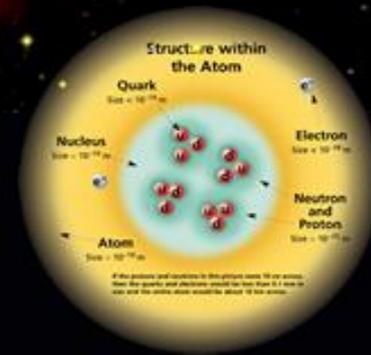
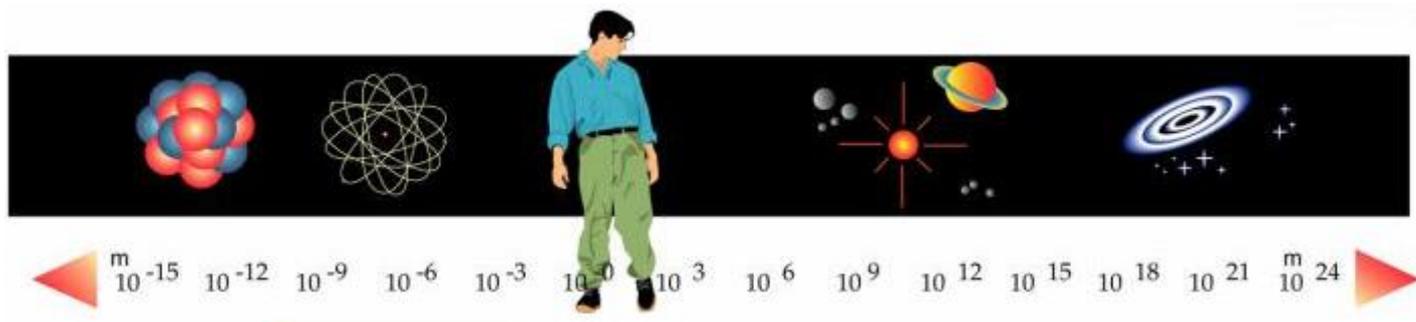


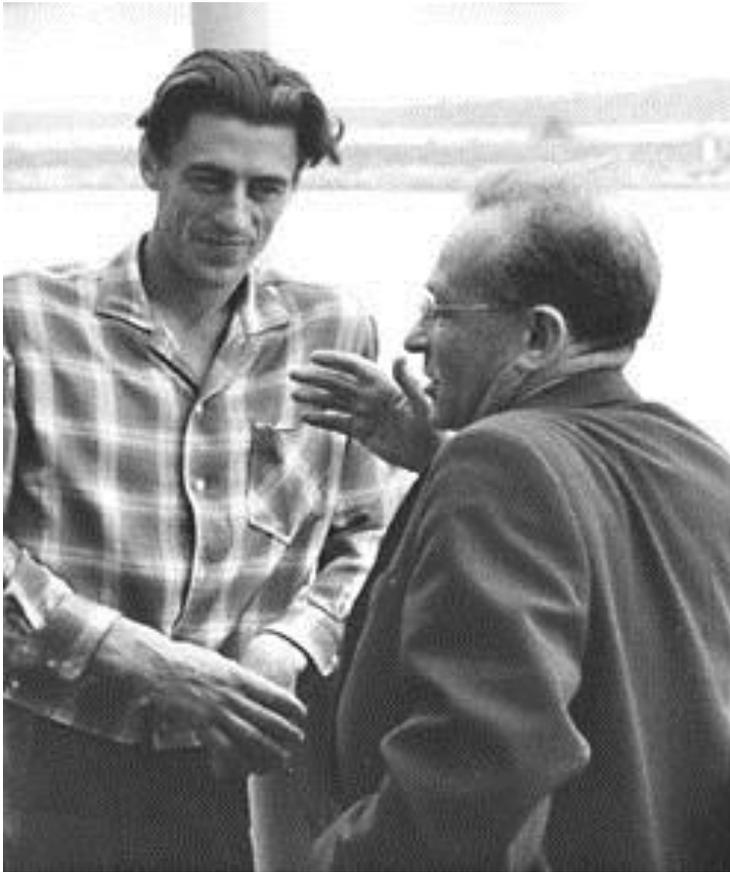


Микромир и Вселенная



УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ





В.И. Векслер и В.П. Саранцев
Дубна

**Владислав Павлович
САРАНЦЕВ**
1930 – 1995
начальник Отдела новых
методов ускорения
Объединенного института
ядерных исследований, Дубна

МГУ 1948 - 1953

1946 г. – образование НИИЯФ МГУ

1944 г. – 1-ая Памирская экспедиция ФИАН по инициативе Д.В.Скобельцына под руководством В.И.Векслера (под “крышей” Атомного проекта)

1946-47 гг. – создание Памирской высокогорной научной станции ФИАН на Восточном Памире (к.Чечекты) на высоте 3860 м (С.И.Вавилов, С.Н.Вернов, Д.В.Скобельцын, Н.А.Добротин)



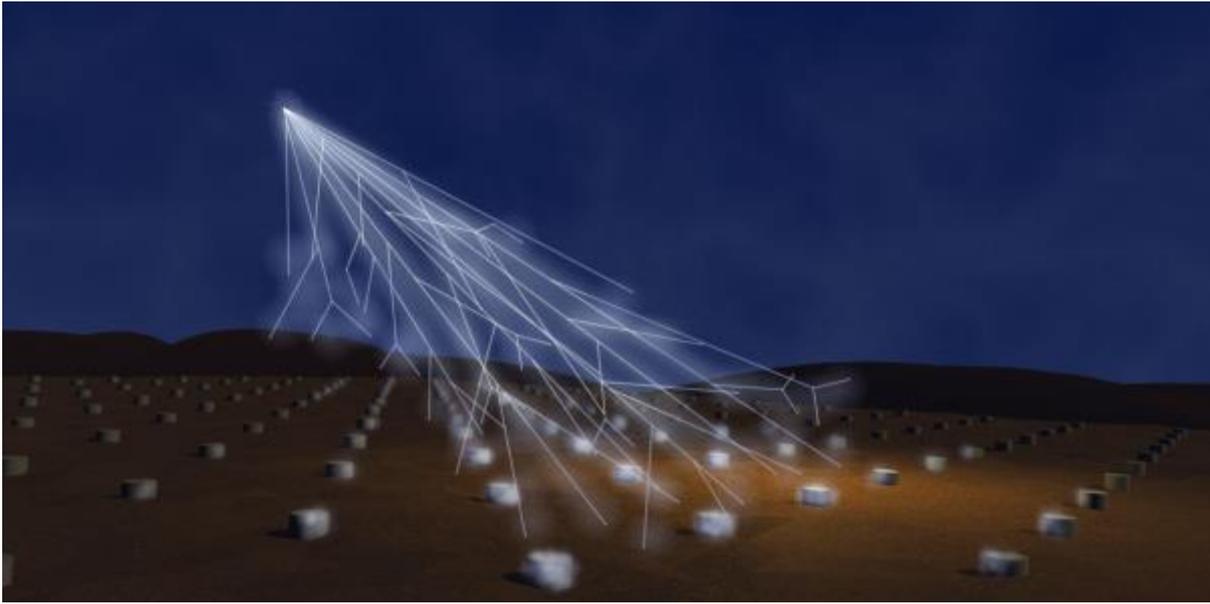
Слава
Саранцев,
1948 г



Стромынка, двор
общежития 1949



Космические лучи



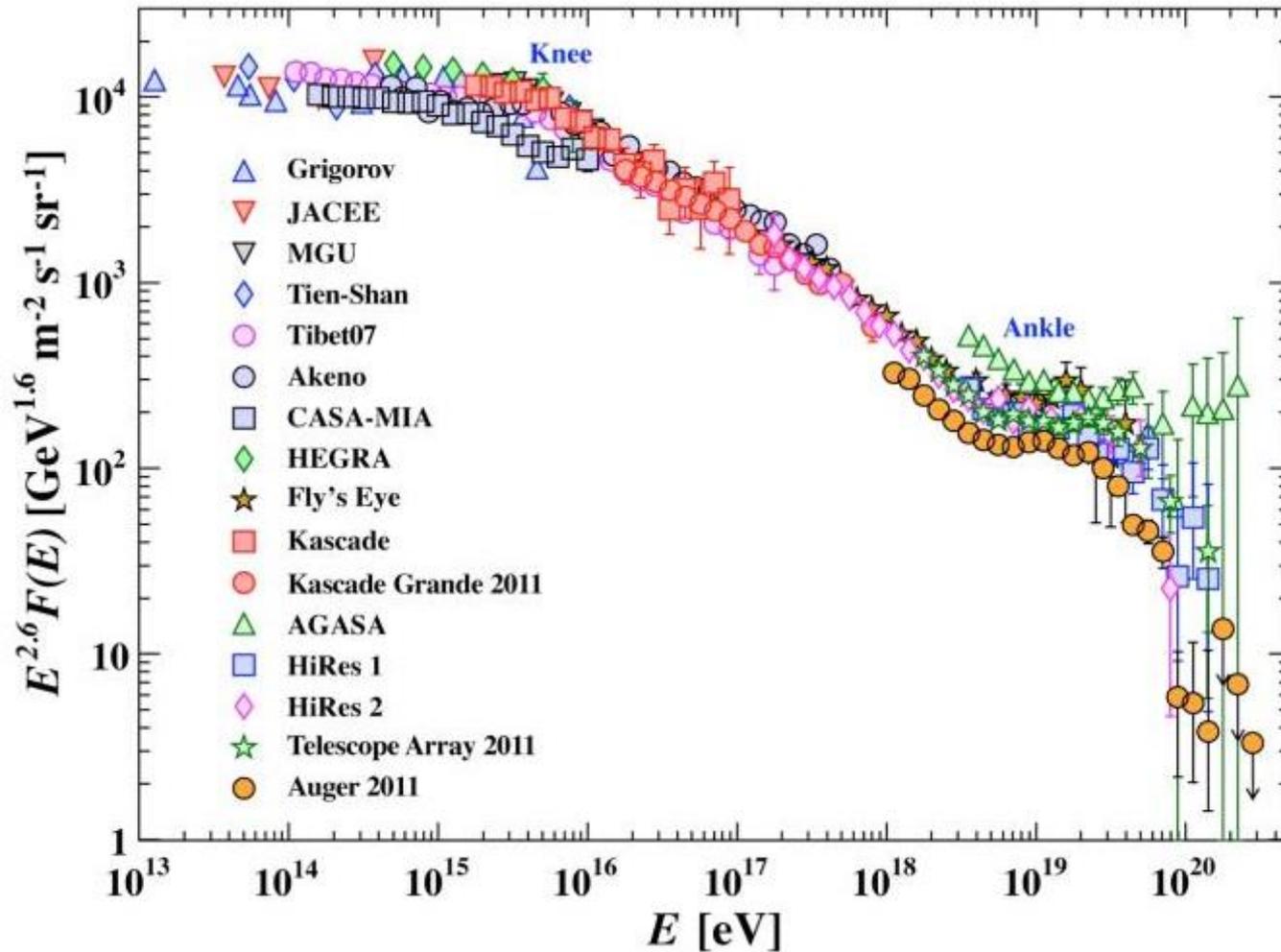
Рождение мюона в верхних слоях атмосферы

$$\Delta x = v \cdot \Delta t = 0.99c \cdot 2.2 \mu s = 6.5 \cdot 10^2 m \quad \text{— без учета СТО}$$

С учетом СТО: $\Delta t = \Delta \tau / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$.

$$\Delta x = \Delta t \cdot v = \Delta \tau \cdot v / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = 2.2 \mu s \cdot 0.99c / 0.14 = 4.7 \cdot 10^3 m$$

Космические лучи



Предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина $\approx 10^{20}$ эВ

МГУ 1948 - 1953

1946 г. – кафедра Д.И. Скобельцына по ядерным специальностям

1949 г. – кафедра ускорителей. Зав. кафедрой В.И. Векслер

1948 г. – принято решение о строительстве МГУ на Ленинских горах

1 сентября 1953 г – начало занятий на физическом факультете

1 – главное здание

2 – физический факультет

3 – химический факультет

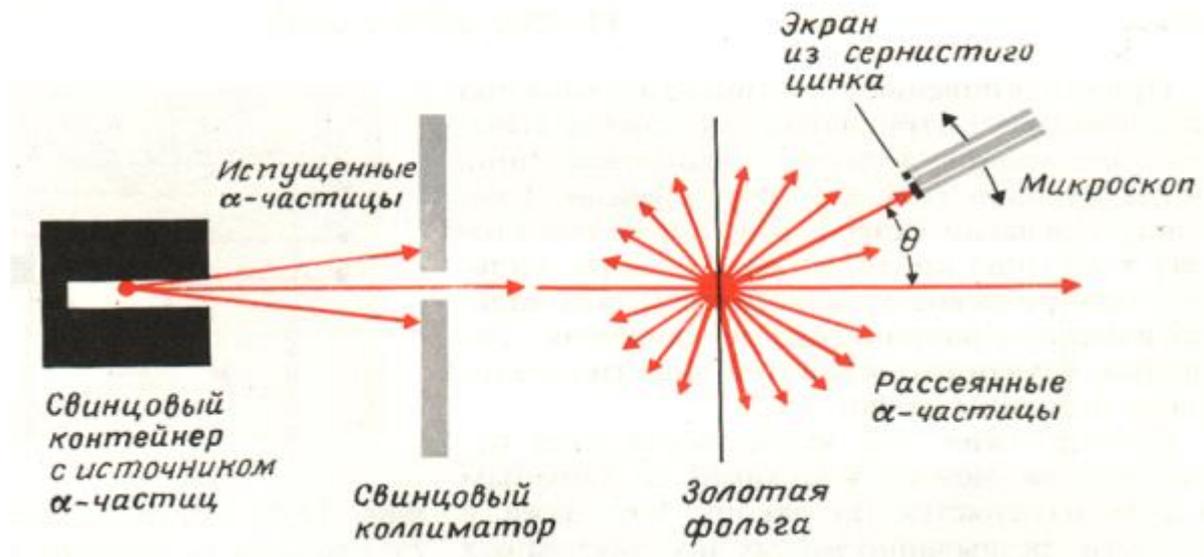
4 – НИВЦ

5 – НИИЯФ, ускорители

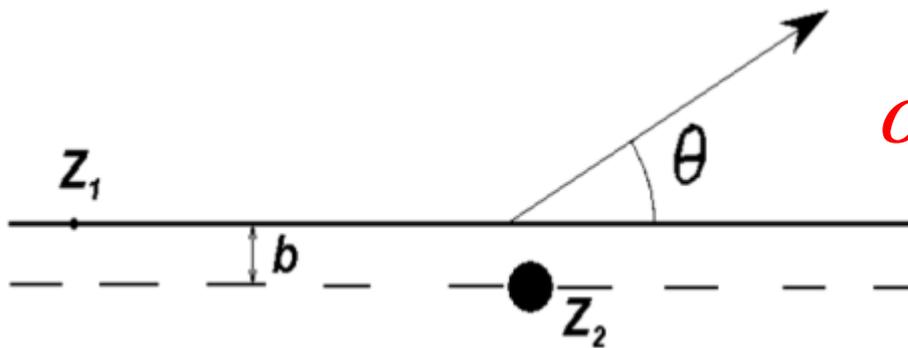
6 – корпус космических лучей

7 – институт механики





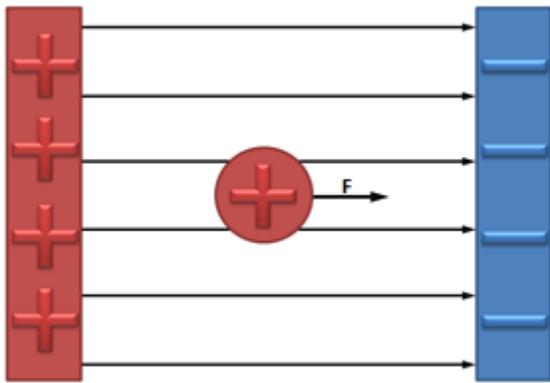
1911 г. Опыты по рассеянию α-частиц



$$T(\alpha) = 7,7 \text{ МэВ}$$

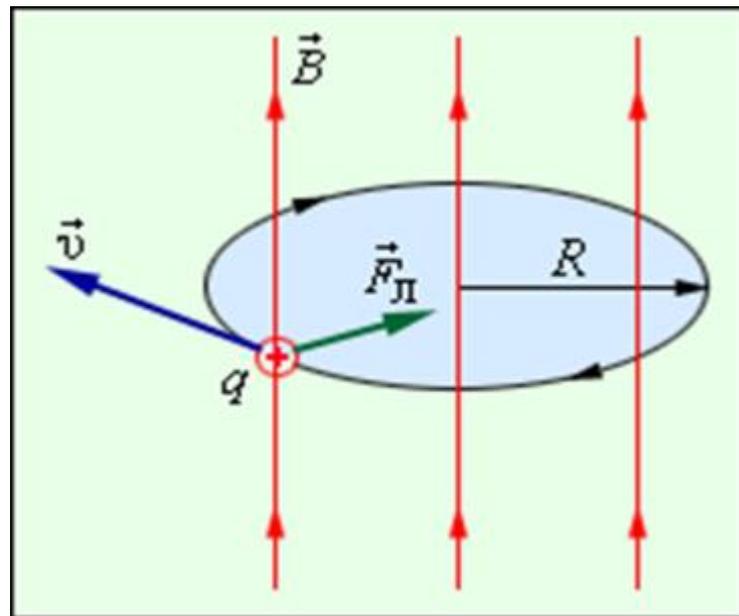
Движение частиц в электромагнитном поле

Электрическое поле



$$E_{\text{кин}} = q(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Магнитное поле



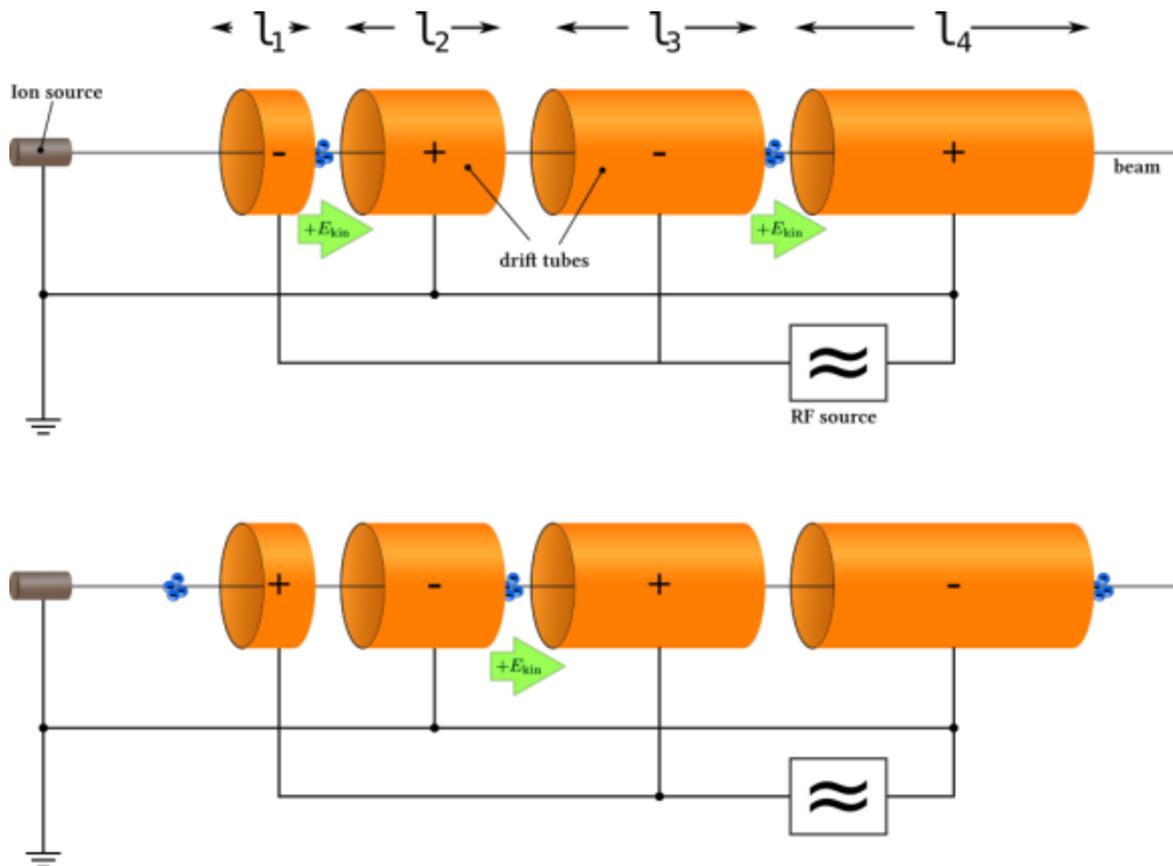
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Линейный ускоритель

1925 г. Г. Изинг Схема линейного ускорителя

1928 г. Р. Видероз Дрейфовая трубка

1946 г. Л. Альварец, В. Панофски Беркли, США ($E_{кин}(p) = 32$ МэВ)

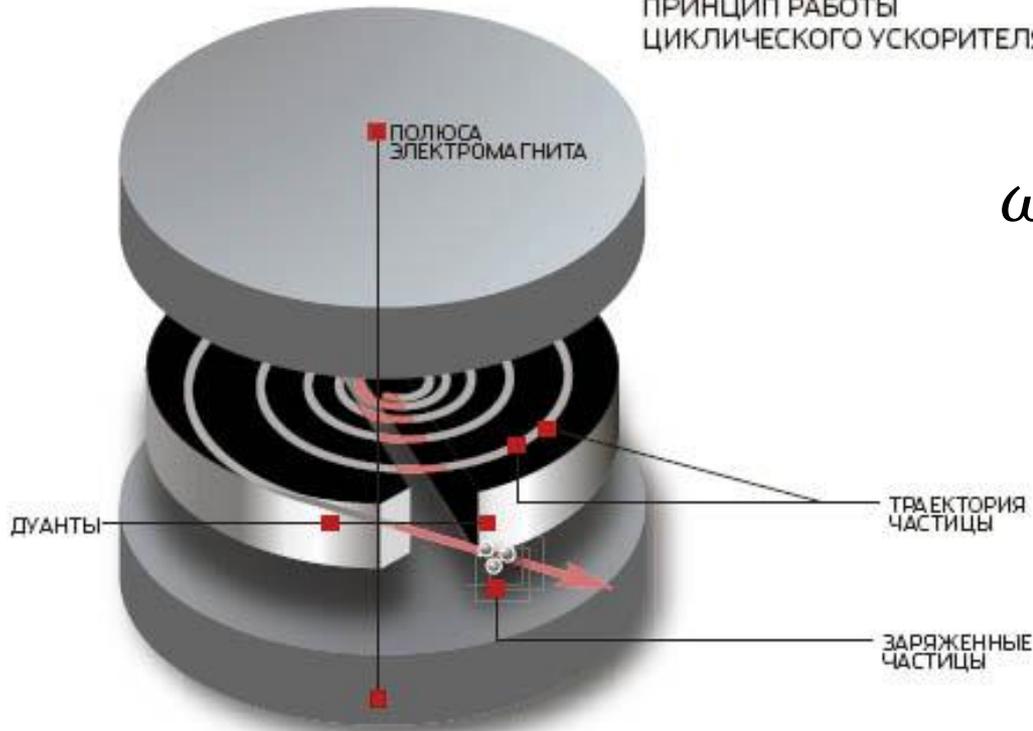


Циклотрон

1929 г. Э. Лоуренс предложил идею циклотрона

1932 г. $E_{кин}(p) = 1,2 \text{ МэВ}$ ($D = 25 \text{ см}$)

ПРИНЦИП РАБОТЫ
ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ



$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{qB}{mv} = \frac{qB}{m}$$

Максимальная кинетическая энергия протонов

$E_{кин}(p) = 22 \text{ МэВ}$ (1939 г.)

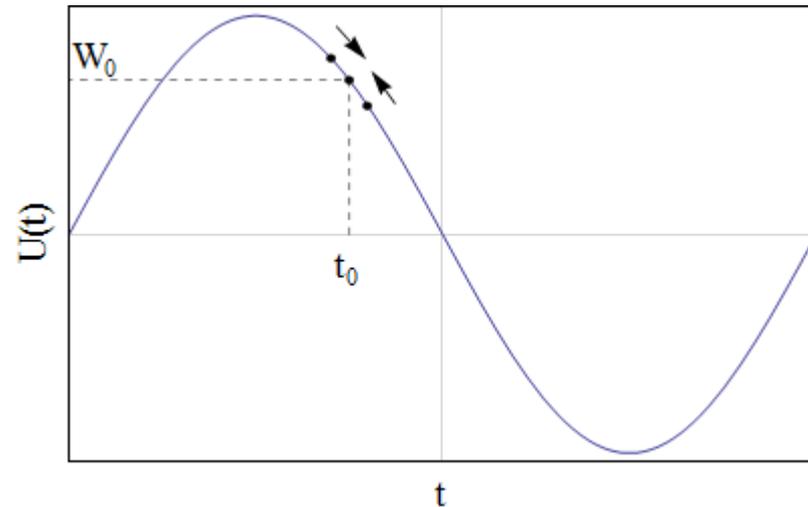
Угловая скорость движения заряженной частицы по круговой траектории называется **циклотронной частотой**. Циклотронная частота не зависит от скорости (следовательно, и от кинетической энергии) частицы.

Принцип автофазировки

1944 г. В. Векслер , Принцип автофазировки
1945 г. US patent 2615129, Edwin McMillan,
«Synchro-Cyclotron», issued 1952-10-21



В.И. Векслер, Э. Макмиллан 1963 г.



Синхроциклотрон

1947 г. Синхротрон
электроны 30 МэВ,
ФИАН, Москва

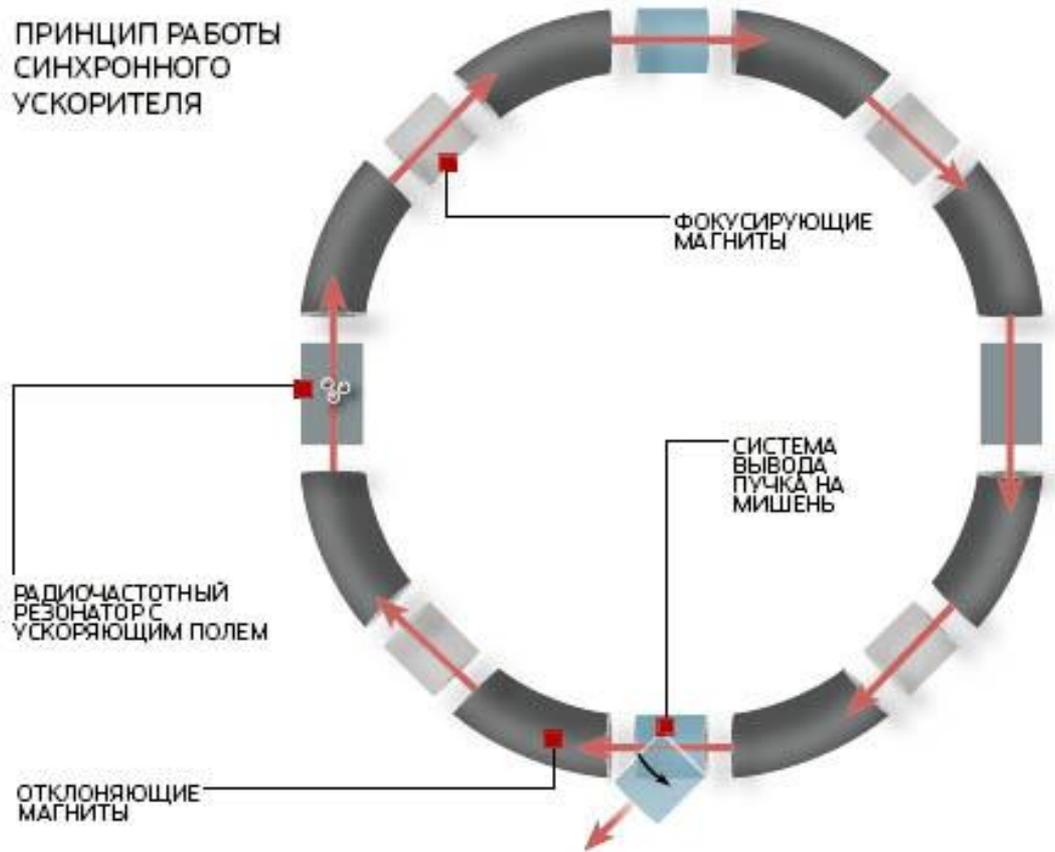
1949 г. Фазотрон
протоны 680 МэВ,
Дубна, СССР

1953 г. Космотрон
протоны 3,3 ГэВ,
Беркли, США

.....

1957 г. Синхрофазотрон
Протоны 10 ГэВ
Дубна, ОИЯИ

ПРИНЦИП РАБОТЫ
СИНХРОННОГО
УСКОРИТЕЛЯ



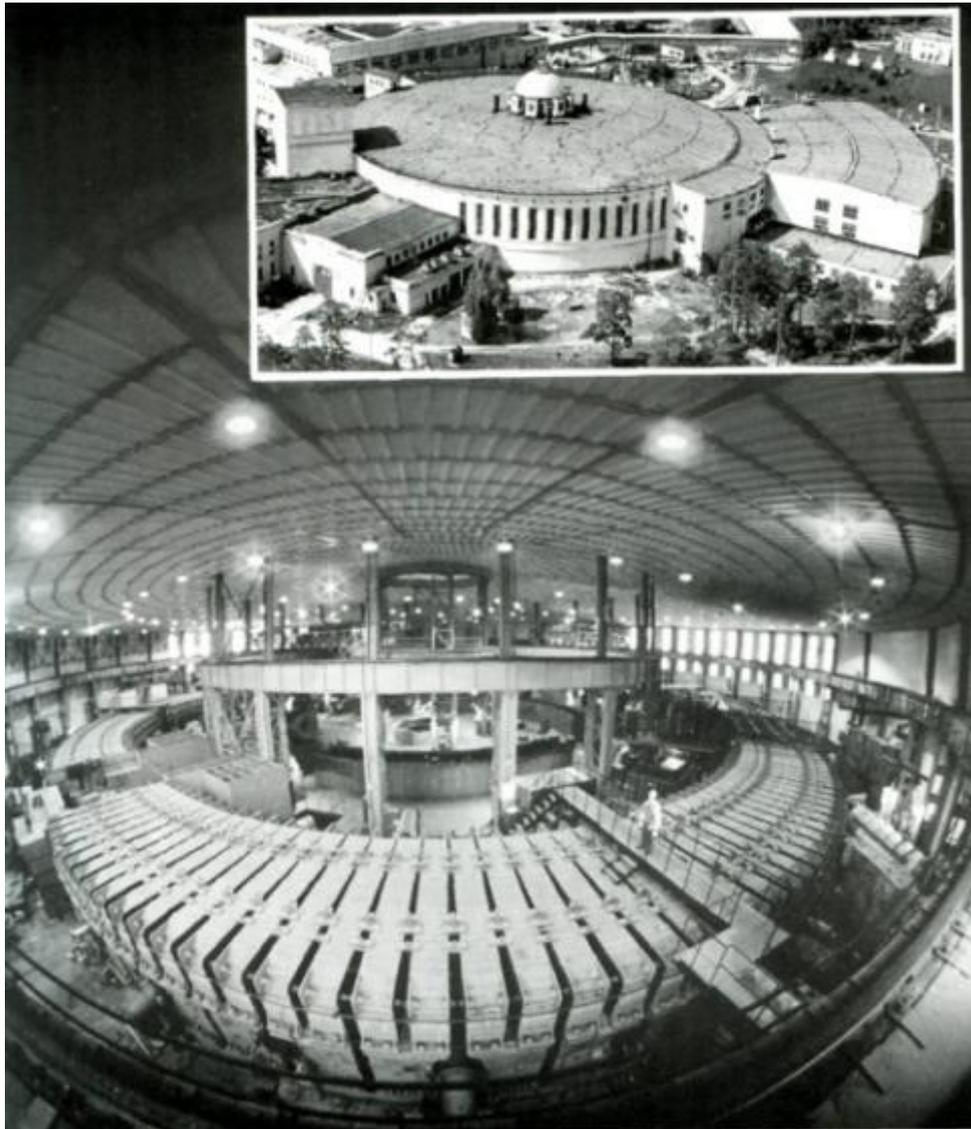
Синхрофазотрон



В. Саранцев, Л. Зиновьев, С. Есин 1956 г

- 1954** Строительство синхрофазотрона на 10 ГэВ под руководством В.И. Векслера. (руководители смен: С.Есин, В. Саранцев, К. Мызников)
- 1957** Достигнута проектная энергия протонов 10ГэВ.
- 1957 – 1961** Создание нового инжектора - линейного ускорителя протонов, позволившего существенно поднять интенсивность пучка синхрофазотрона. (рук. В.П. Саранцев)

Синхрофазотрон



Объединенный институт
ядерных исследований,
Дубна, СССР

$$E(p) = 10 \text{ ГэВ} = 10^{10} \text{ эВ}$$

Диаметр магнита	60 м
вес магнита	36 000 т

	E (p) макс	Диаметр	Вес магн.	Ток	Частота
Циклотрон	~ 10 МэВ	1 – 1,5 м	10 – 100 т	100 мА	10 ⁷ имп/сек
Фазотрон	~900 МэВ	5 – 7 м	1 000 т	1 мкА	100 имп/сек
Синхрофазотрон	10 ГэВ	60 м	36 000 т	10 ⁻³ мкА	1 имп в 12 сек

Э. Ферми: «При имеющемся соотношении между максимальной энергией частиц и размерами ускорителя для получения частиц с энергией 10¹⁶ эВ придется построить ускоритель с диаметром, равным диаметру земного шара»

Э. Лоуренс: «И его интенсивность будет один протон в сутки»

В.И. Векслер Доклад на общем собрании АН СССР 27 марта 1958 г.

Коллективные методы ускорения



В. И. Векслер. 50-е годы

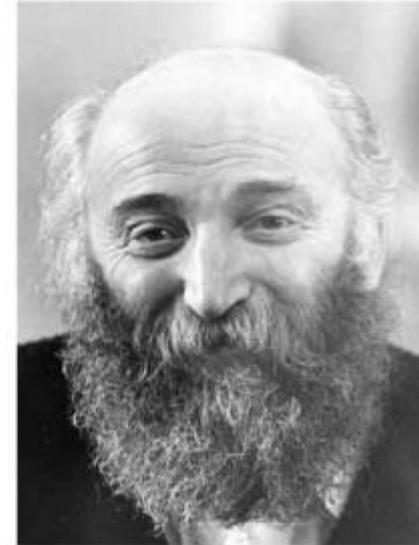
В.И. Векслер
1907-1966

Когерентные
методы
ускорения



Я.Б. Файнберг
1918-2005

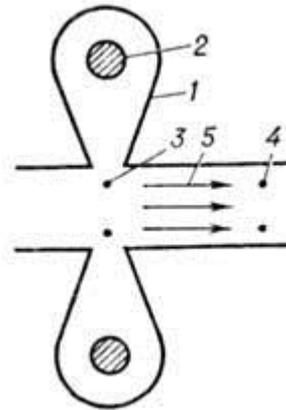
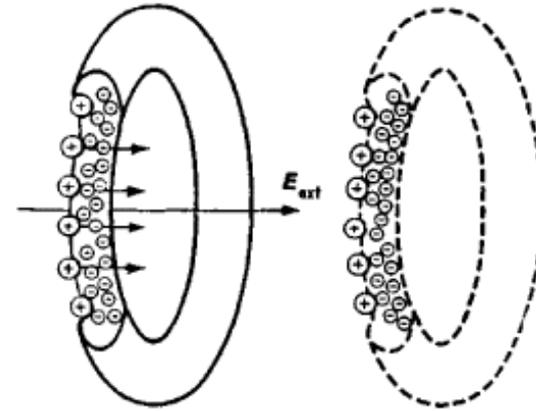
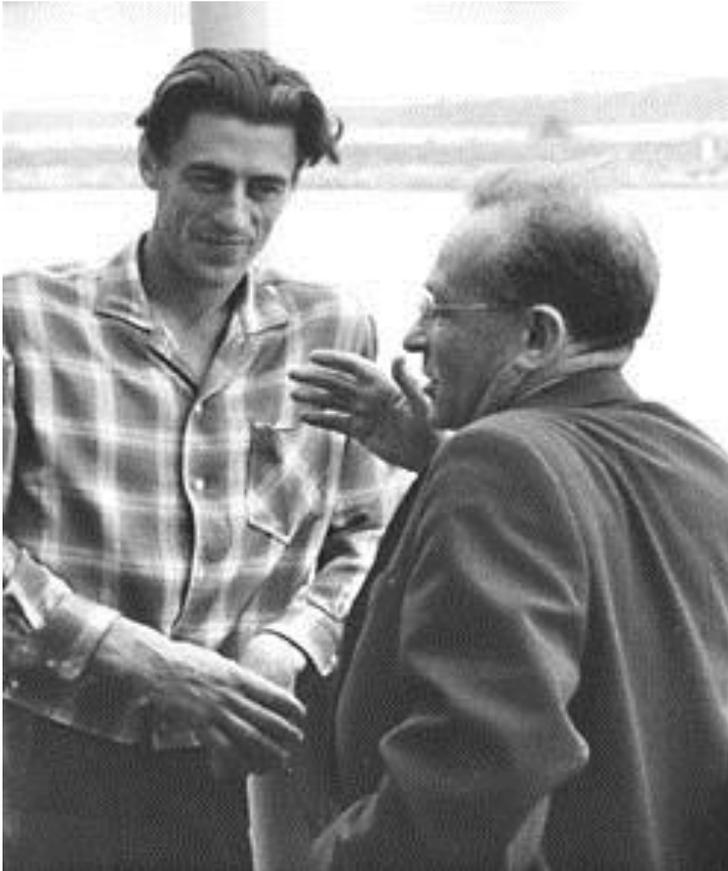
Плазменный
волновод



Г.И. Будкер
1918-1977

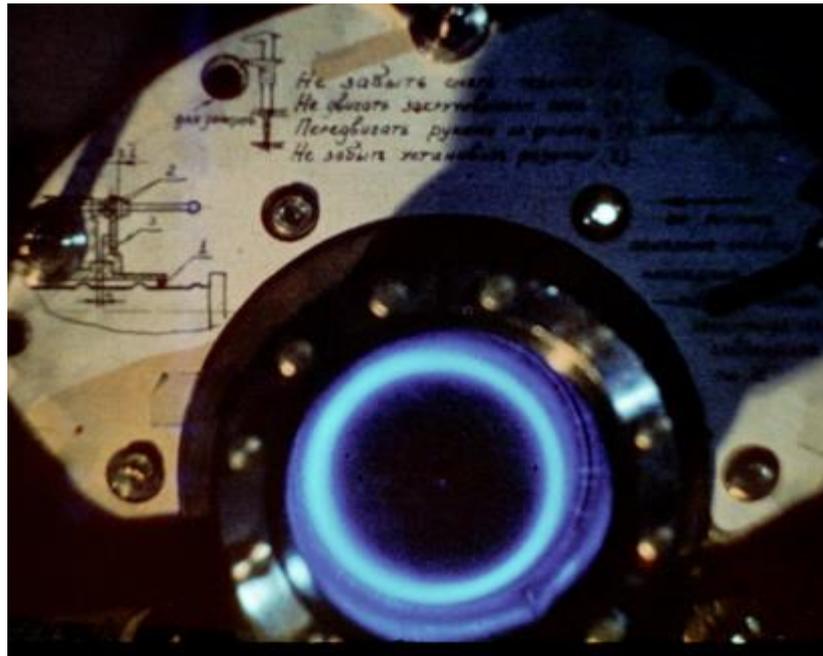
Релятивистская
стабилизация
пучка

Коллективные методы ускорения



Ускорение электронными кольцами:
1 - адгезатор;
2 - сечение кольца электронов до сжатия;
3 - сжатое электронное кольцо;
4 - ускоренное электрон-ионное кольцо;
5 - ускоряющее поле

Параметры электронных колец КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ (ДУБНА, ОИЯИ)

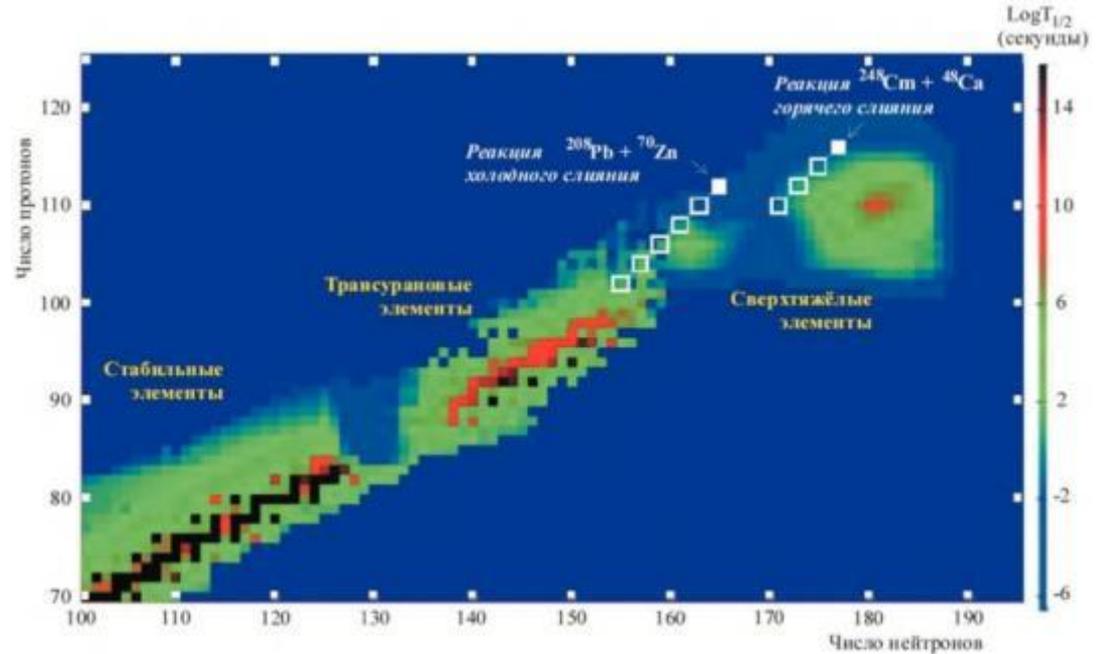


- Число электронов в кольце – 10^{13}
- Радиус кольца – 3 – 4 см
- Энергия электронов – 20 МэВ
- Число ионов азота в кольце – $5 \cdot 10^{11}$
- Энергия ускоренных ионов – 1.5 – 2 МэВ/нукл

Тяжелые ионы



Г.Н. Флеров и В.П. Саранцев,
«Дубна» Алушта, Крым



Ускорительный комплекс У400 (циклотрон)
Запущен в 1979 году

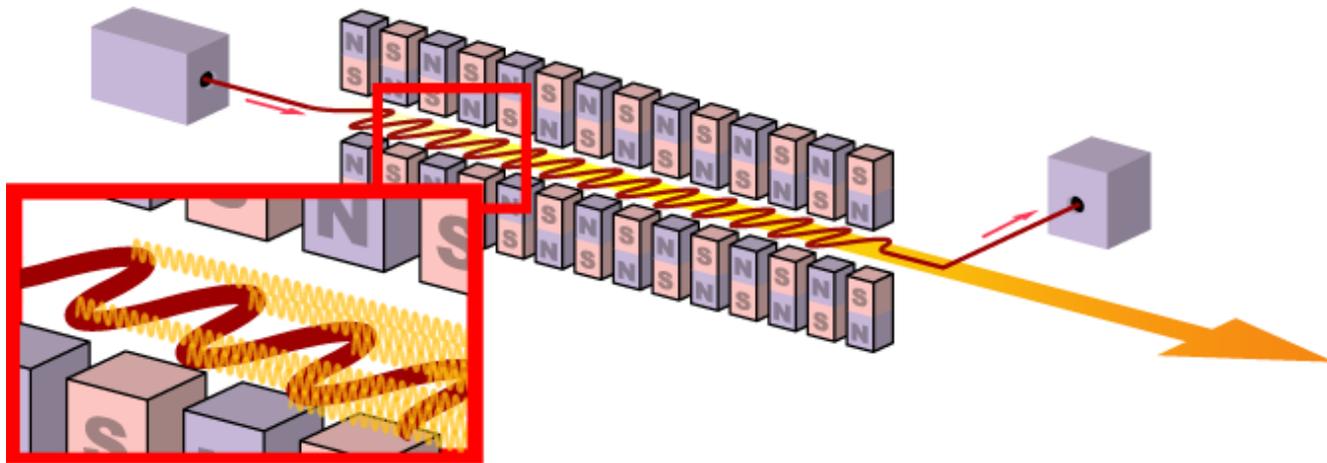
Пучки ускоренных ионов $A = 4 - 209$
с энергией $3 - 29$ МэВ/нуклон
Магнит 2100 тонн, диаметр 4 м



Лазеры на свободных электронах

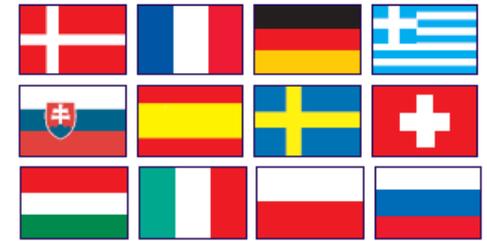
1971 г. – Джон М. Дж. Мэйди. (Стенфорд)
Проект лазера на свободных электронах

1980 г. – Е. Салдин и др. (Новосибирск)
Расчет вигглеров (магнитной системы)





Проект XFEL

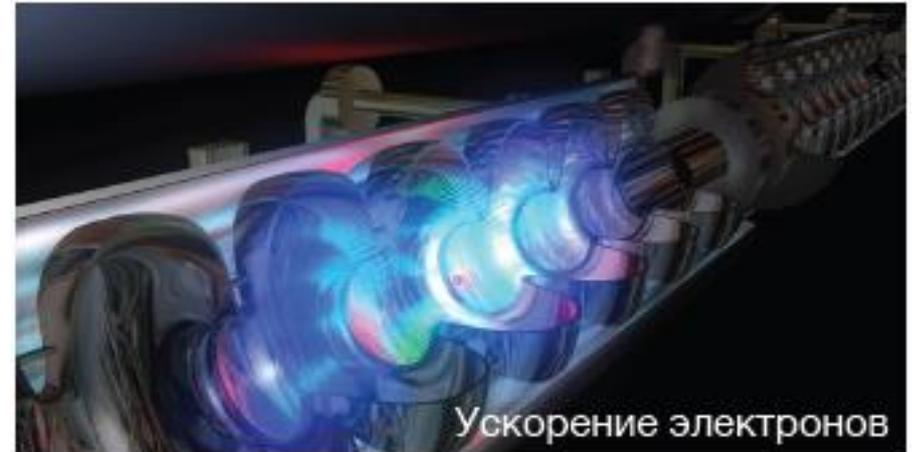


XFEL – рентгеновский лазер
на свободных электронах

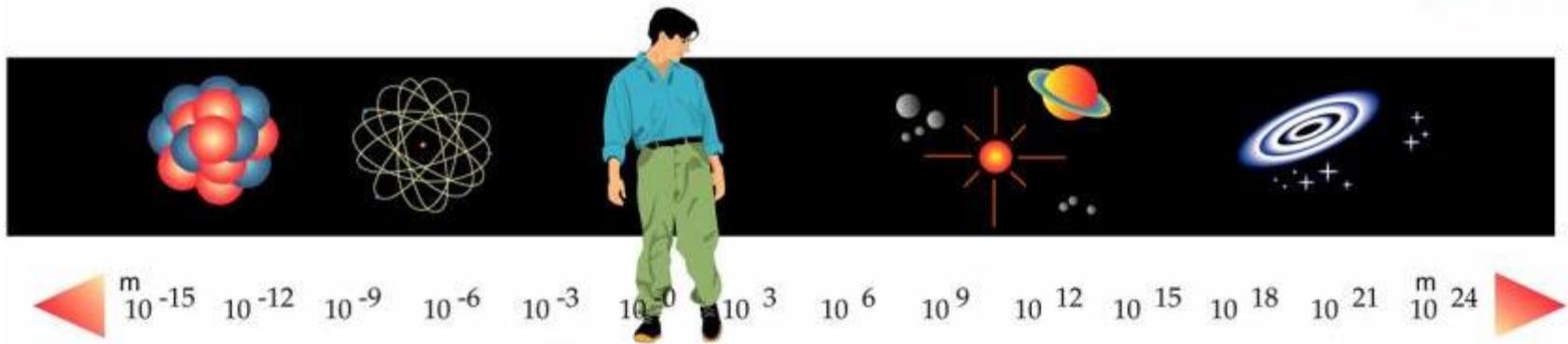
Общая длина: 3.4 км
Глубина тоннеля: от 6 до 38 м

Ускоритель: LINAC 1.7 км,
 $E(e) = 10 - 17,5$ ГэВ

Вспышки:
Частота: 27 000 в секунду
Длина волны: 0.05 – 6 нм
Длительность: $<100 \cdot 10^{-15}$ сек
Яркость в пике -- $5 \cdot 10^{33}$ (фотонов / сек / мм² / мрад² / 0,1% BW).



Эра больших машин



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta x \approx \frac{\hbar c}{2E} \approx \frac{200 \text{ МэВ} \cdot \text{ФМ}}{2E}$$

$$E \approx \frac{\hbar c}{2\Delta x} \approx \frac{200 \text{ МэВ} \cdot \text{ФМ}}{2\Delta x}$$

Нуклон $\Delta x \sim 1 \text{ ФМ} \leftrightarrow E_e \sim 100 \text{ МэВ}$
 $E \sim 100 \text{ ГэВ} \leftrightarrow \Delta x \sim 10^{-3} \text{ ФМ} = 10^{-18} \text{ м}$
 $E \sim 10 \text{ ТэВ} \leftrightarrow \Delta x \sim 10^{-5} \text{ ФМ} = 10^{-20} \text{ м}$

Встречные пучки

4-х вектор:

$$X = (ct, x, y, z)$$

$$V = \gamma(c, v_x, v_y, v_z)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$P = (E/c, p_x, p_y, p_z)$$

Интервал:

$$X^2 = (ct)^2 - (\vec{r})^2 = \tau^2$$

$$V^2 = \gamma^2(c^2 - (\vec{v})^2) = c^2$$

$$P^2 = (E/c)^2 - (\vec{p})^2 = (mc)^2$$
$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

$$E = mc^2$$

Встречные пучки

$$a + b \rightarrow M$$

$$(E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 = M^2$$

Неподвижная мишень



$$(E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a)^2 = M^2$$
$$m_a^2 + m_b^2 + 2m_b E_a = M^2$$

Встречные пучки ($m_a = m_b$)



$$M^2 = (E_a^* + E_b^*)^2$$
$$M^2 = 4E^{*2}$$

$$E_a = \frac{2E^{*2}}{m} - m$$

Встречные пучки

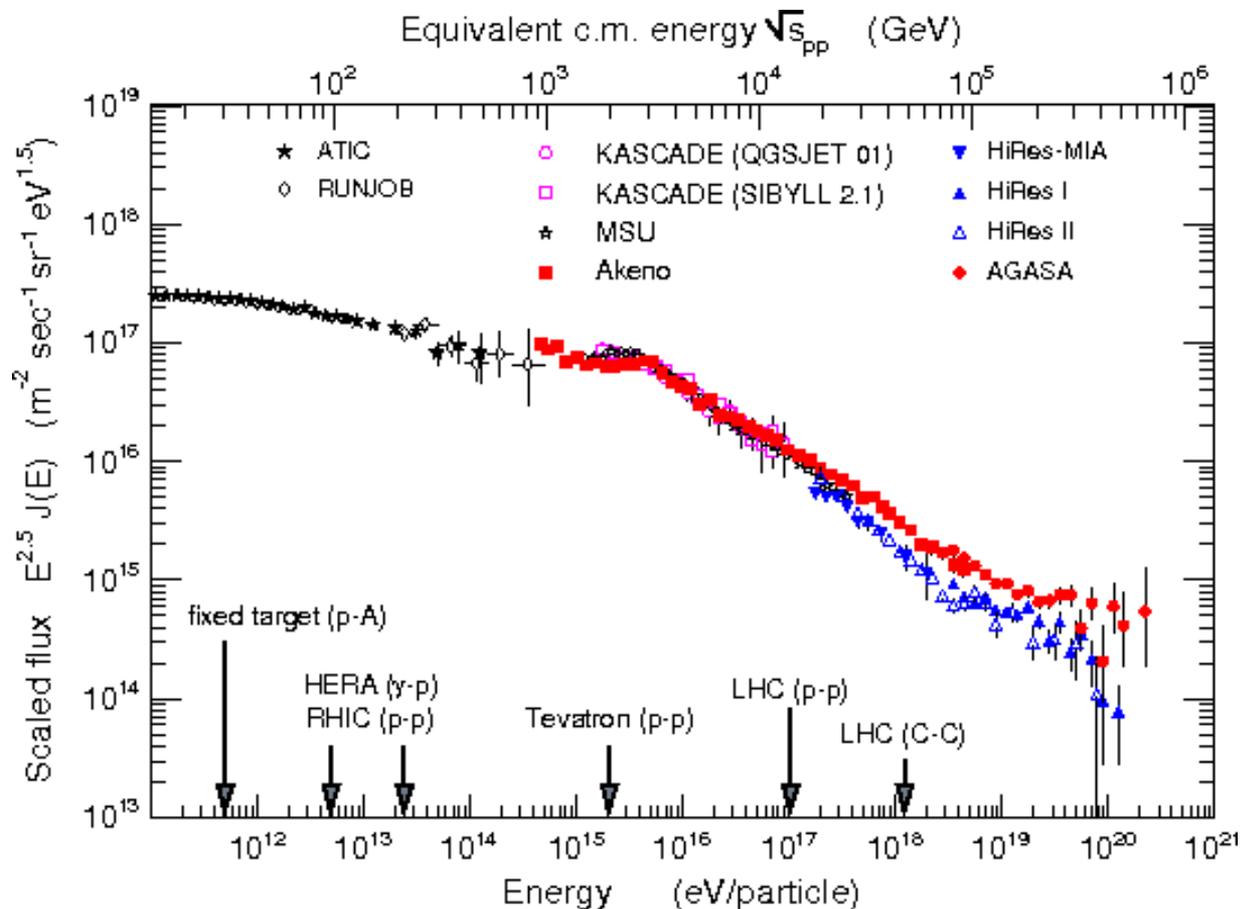
$$E_a = \frac{2E^{*2}}{m} - m$$

Большой адронный коллайдер (LHC): $p + p$

$$E^* = 7 \text{ ТэВ} = 7 \cdot 10^3 \text{ ГэВ} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} E_a &\approx \frac{2 \cdot 49 \cdot 10^6 \text{ ГэВ}^2}{1 \text{ ГэВ}} - 1 \text{ ГэВ} = \\ &= 10^8 \text{ ГэВ} = 10^5 \text{ ТэВ} = 10^{17} \text{ эВ} \end{aligned}$$

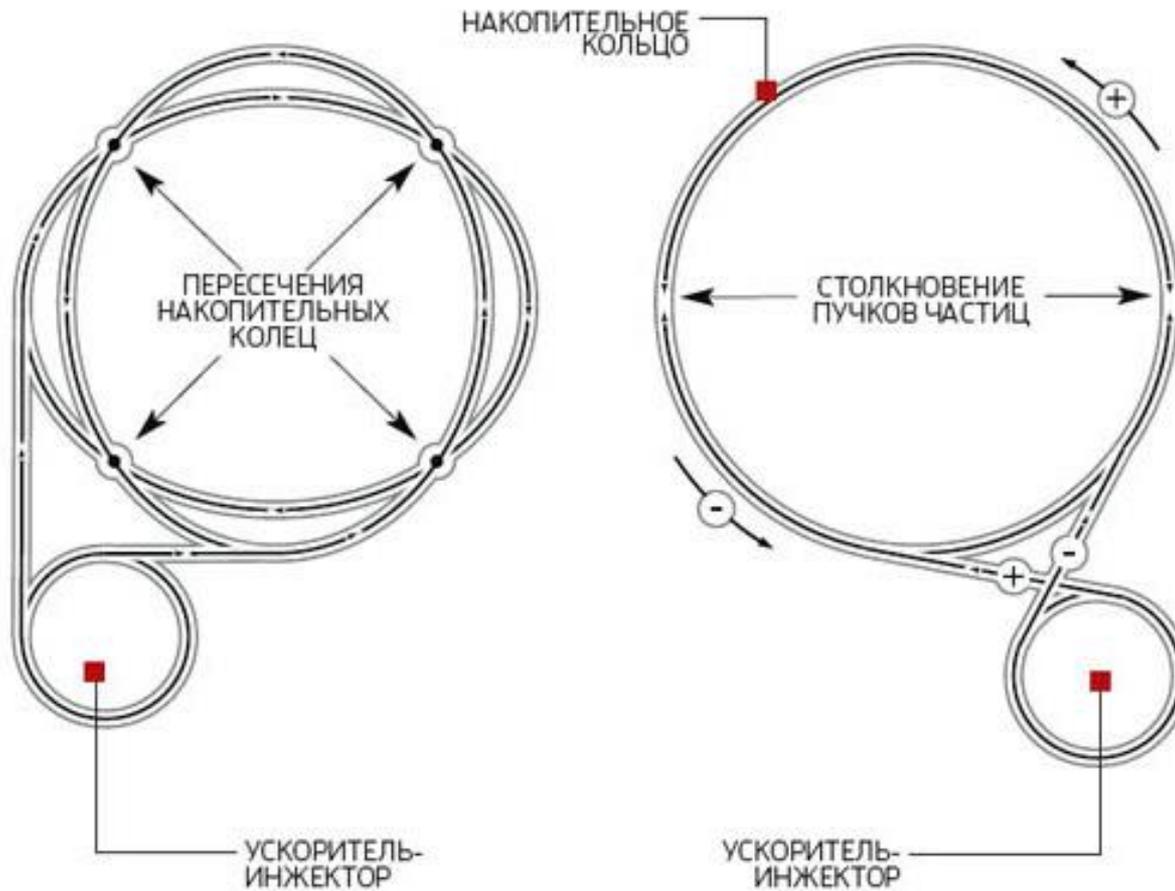
Встречные пучки Vs. Космические лучи



Встречные пучки

Коллайдер	Лабор.	Пучки	Энергия (max)	Светимость, см ⁻² сек ⁻¹	Периметр, км
LEP	CERN	$e^+ + e^-$	104,5 + 104,5 (ГэВ)	10^{32}	26,7
HERA	DESY	$e^- + p$	27,5 + 920 (ГэВ)	$0,75 \times 10^{32}$	6,3
RHIC	BNL	$p + p$ Au+Au	250 +250 (ГэВ) 100 + 100 (ГэВ/u)	$1,6 \times 10^{32}$ 30×10^{26}	3,8
TEVATRON	FNL	$p + \bar{p}$	980 +980 (ГэВ)	4×10^{32}	6,86
LHC	CERN	$p + p$ Pb+Pb	7 +7 (ТэВ) 2,8 +2,8 (ТэВ/ u)	10^{34}	26,7
УНК	Протвино	$p + p$	3 + 3 (ТэВ)	Cancelled 1992	21
SSC	Texas	$p + p$	20 + 20 (ТэВ)	Cancelled 1993	80

Встречные пучки



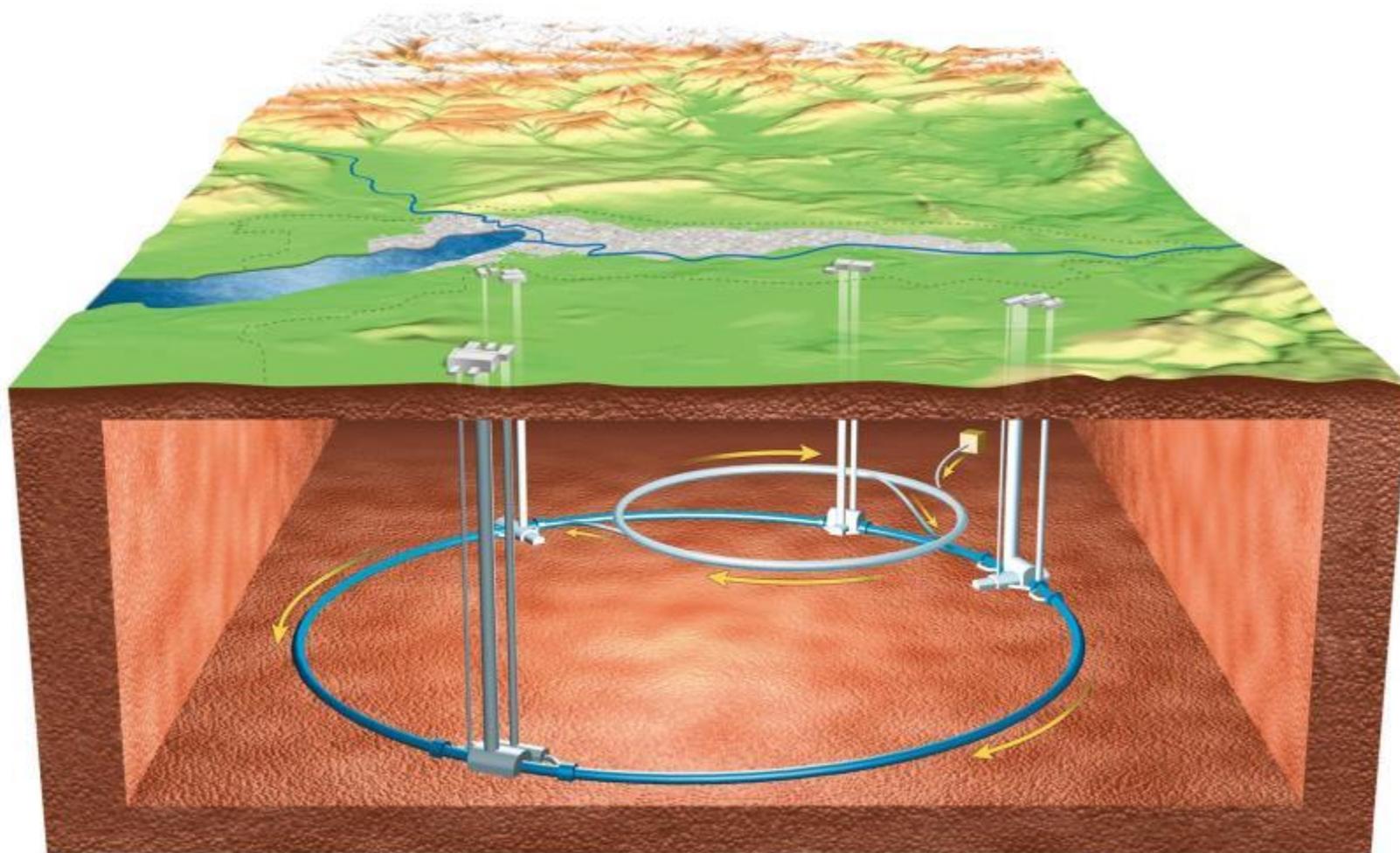


CERN - ЦЕРН

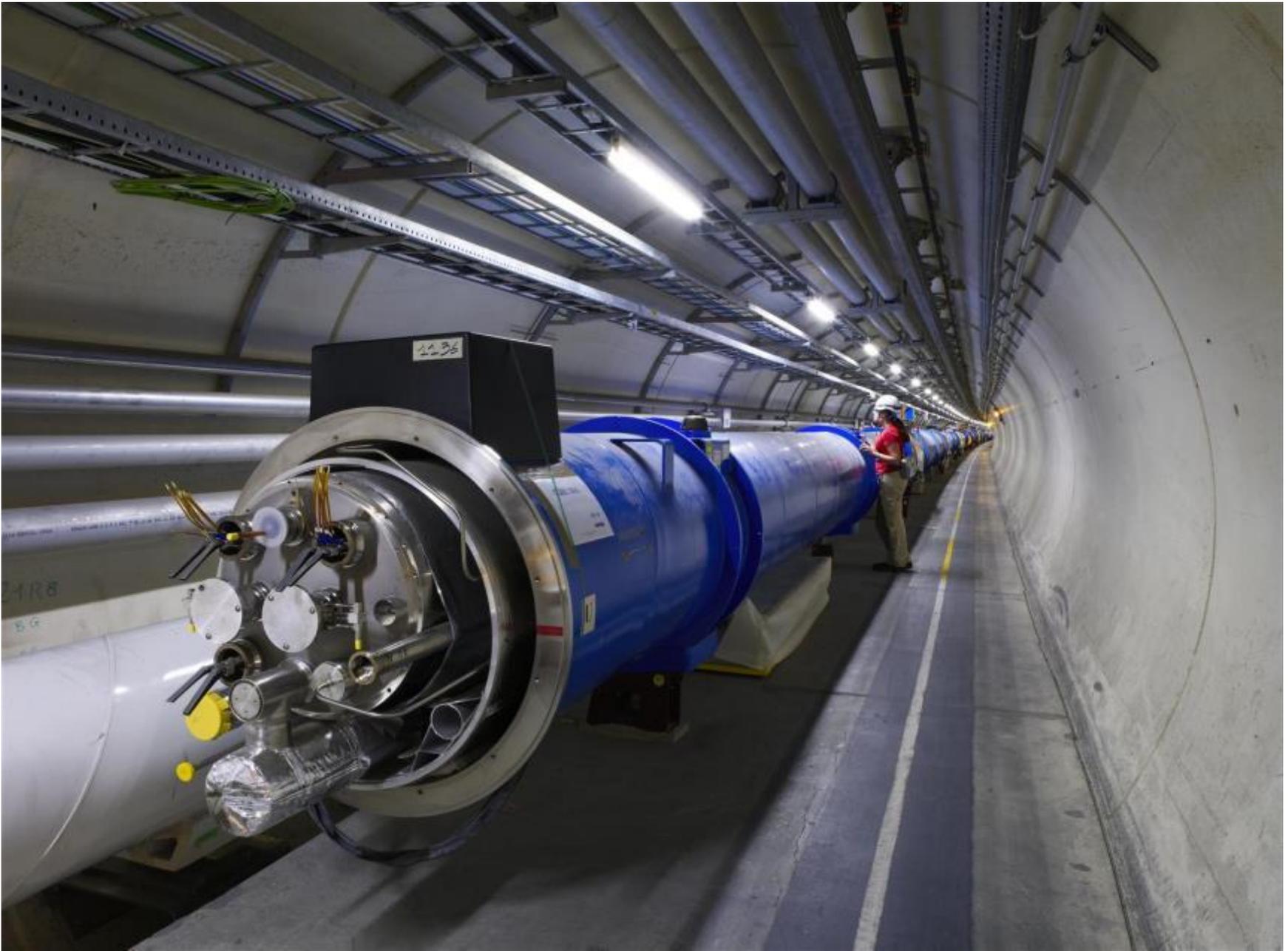
Европейская организация ядерных исследований

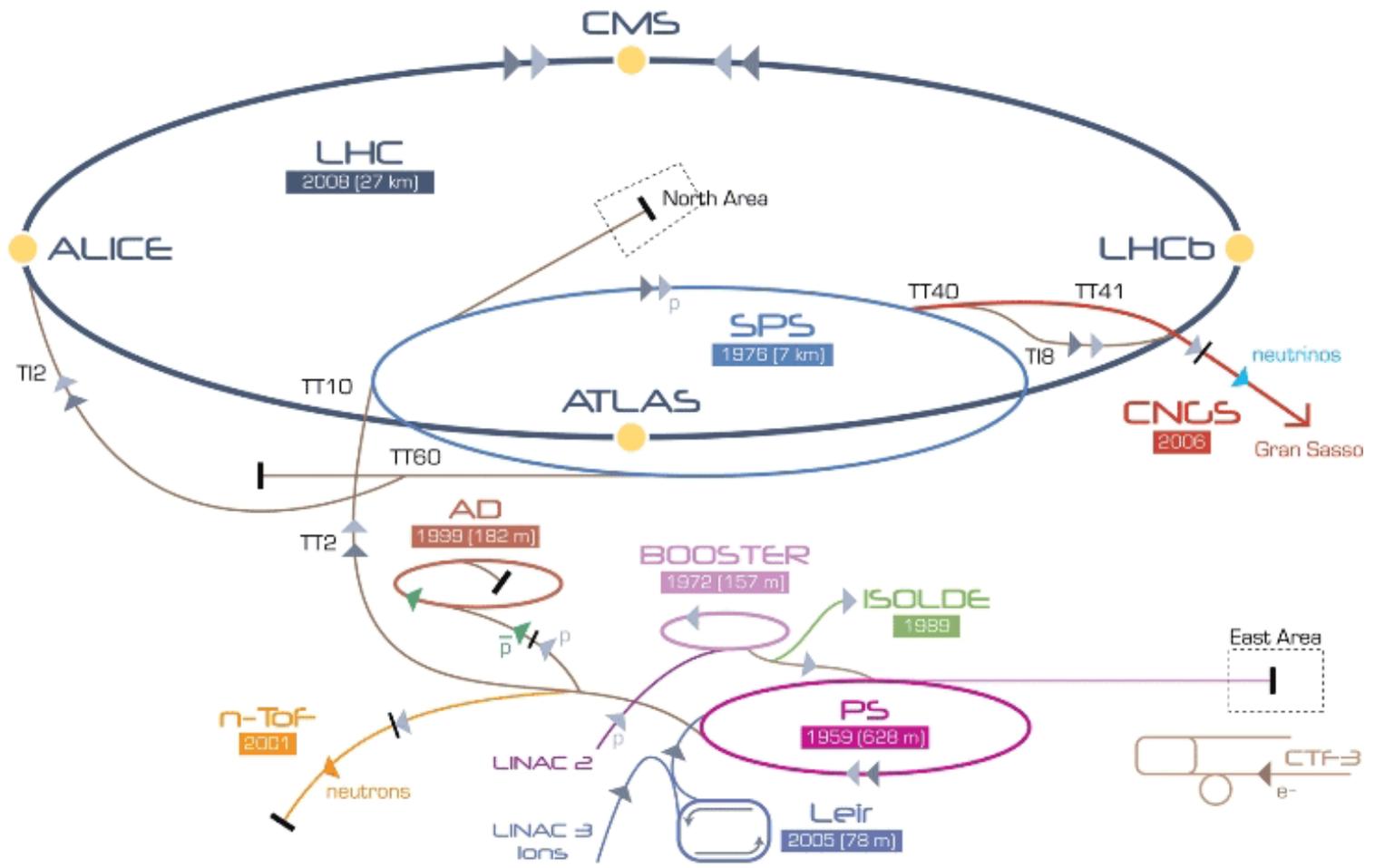


Основное кольцо и детекторы LHC на глубине примерно 70-100 м



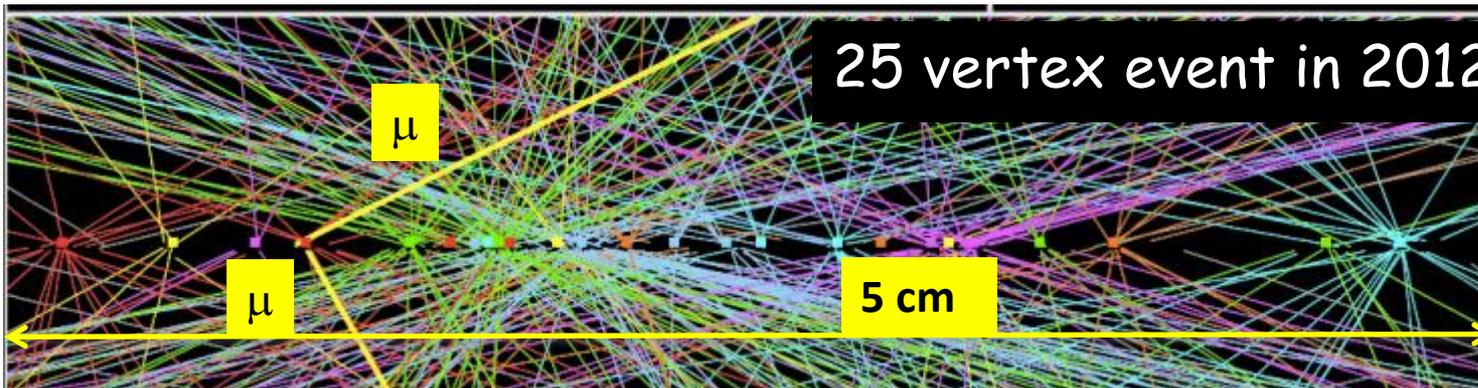
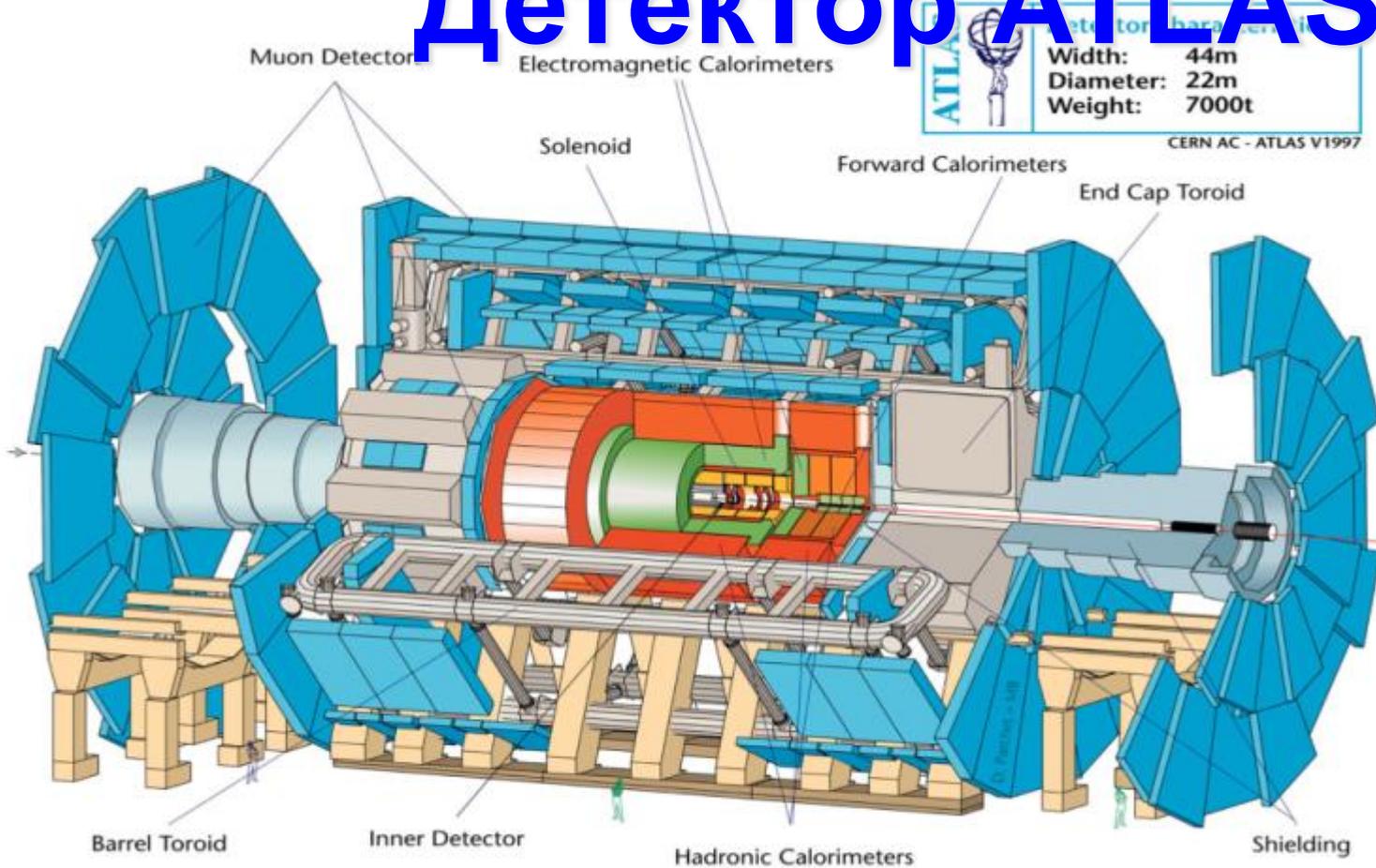
Наладка магнитов в 27 километровой тоннеле LHC



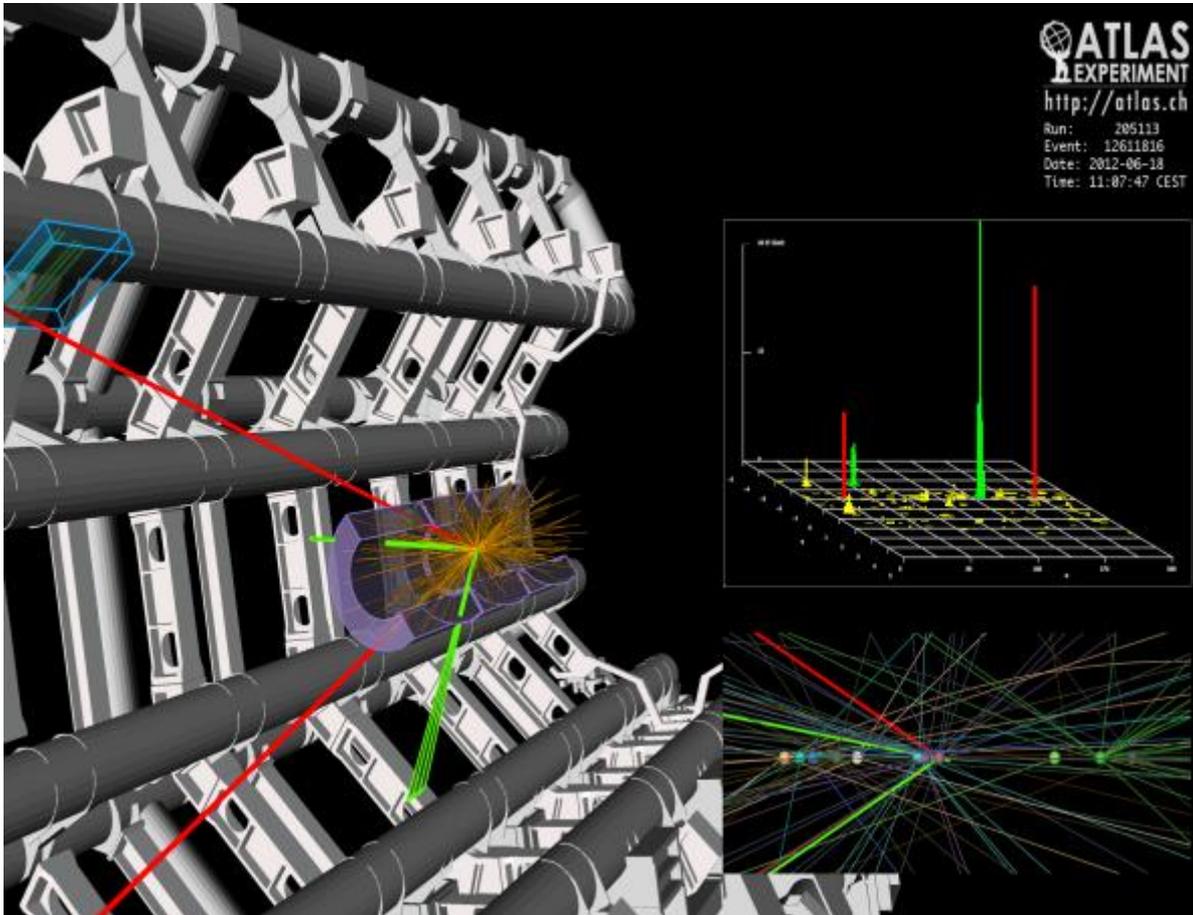


Kinetic energy of a proton (K)	Speed (%c)	Accelerator
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	PS Booster
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

Детектор ATLAS



Событие $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2e 2\mu$



Green tracks:

$e_1 : P_T = 18.7 \text{ GeV}$,

$e_2 : P_T = 76.0 \text{ GeV}$

2e invariant mass

$M(ee) = 87.9 \text{ GeV}$

Red tracks:

$\mu_1 : P_T = 19.6 \text{ GeV}$

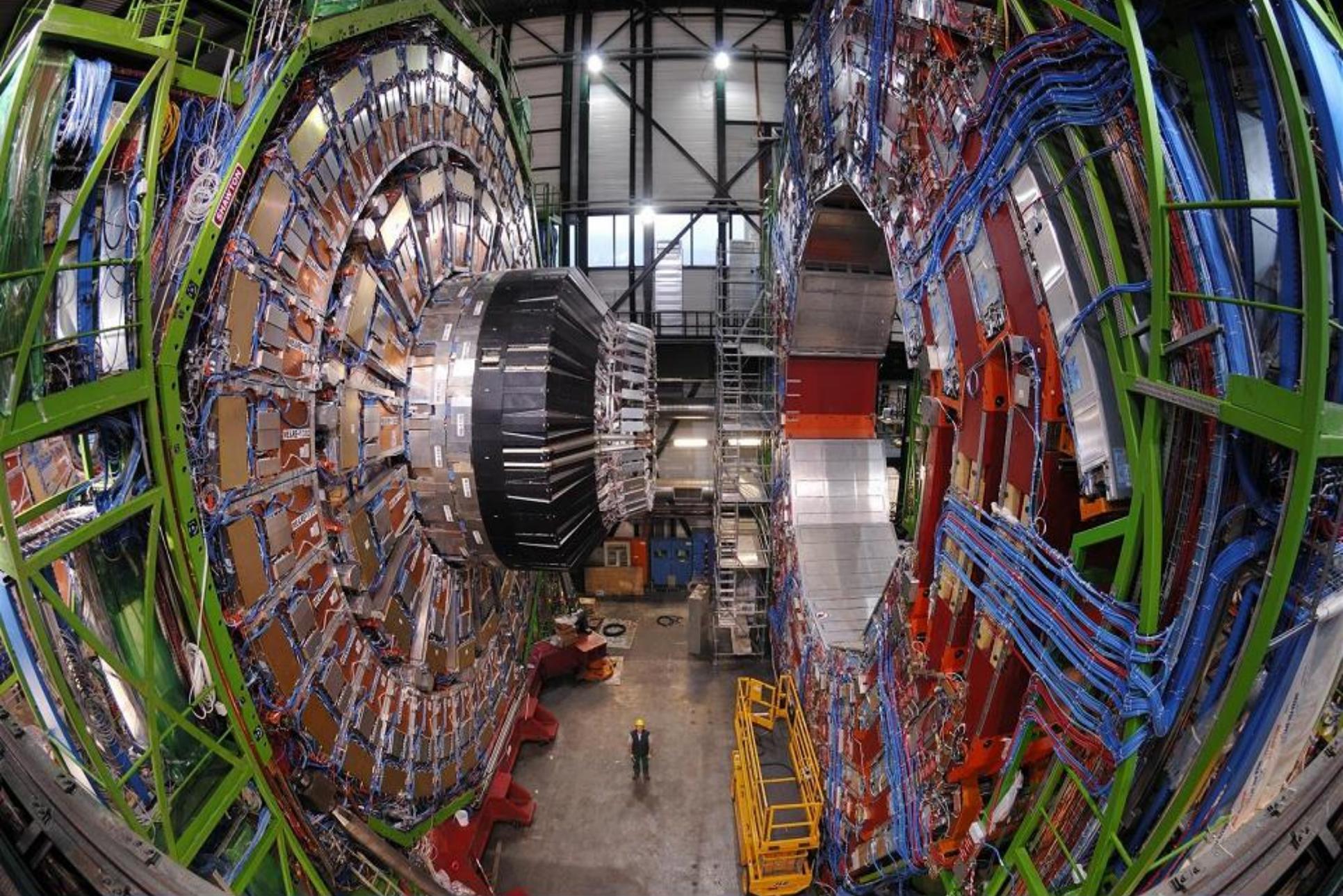
$\mu_2 : P_T = 7.9 \text{ GeV}$

2 μ invariant mass

$M(\mu\mu) = 19.6 \text{ GeV}$.

2e2 μ invariant-mass:

$M(4\ell) = 123.9 \text{ GeV}$.



CMS

Courtesy CMS/CERN

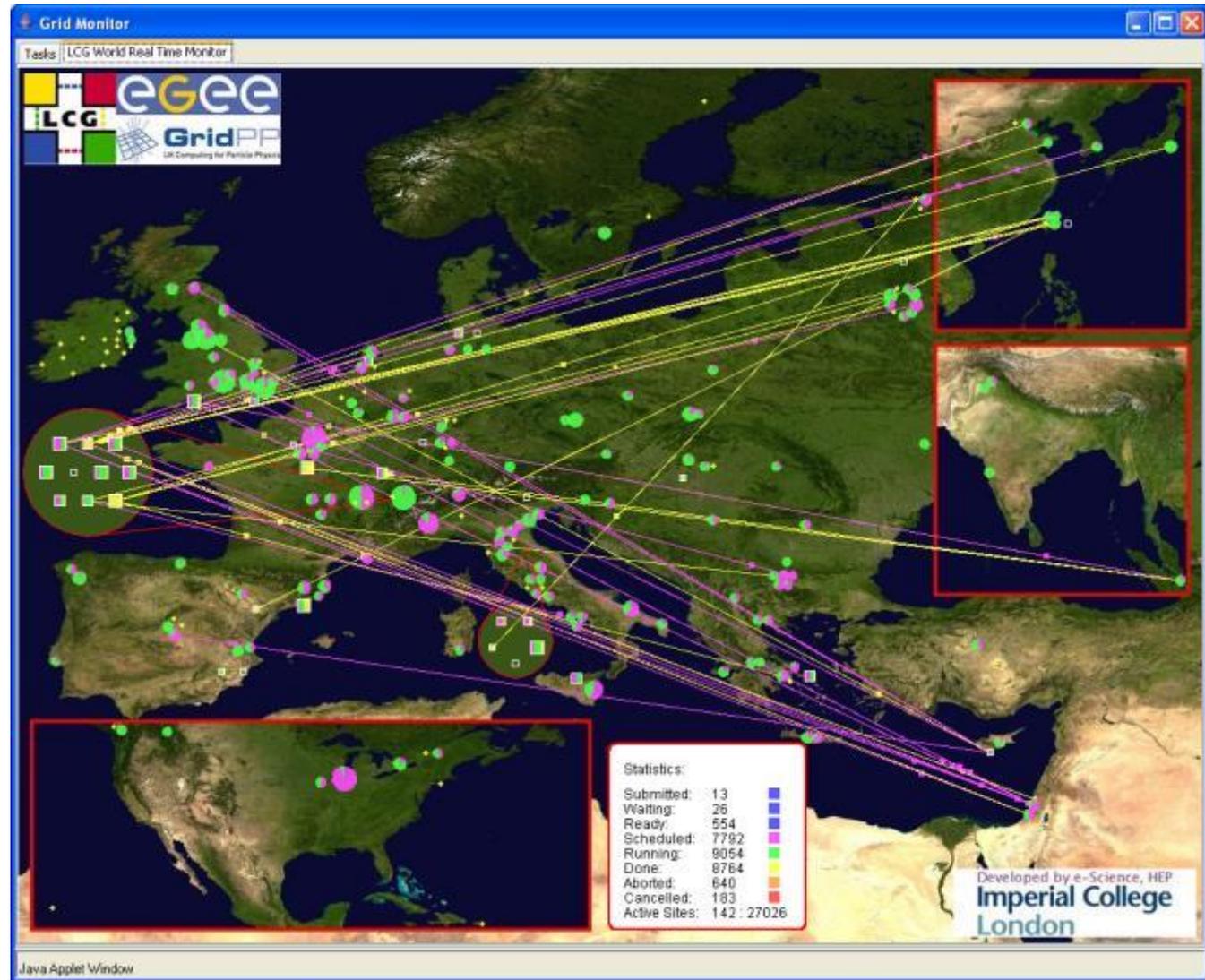
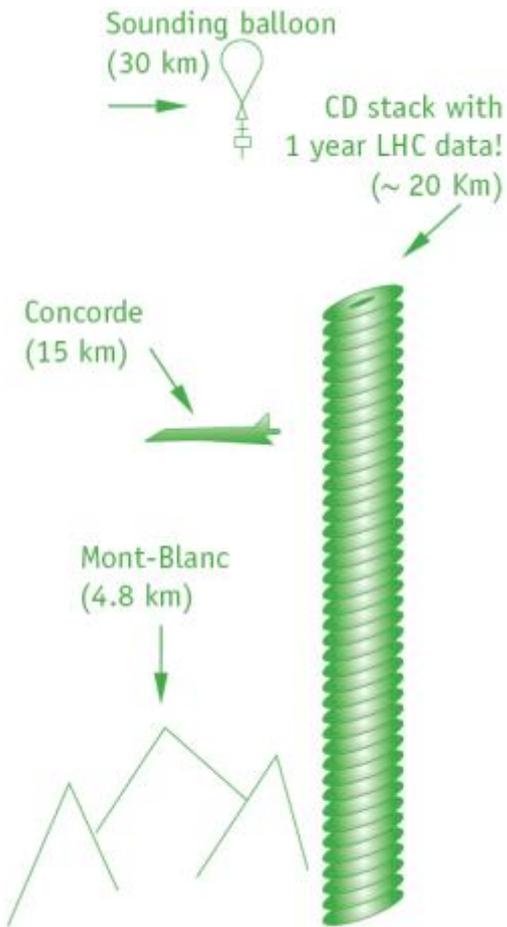
Control room





where the web was born

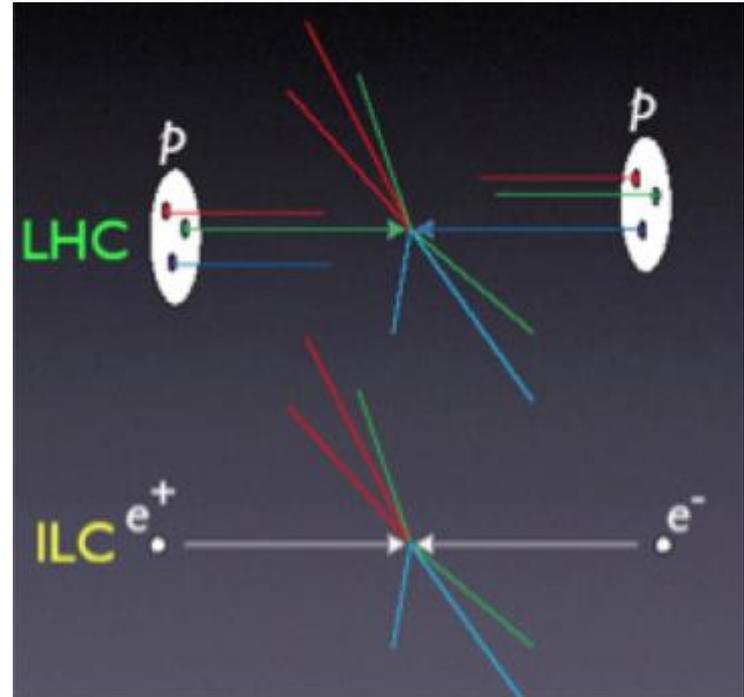
Tim Berners-Lee **The World Wide Web, 1989**



БУДУЩЕЕ ЛИНЕЙНО

Преимущества e^+e^- столкновений

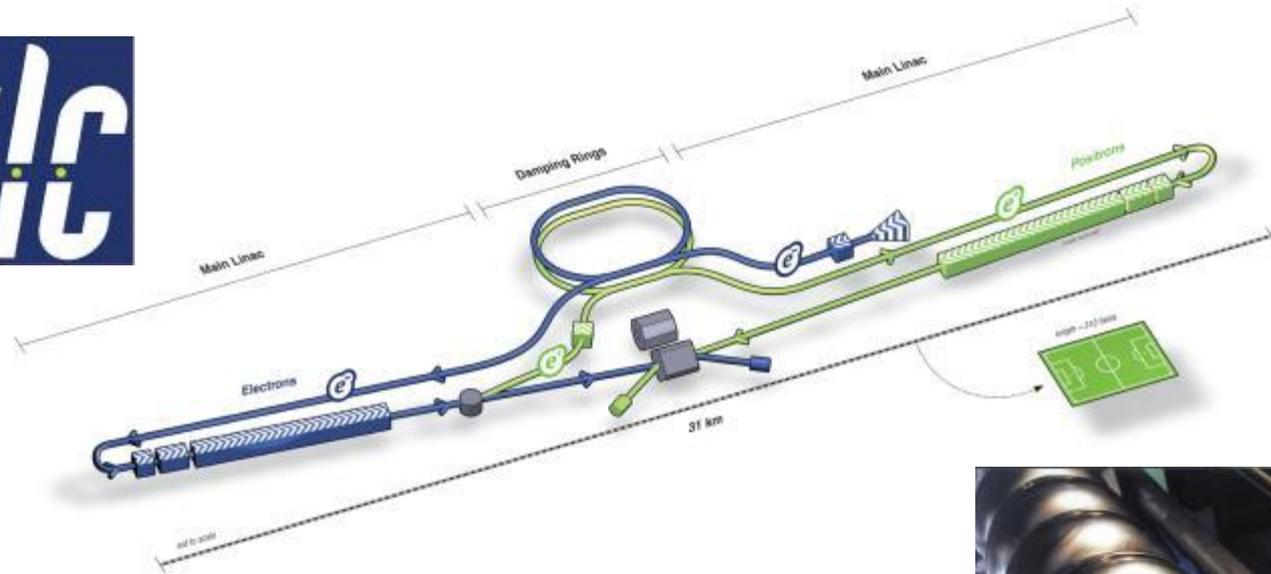
- элементарные частицы
- хорошо определяемы
 - энергия,
 - угловой момент
- использование всей энергии столкновения
- полная реконструкция событий



LINEAR COLLIDER COLLABORATION



БУДУЩЕЕ ЛИНЕЙНО



Длина – 31 км

16 000 ускоряющих секций (Nb)

Температура 2К

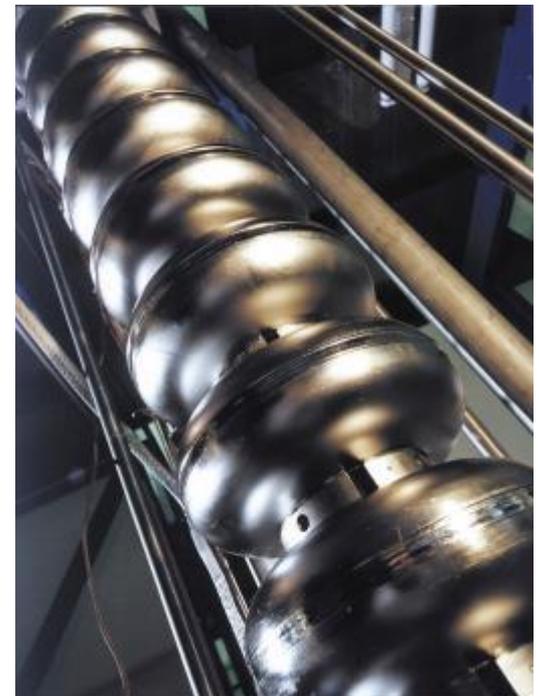
Энергия – 500 ГэВ (апгрейд до 1 ТэВ)

Хиггс-фабрика – 250 ГэВ

Столкновения:

14 000 в секунду

Сгусток $20 \cdot 10^9$ частиц



Большая наука и ЛНС

«Должно ли общество оказывать поддержку крупным научно-исследовательским проектам в области фундаментальных наук?»

Оценка первоначальной стоимости некоторых проектов Большой науки (млрд долл.) и их эквиваленты в млрд долл. **2011 г.** Д. Ф. Джудиче Physics in Perspective, arXiv:1106.2443

Проект	Первоначальная стоимость ×10 ⁹ долл.	Расчетная стоимость ×10 ⁹ долл.
Манхэттенский проект Стоимость при утверждении (1942): 3 года 1942–1944 Общая стоимость: 5 лет 1942–1946	0,148 2,2	27
Программа Аполлон Расчётная стоимость (1966): 13 лет Общая стоимость: 14 лет 1960–1973	22,7 19,4	120
Космический телескоп «Хаббл» Первоначальная расчётная стоимость Стоимость строительства Общая расчётная стоимость: 25 лет 1990–2014	0,5 1,5 6,0	8
Сверхпроводящий суперколлайдер (ССК) Расчётная стоимость при утверждении (1987) Расчётная стоимость при отмене (1993)	4,4 11,8	18
Международная космическая станция (МКС) Начальная расчётная стоимость Расчётная стоимость разработки, сборки и эксплуатации (1998)	17,4 96	120
Международный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) Расчётная стоимость строительства (2010): 10 лет 2008–2017	17,9	18
Большой адронный коллайдер (ЛНС) Материалы для строительства ускорителя и детекторов	5,4	6

Сметная стоимость Олимпийских игр 2012г. в Лондоне превышает 10 млрд евро

Большая наука и ЛНС

- Большая концентрация не только финансовых, но и особенно интеллектуальных ресурсов в одном научно-исследовательском центре
- Предвидеть прикладное значение конечных целей крупных проектов почти невозможно, в то время как техническая значимость проекта заложена в самом научном исследовании, разработанном для достижения этих целей
- Заявки учёных на изготовление опытных образцов самой современной аппаратуры заставляют промышленность разрабатывать новые производственные технологии
- Если бы физику высоких энергий можно было бы сделать средством установления международного сотрудничества ... между Востоком и Западом, ... то затраты на физику высоких энергий стали бы её достоинством
- Крупные научные проекты дают уникальную возможность для обучения и подготовки студентов и молодых исследователей
- Крупные проекты часто незаменимы для обеспечения развития фундаментальной науки. Отказ от них означает отказ от драгоценных знаний, обладающих значимостью, которая не ограничивается рамками одной лишь науки, а оказывает воздействие на всё общество.

Применение ускорителей

Ускорители применяются:

~ 100

- В научных исследованиях (элементарные частицы, ядерная физика, физика твердого тела, получение не встречающихся в природе нуклидов)
- В прикладных исследованиях (источники синхротронного излучения)

- В медицине (радиационная диагностика и терапия, стерилизация аппаратуры), биологии
- В промышленности (имплантация ионов, дефектоскопия, стерилизация пищевых продуктов, искусственная полимеризация лаков, модификация свойств материалов, напр, резины, радиационная обработка материалов, изготовление элементов микроэлектроники)

~ 17 000

Дополнительно

<http://elementy.ru/posters/collider/light>

