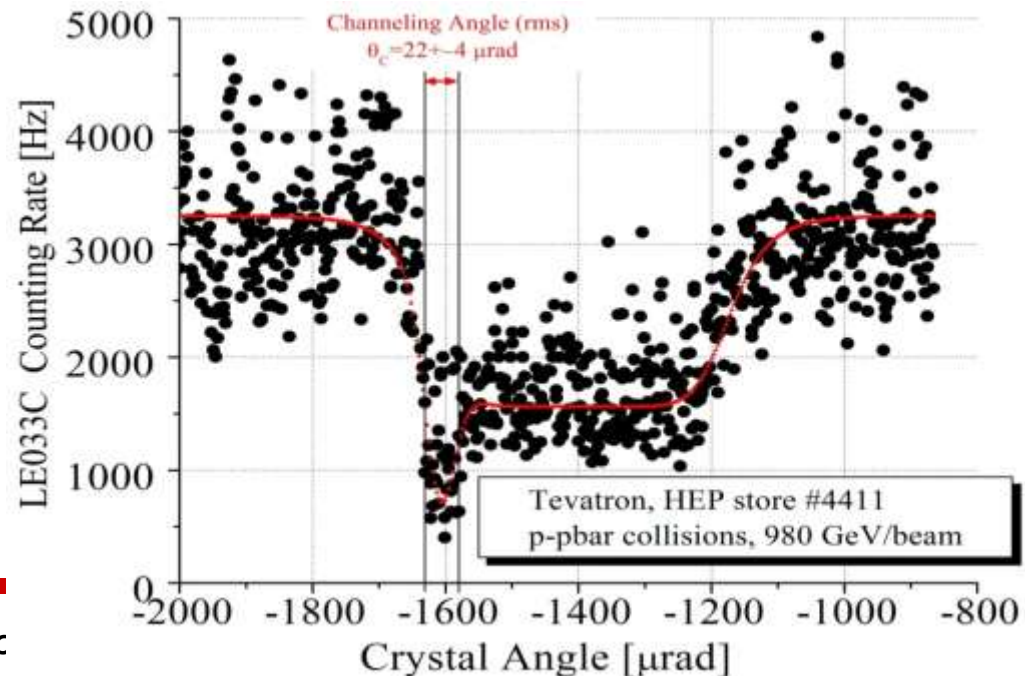
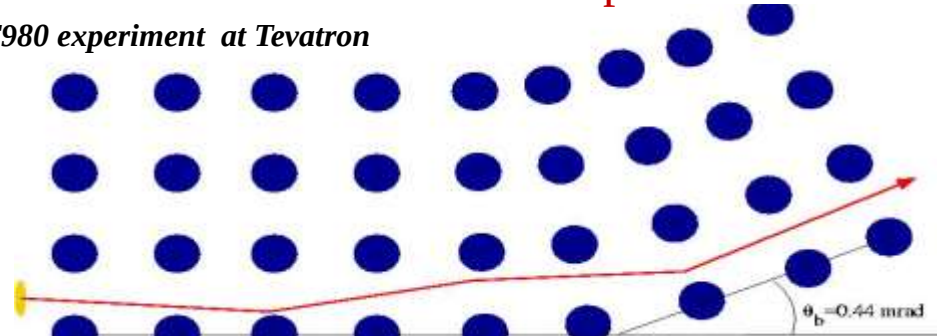


Вариант #3 : Плазма Кристаллов



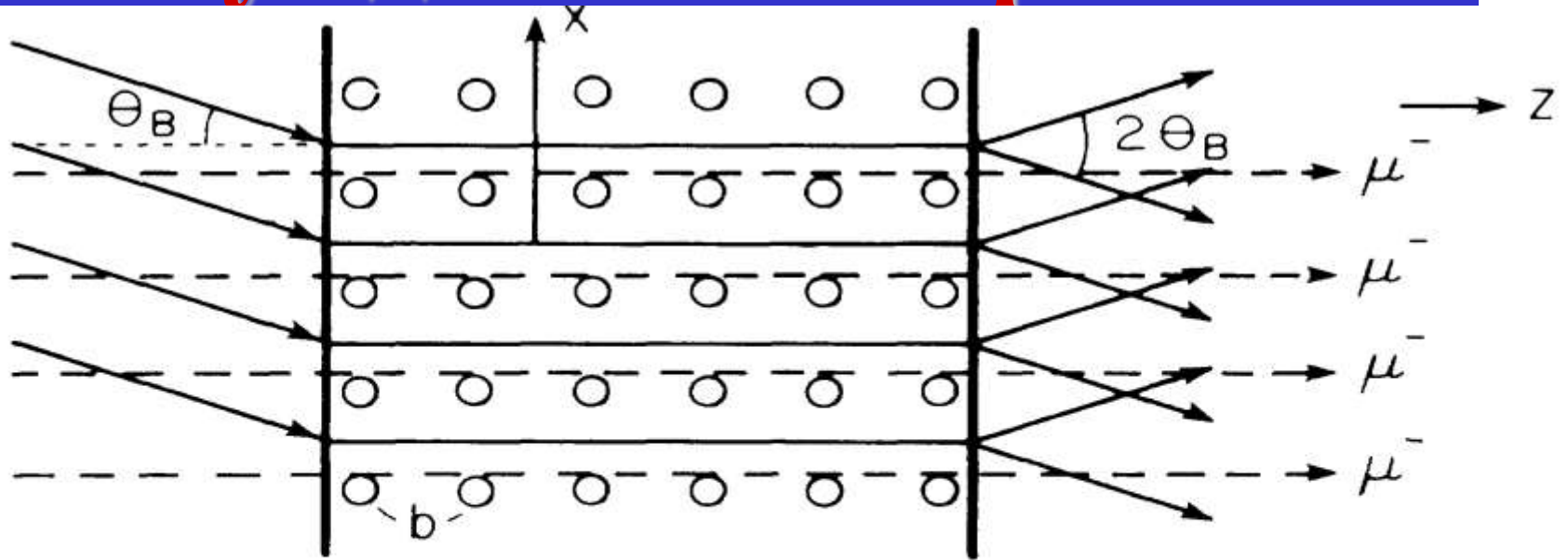
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[\frac{\text{GeV}}{e} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]} \\ 10^{22} \text{ cm}^{-3} \rightarrow 10 \text{ TV/m}, \lambda_p \sim 1 \text{ A}$$

T980 experiment at Tevatron



- Strong inter-planar electric fields $\sim 10 \text{ V/\AA} = 1 \text{ GV/cm}$
- Very stable, can be used for
 - deflection/bending (*works*)
 - focusing (*works*)
 - acceleration (*if excited*)

✳️ Возбуждение волн рентгеном



Tajima, Cavenago, Phys. Rev. Lett. 59 (1987), 1440

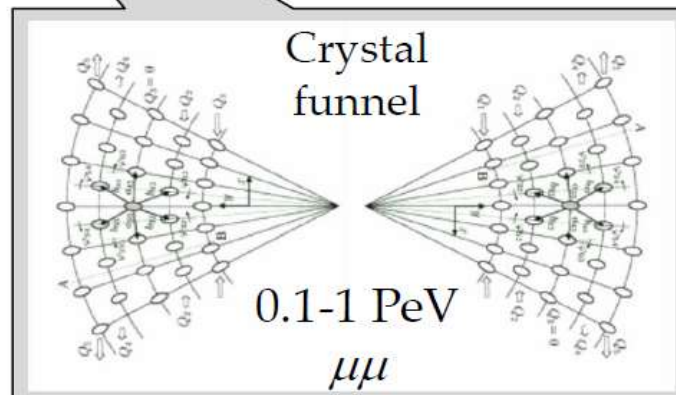
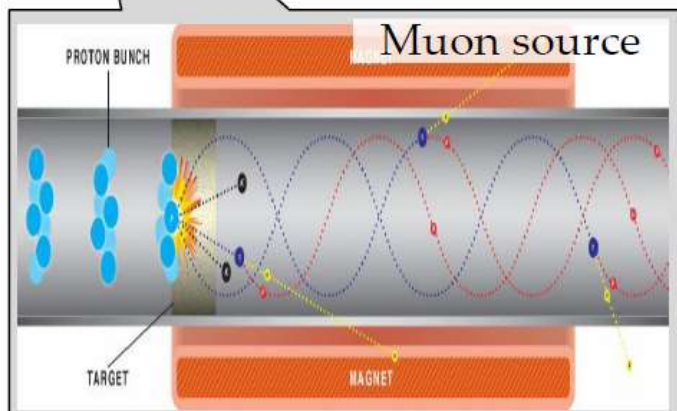
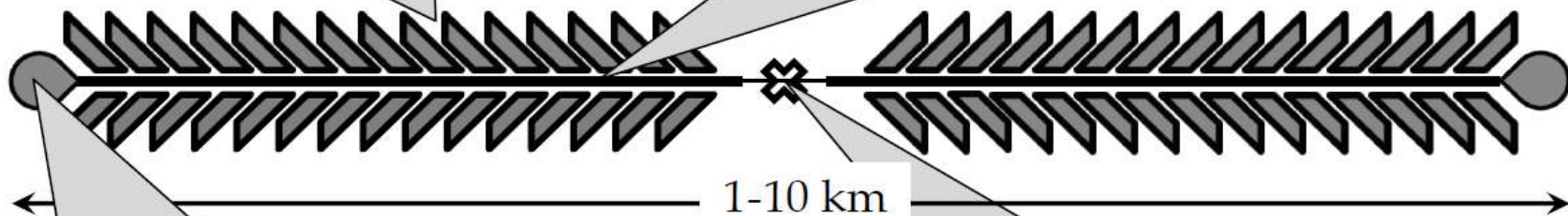
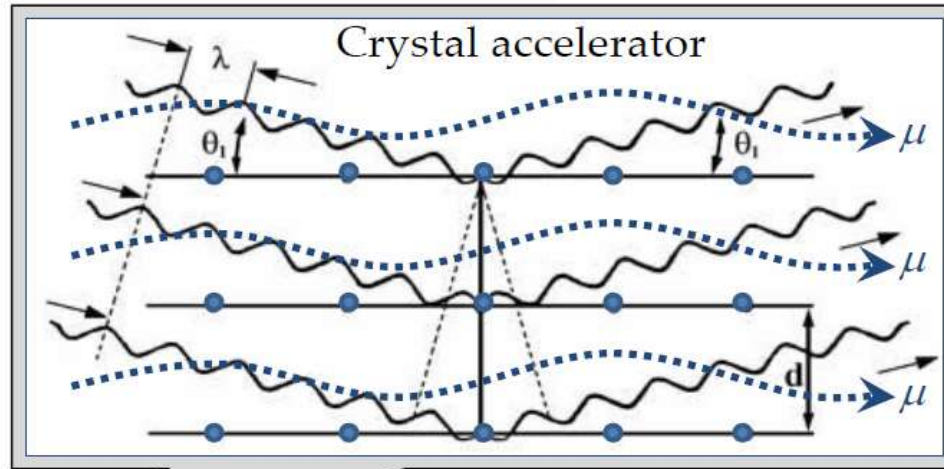
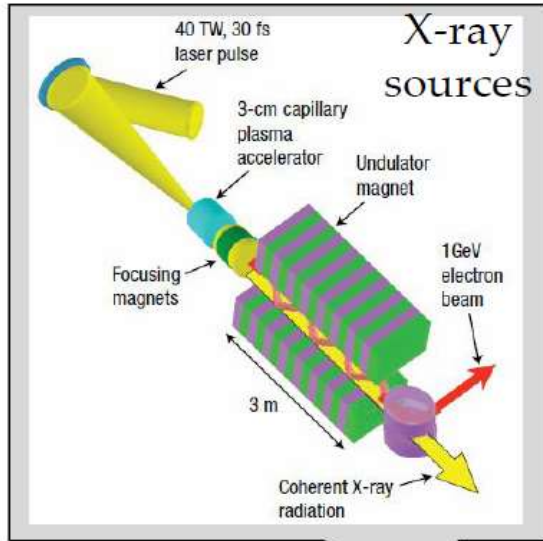
FIG. 1. Bormann anomalous transmission. When the x rays are injected at the Bragg angle, the Bormann effect takes place. Particle beams are injected along the crystal axis.

- Нужны яркие источники рентгена
 - now available from SASE FELs like LCLS
- Темп ускорения $> 1 \text{ ГэВ/см}$
- Мюоны - подходят
 - No bremsstrahlung, no nucl.
- μ^+ rad length 10^9 cm
 - total energy $\sim 10^9 \text{ GeV}$

Линейный $\mu^+\mu^-$ Коллайдер

1 PeV = 1000 TeV

$n_\mu \sim 1000$
 $n_B \sim 100$
 $f_{rep} \sim 10^6$
 $L \sim 10^{30-32}$





Заключение

- Метод встречных пучков (коллайдеры) прекрасно зарекомендовал себя за 50 лет – 29 машин построено, много открытий сделано, достигнуты энергии ~ 10 ТэВ (10 000 ГэВ)
- Примерно с середины 90-х годов прогресс замедлился из-за все большего размера, сложности и стоимости коллайдеров. Развитие ФЭЧ следующие ~ 20 лет будет определяться открытиями на БАК (LHC) и исследованиями на “малых” коллайдерах.
- Если заглянуть за 20-летний горизонт, то надо вписаться в ограничения: <10 млрд\$, <10 км, <10 МВт.
- Даже при этих условиях есть теоретические возможности достичь **100-1000 ТэВ**
 - Ускорение в кристаллах ~ 0.1 -10 ТВ/м; мюоны; небольшая светимость