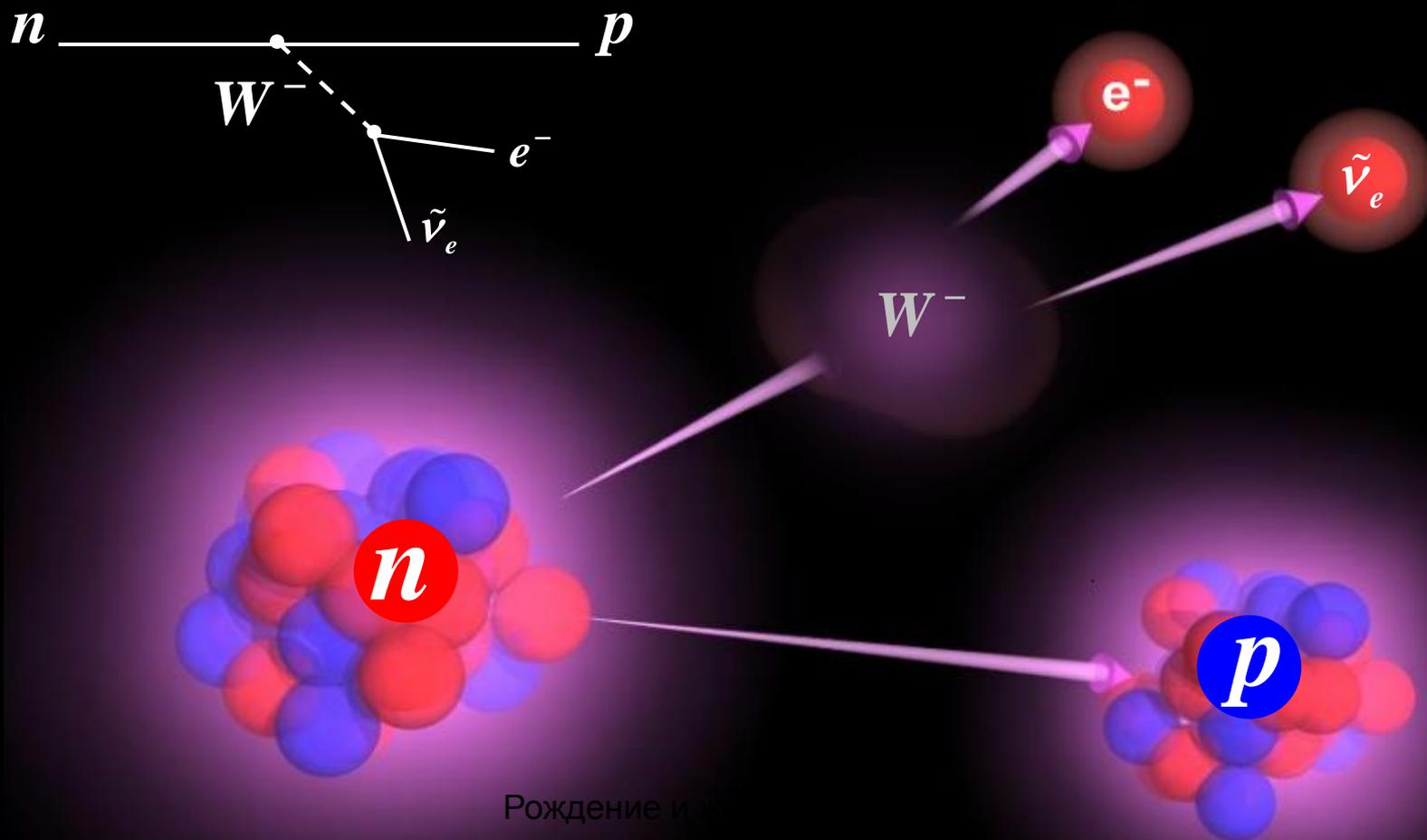
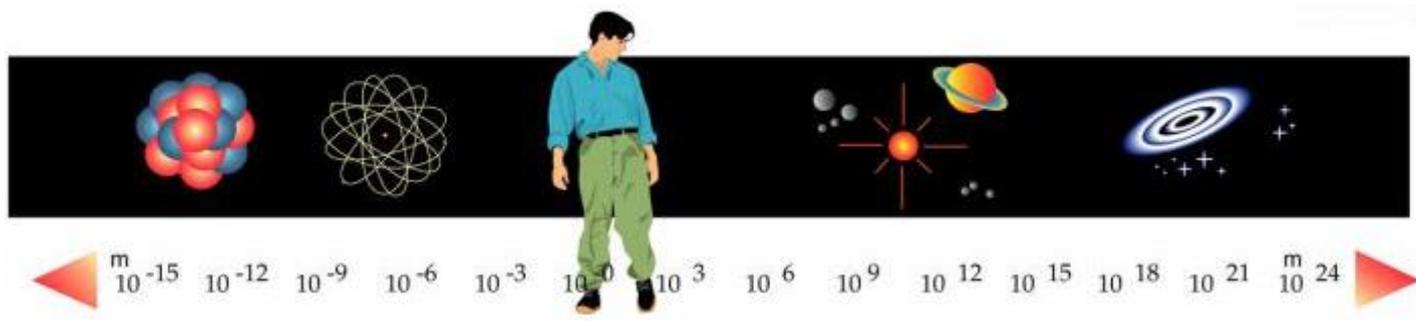
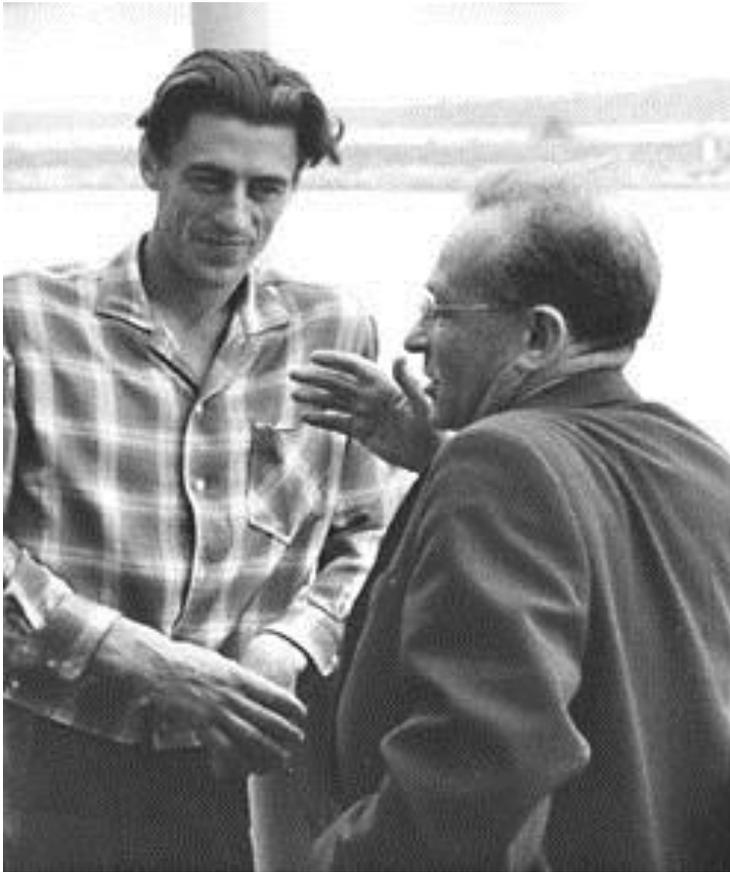


Рождение и жизнь атомных ядер



УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ





В.И. Векслер и В.П. Саранцев
Дубна

Проф. В.П. 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)



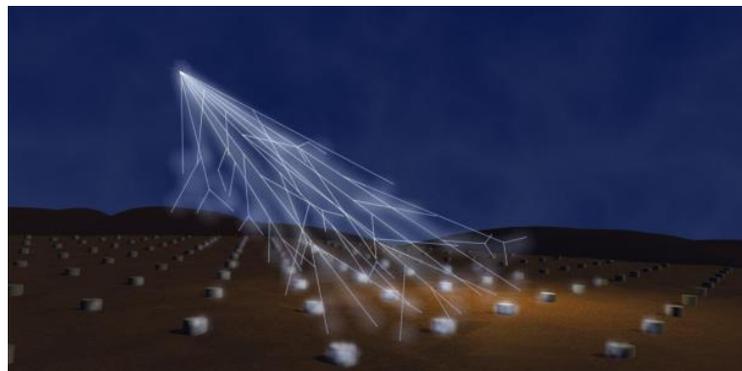
Слава
Саранцев,
1948 г



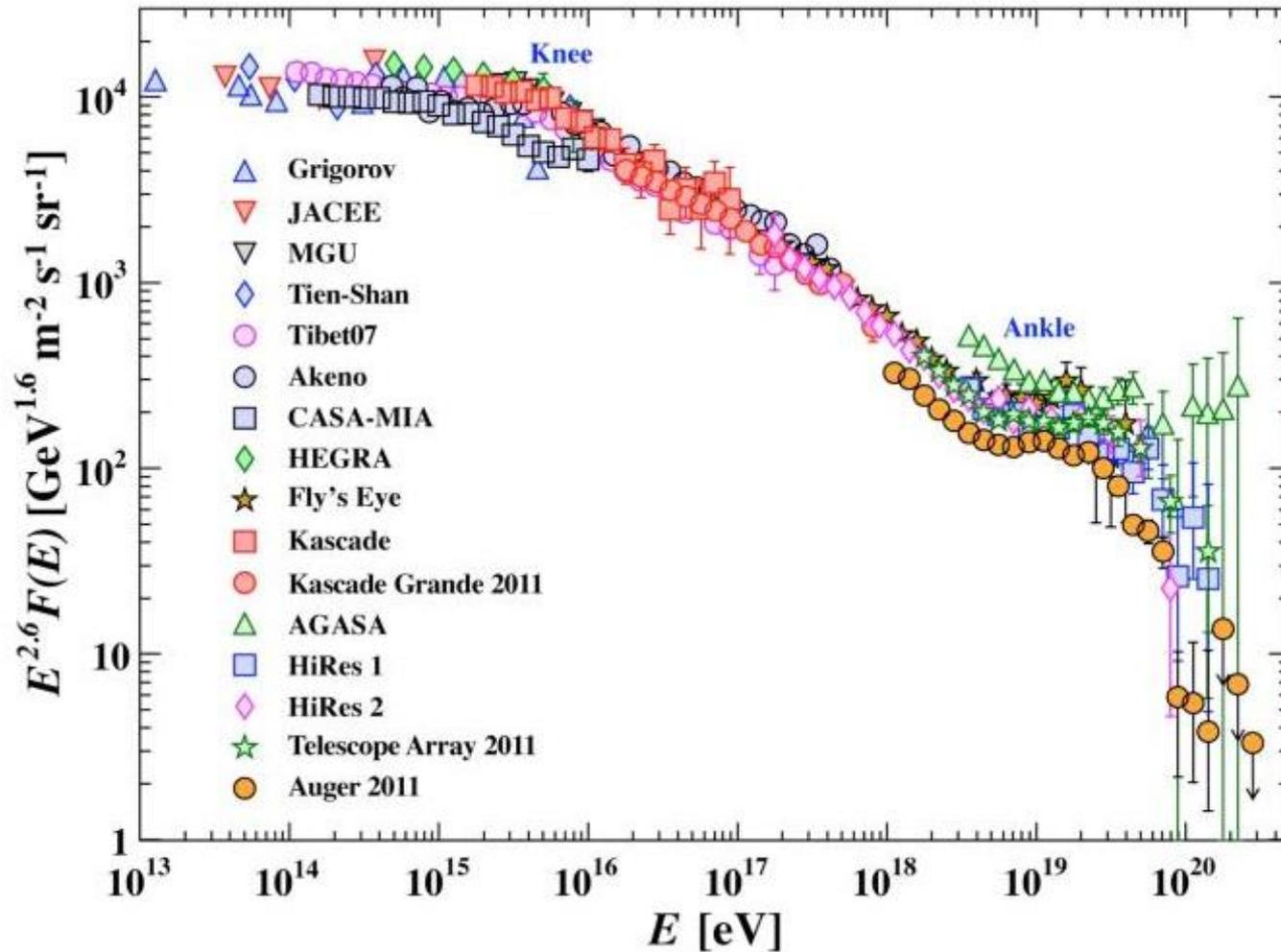
Стромынка, двор
общезития 1949



Рождение и жизнь атомных ядер. Ускорители



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

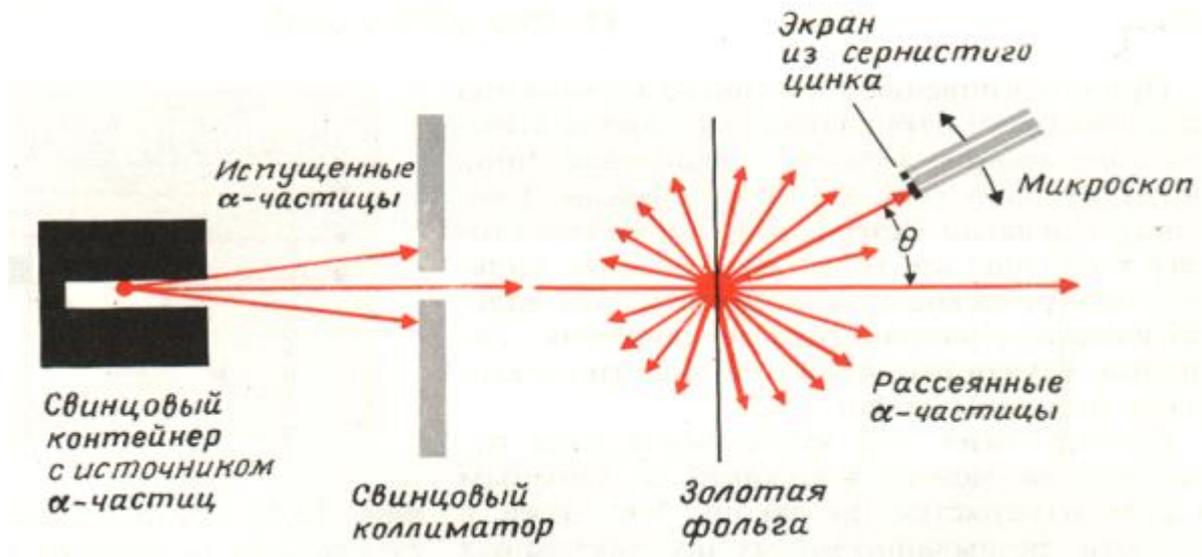
5 – НИИЯФ, ускорители

6 – корпус космических лучей

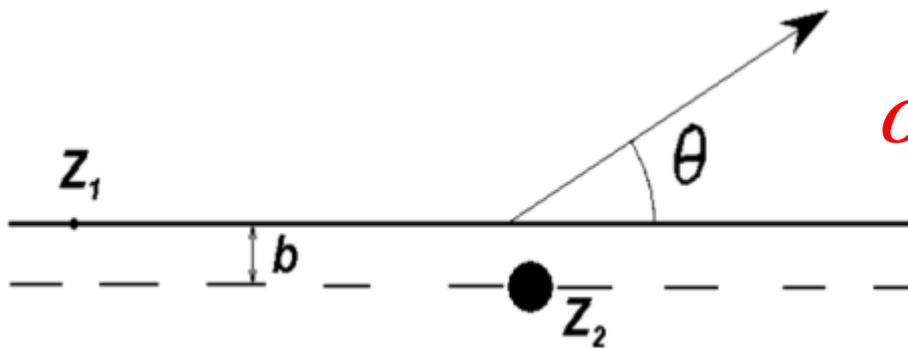
7 – институт механики



Рождение и жизнь атомных ядер. Ускорители



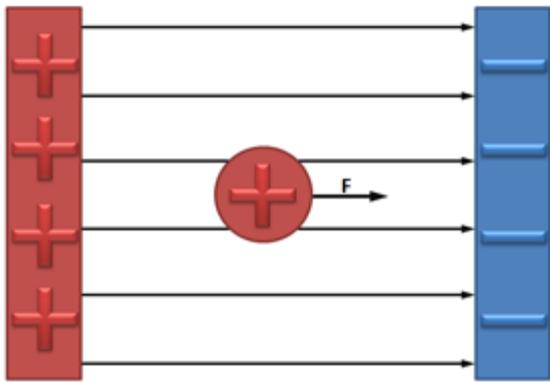
1911 г. Опыты по рассеянию α-частиц



$$T(\alpha) = 7,7 \text{ МэВ}$$

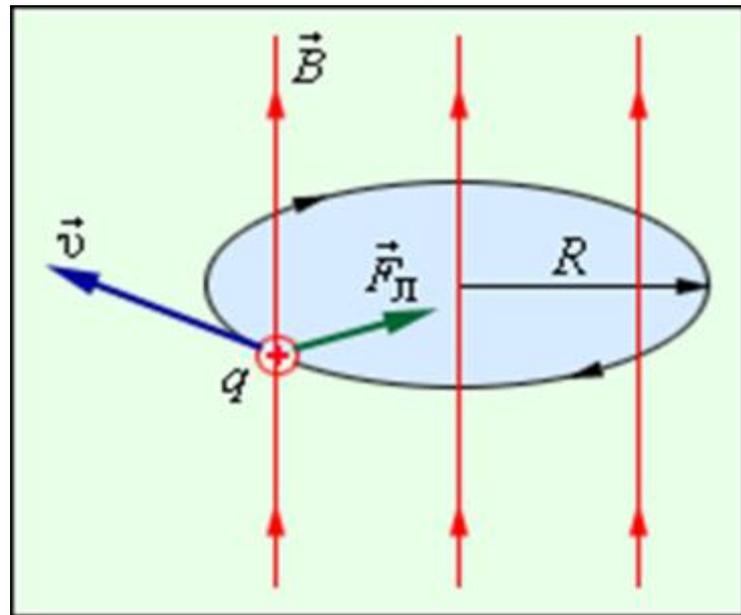
Движение частиц в электромагнитном поле

Электрическое поле



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

Магнитное поле



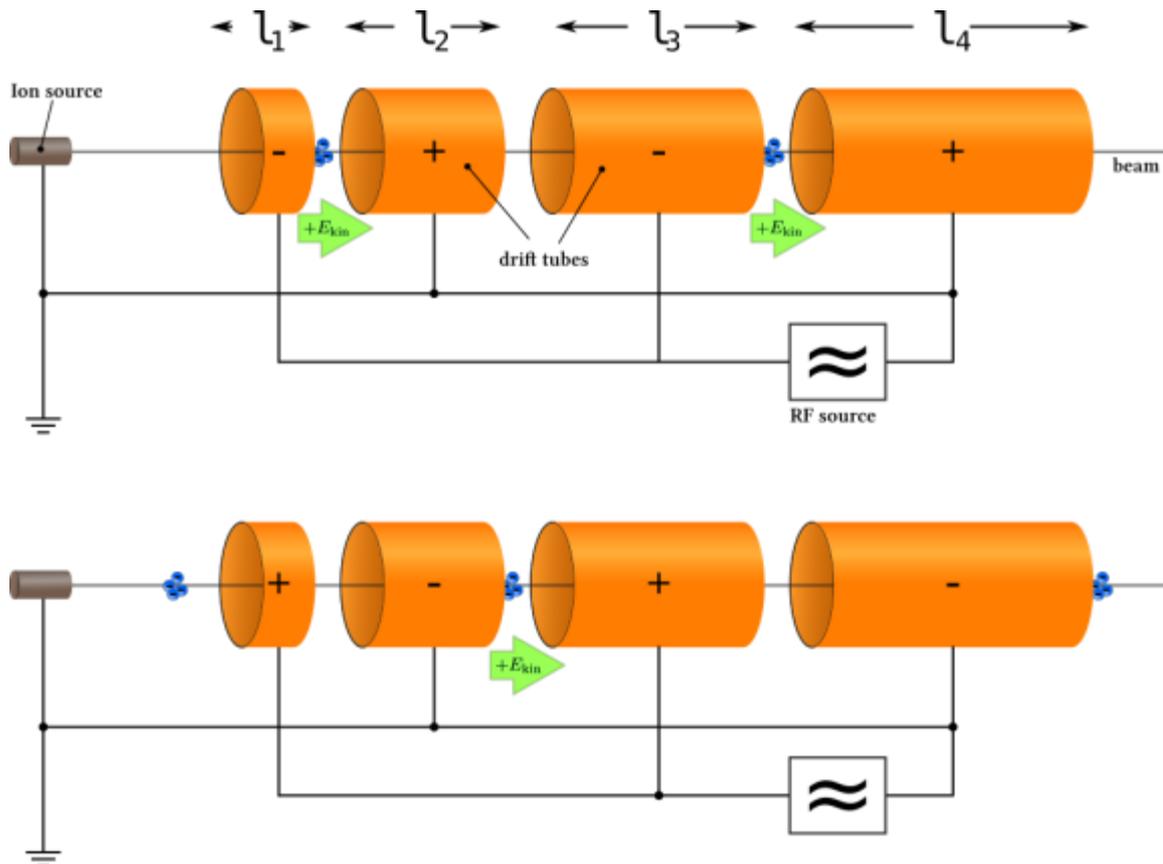
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

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

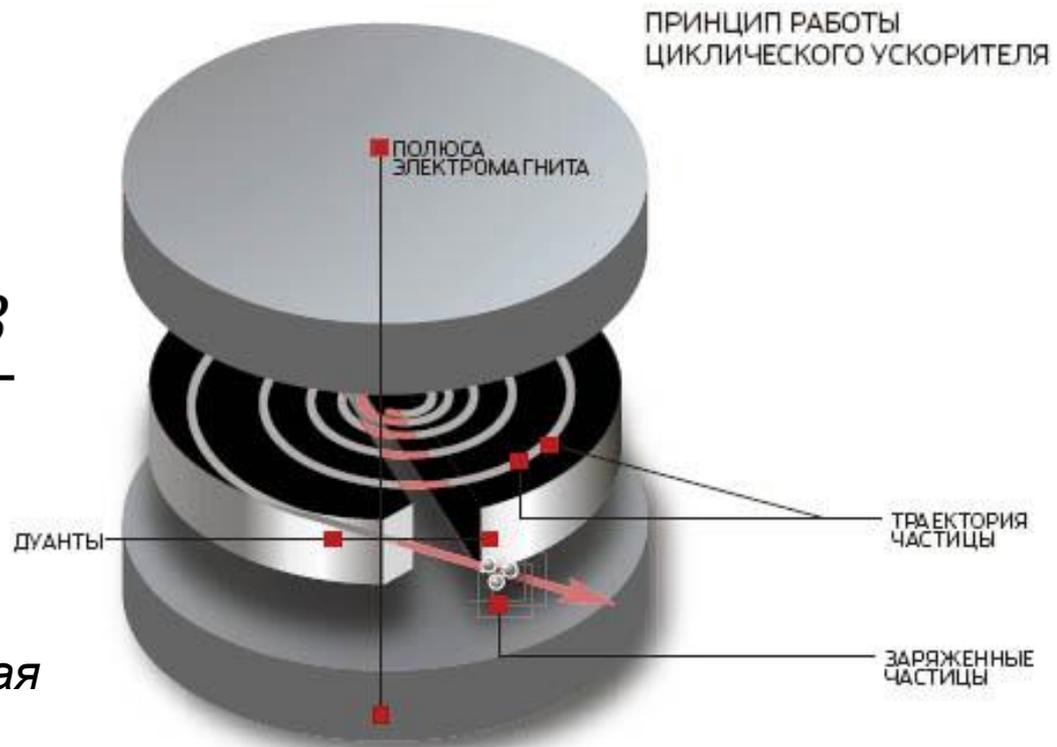
1929 г. Э. Лоуренс предложил идею циклотрона

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



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

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

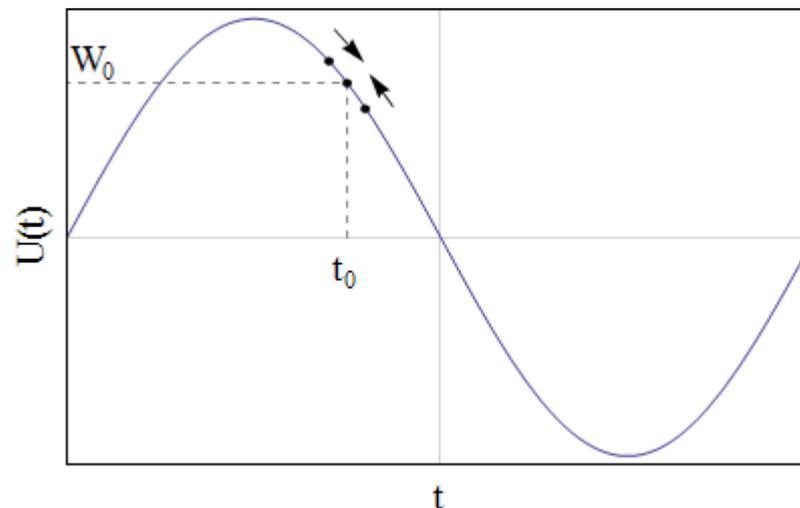


Принцип автофазировки

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

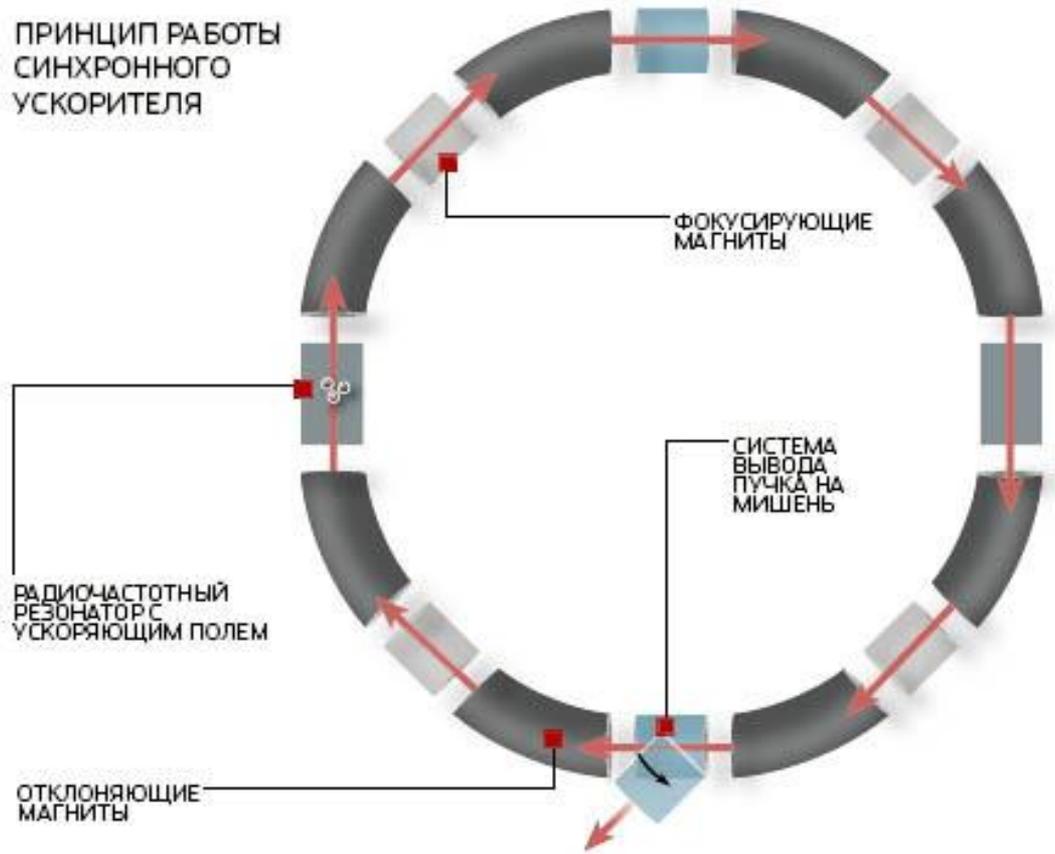
1949 г. Фазотрон
протоны 680 МэВ,
Дубна, СССР

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

.....

1957 г. Синхрофазотрон
Протоны 10 ГэВ
Дубна, ОИЯИ

ПРИНЦИП РАБОТЫ
СИНХРОННОГО
УСКОРИТЕЛЯ



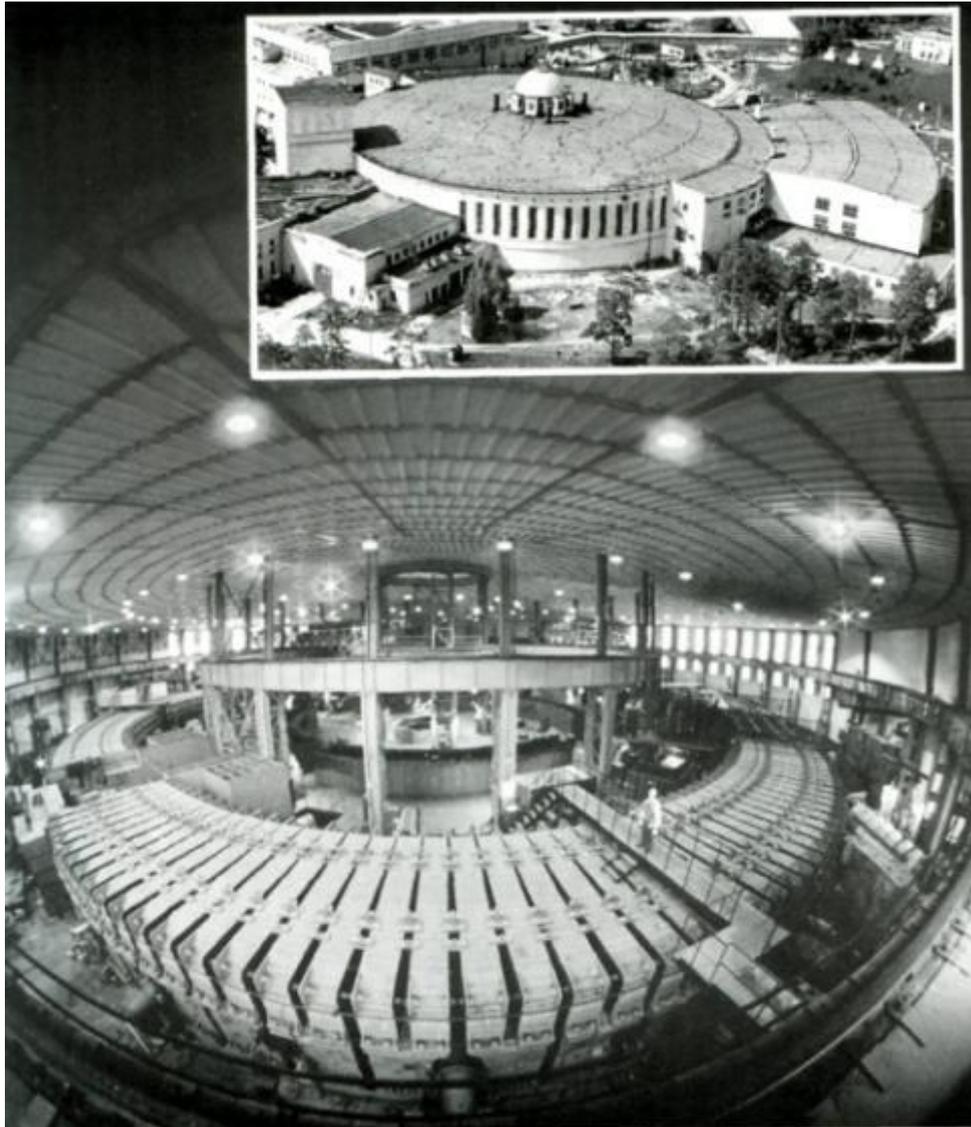
Синхрофазотрон



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, 30 лет

В.И. Векслер
1907-1966
Дубна

Когерентные
методы
ускорения



Я.Б. Файнберг
1918-2005
Харьков

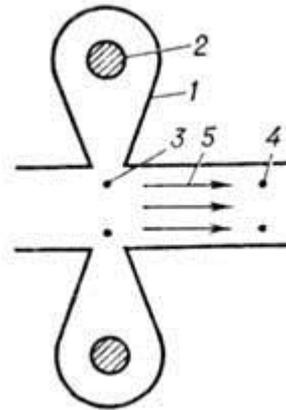
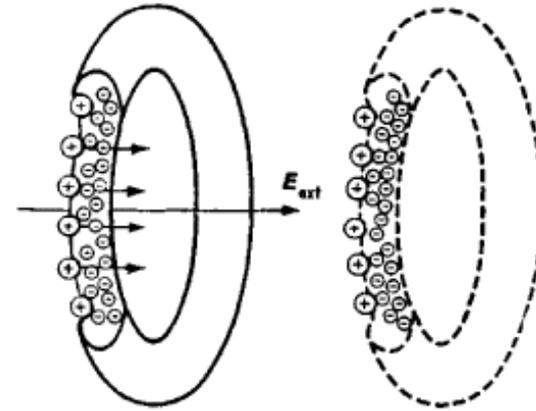
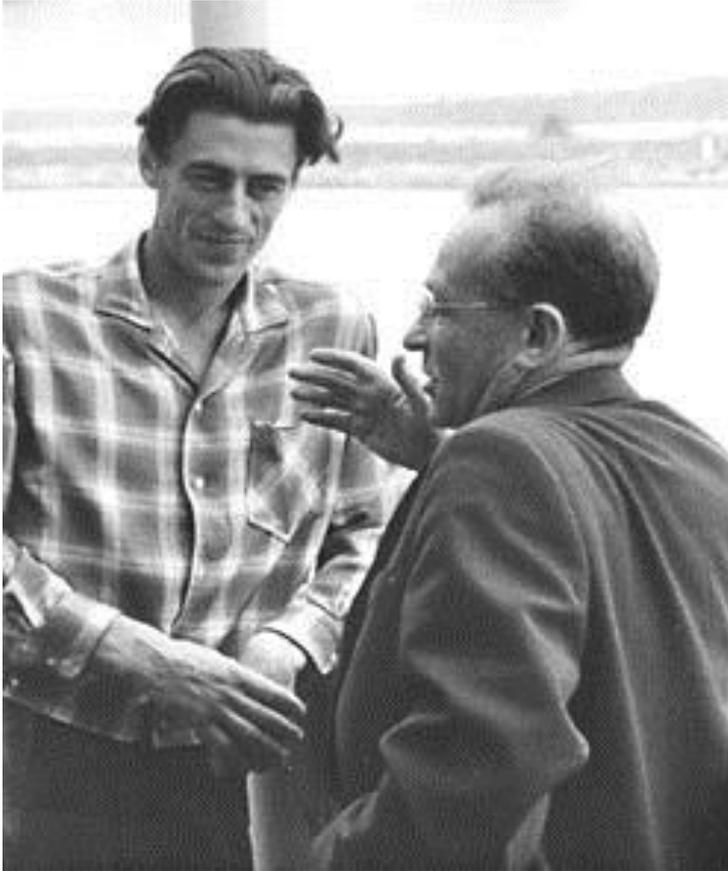
Плазменный
волновод



Г.И. Будкер
1918-1977
Новосибирск

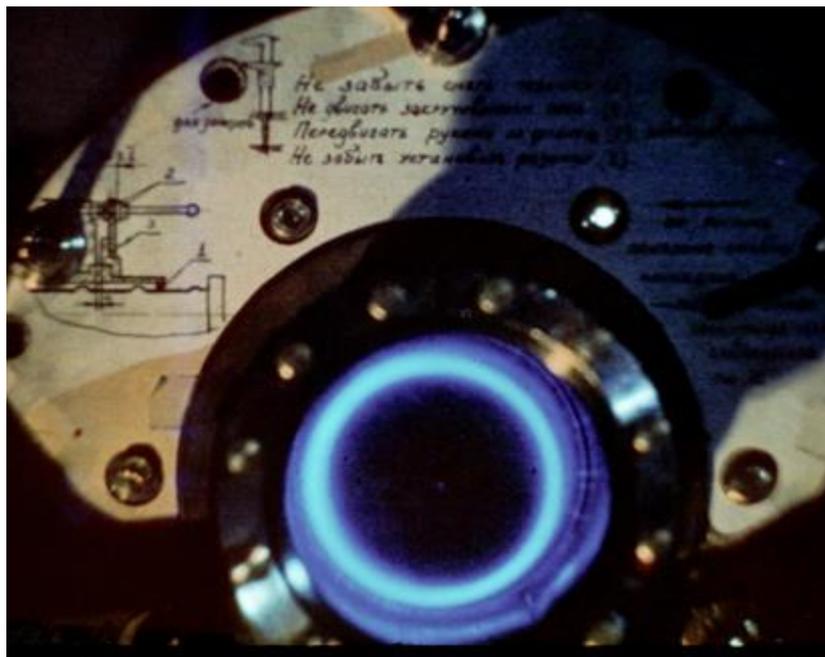
Релятивистская
стабилизация
пучка

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)

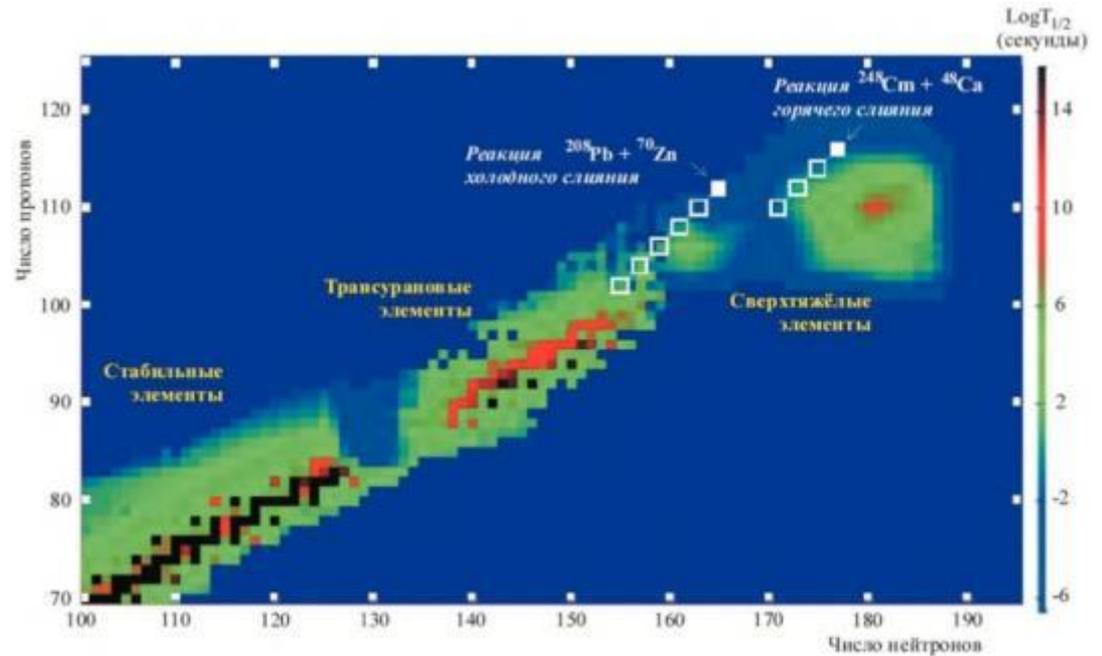


- Число электронов в кольце – 10^{13}
- Радиус кольца – 3 – 4 см
- Энергия электронов – 20 МэВ
- Число ионов азота в кольце – $5 \cdot 10^{11}$
- Энергия ускоренных ионов – 1.5 – 2 МэВ/нукл

Тяжелые ионы



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



Ускорительный комплекс У400 (циклотрон)
Запущен в 1979 году

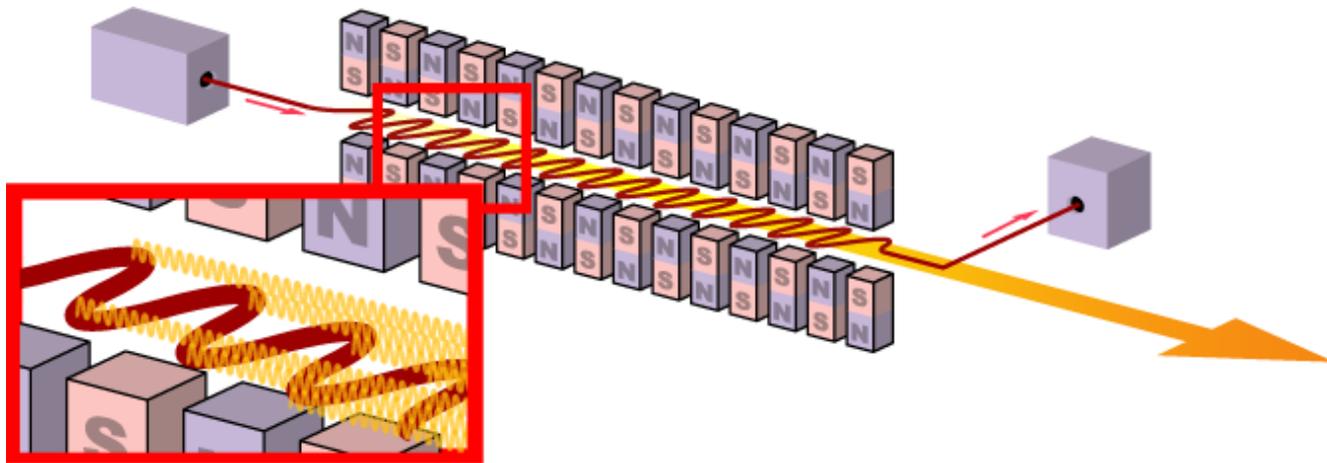
Пучки ускоренных ионов $A = 4 - 209$
с энергией $3 - 29$ МэВ/нуклон
Магнит 2100 тонн, диаметр 4 м



Лазеры на свободных электронах

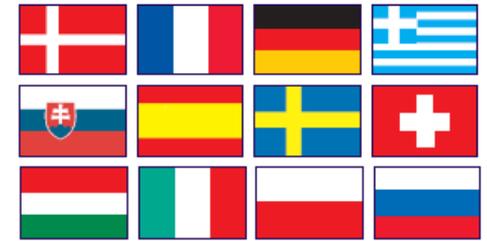
1971 г. – Джон М. Дж. Мэйди. (Стенфорд)
Проект лазера на свободных электронах

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





Проект XFEL



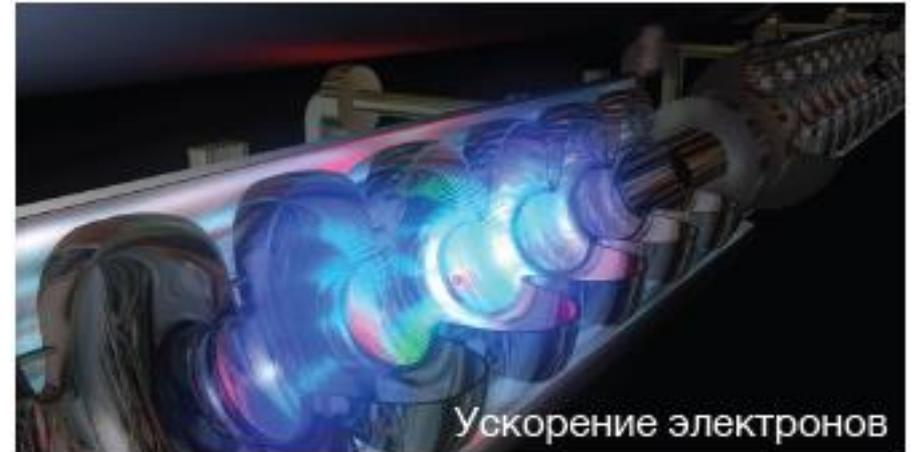
XFEL – рентгеновский лазер
на свободных электронах

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).

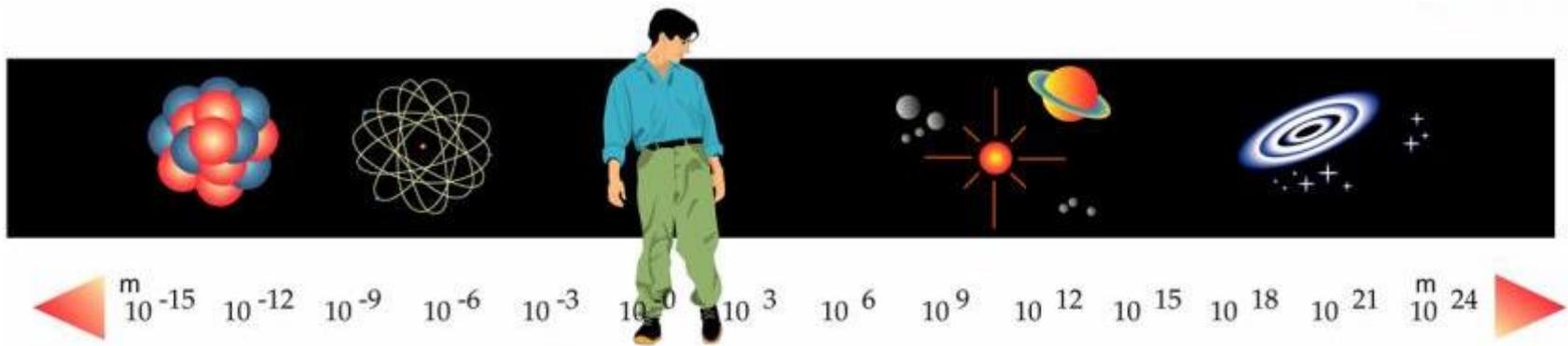


Ускорение электронов



Излучение в ондуляторе

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

$$a + b \rightarrow M$$

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

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

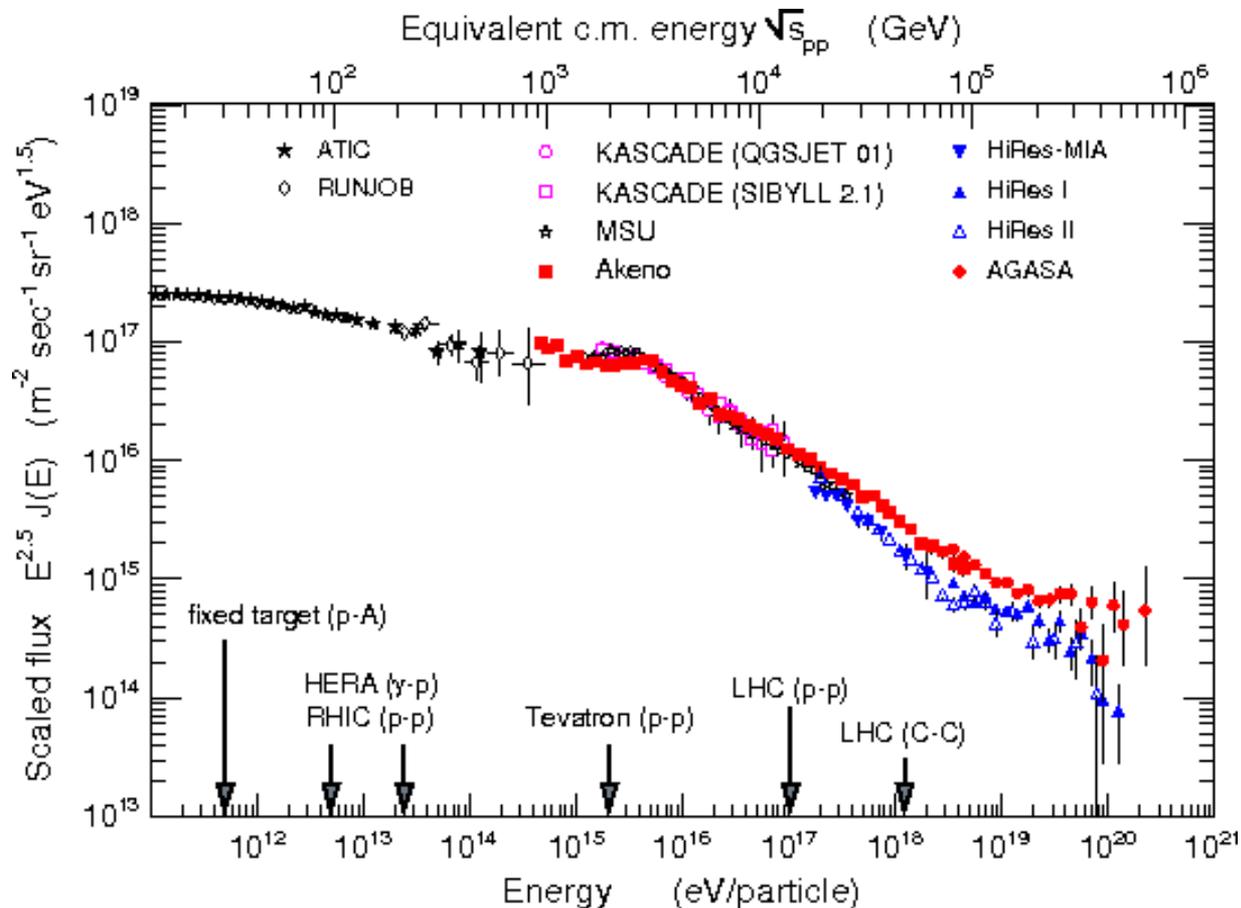
$$E_a = \frac{2E^{*2}}{m} - m$$

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

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

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

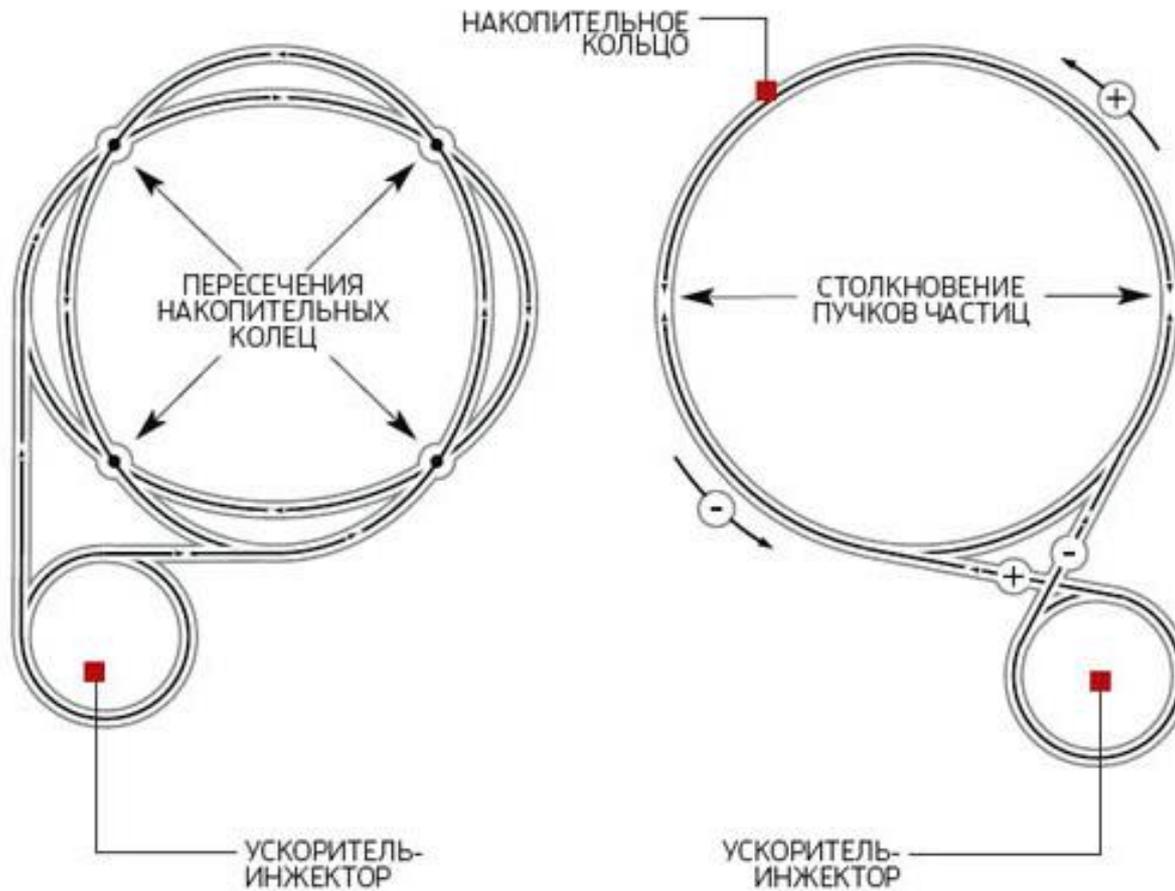
Встречные пучки Vs. Космические лучи



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/и)	$1,6 \times 10^{32}$ 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/ и)	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

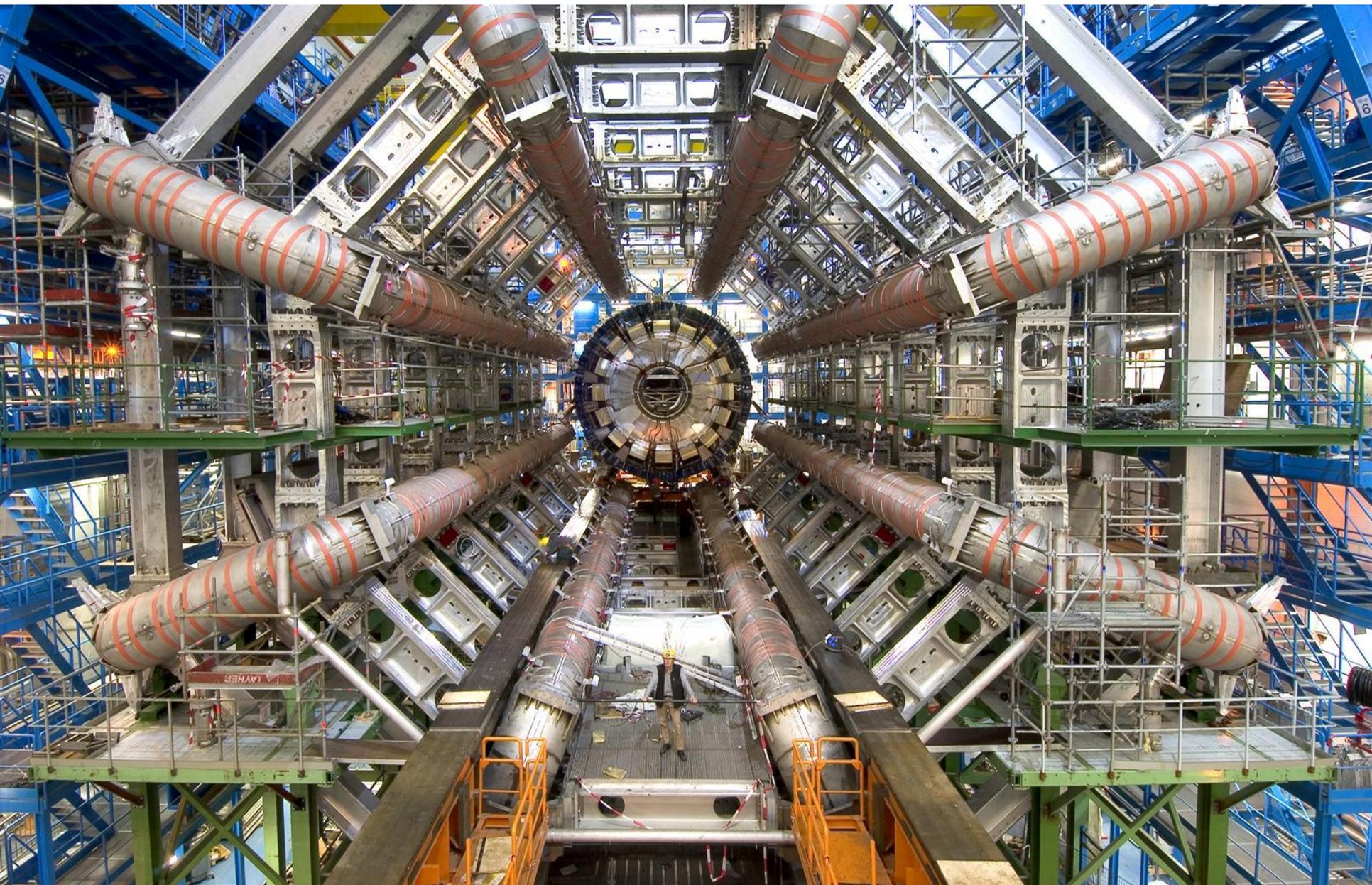




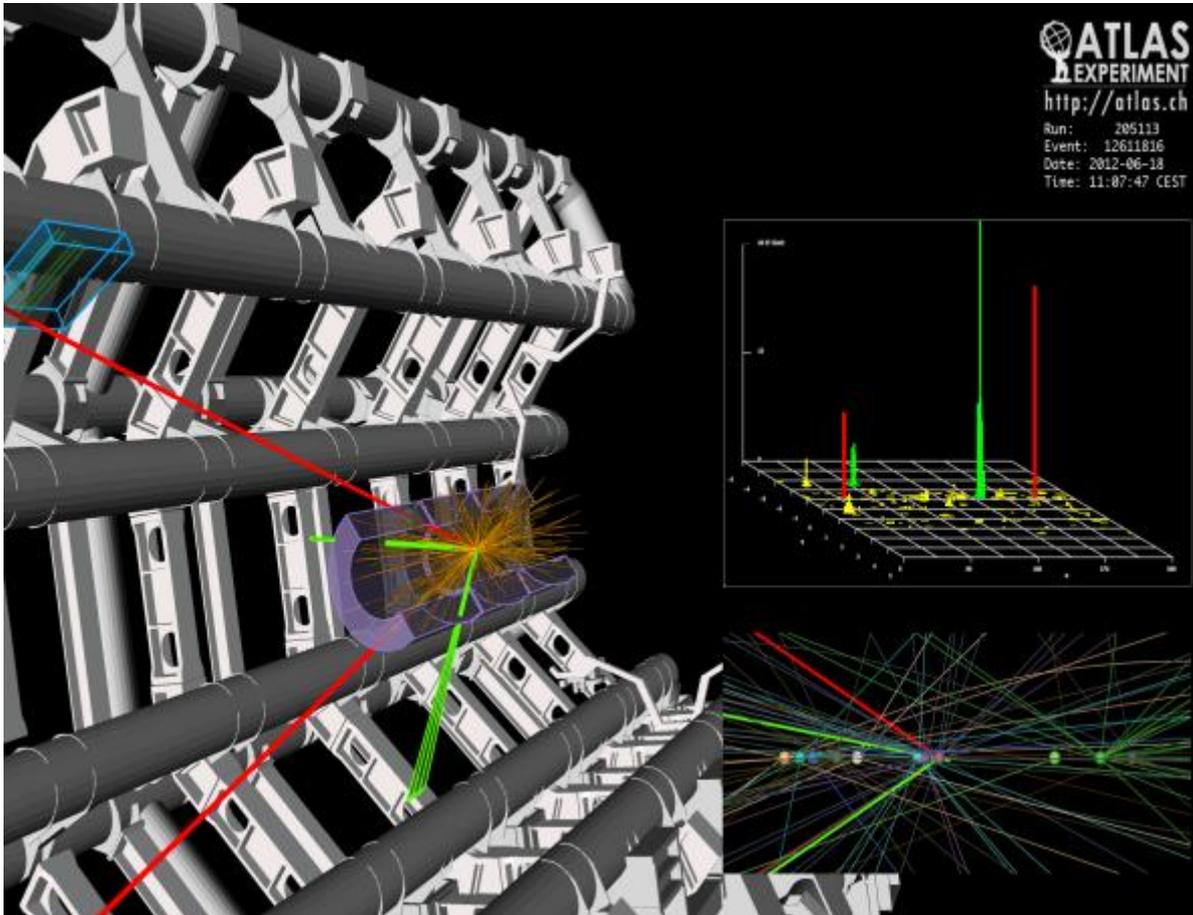
CERN - ЦЕРН

Европейская организация ядерных исследований





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

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

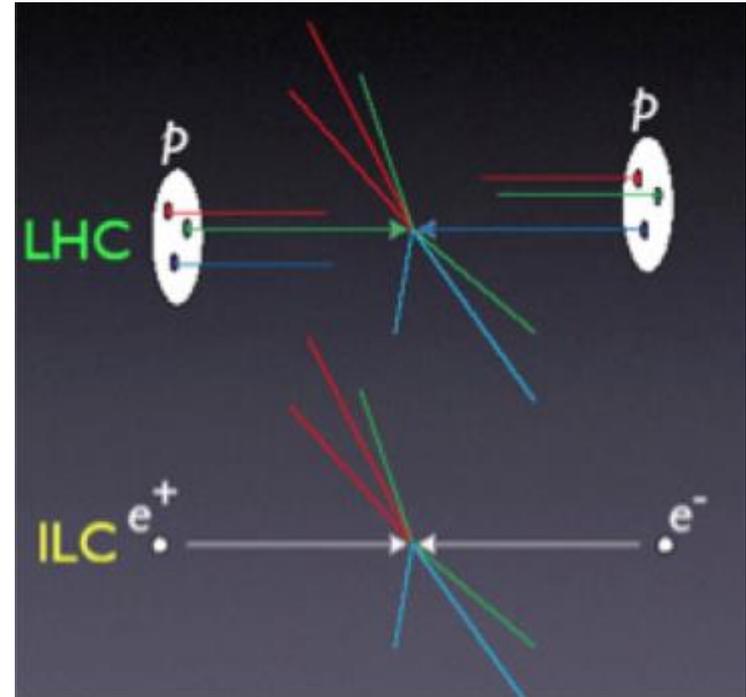
2e2 μ invariant-mass:

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

БУДУЩЕЕ ЛИНЕЙНО

Преимущества e^+e^- столкновений

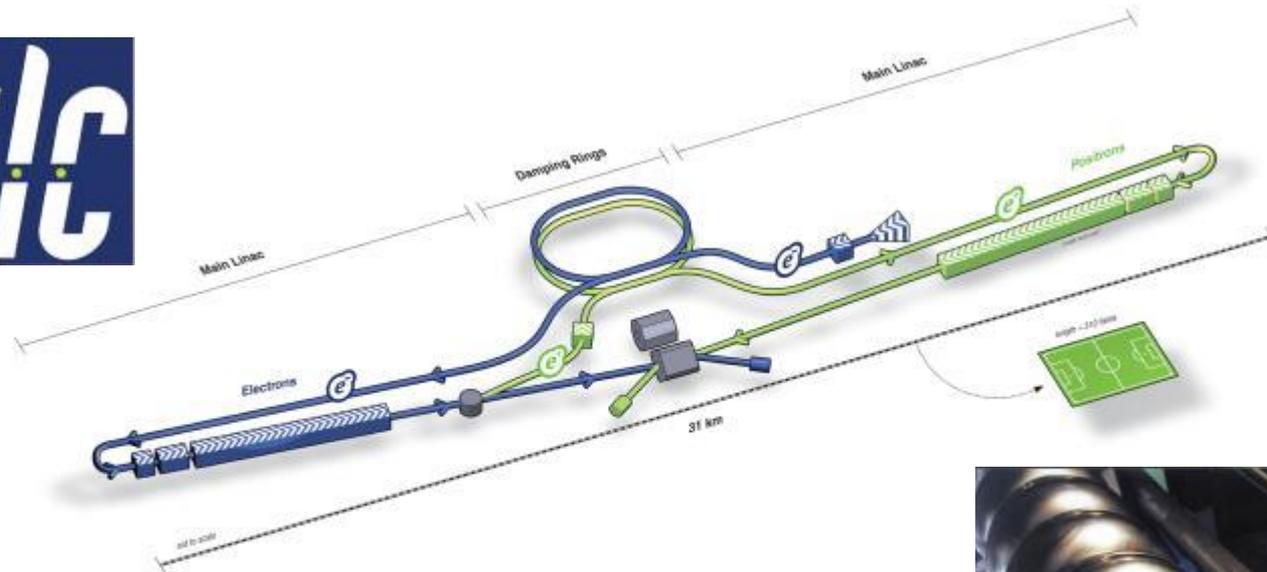
- элементарные частицы
- хорошо определяемы
 - энергия,
 - угловой момент
- использование всей энергии столкновения
- полная реконструкция событий



LINEAR COLLIDER COLLABORATION



БУДУЩЕЕ ЛИНЕЙНО



Длина – 31 км

16 000 ускоряющих секций (Nb)

Температура 2К

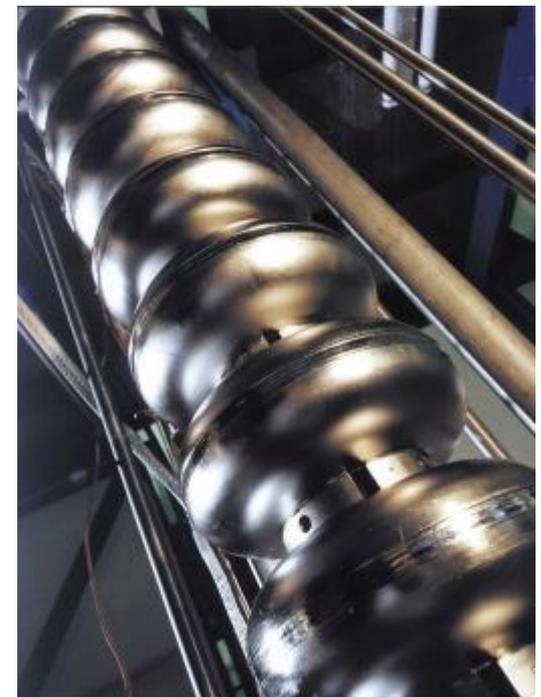
Энергия – 500 ГэВ (апгрейд до 1 ТэВ)

Хиггс-фабрика – 250 ГэВ

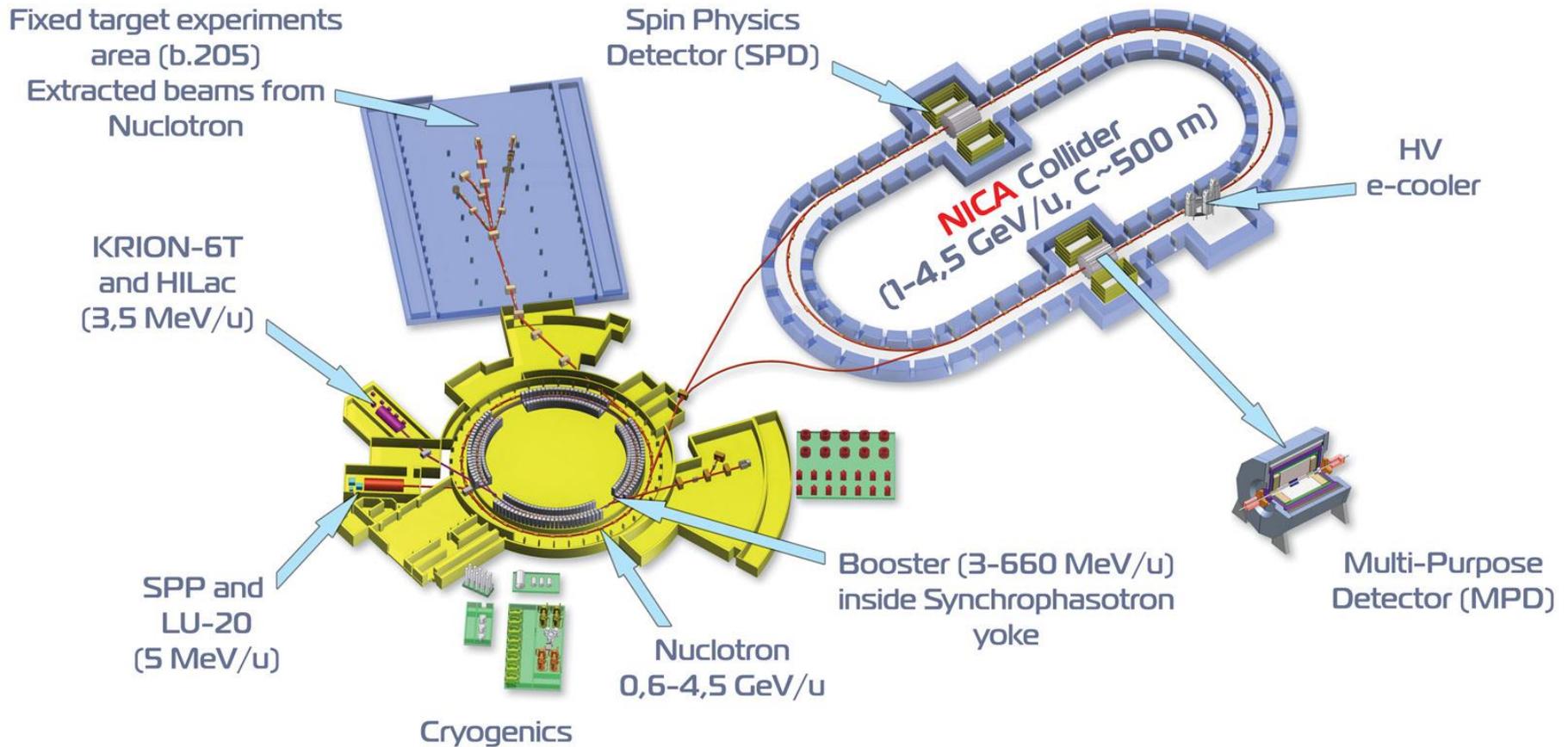
Столкновения:

14 000 в секунду

Сгусток $20 \cdot 10^9$ частиц



Superconducting accelerator complex **NICA** (**N**uclotron based **I**on **C**ollider **f**Acility)



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

Ускорители ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ



70-МэВ разрезной микротрон:

Энергия пучка	15 – 70 МэВ
Ток пучка	2 – 10 мА
Ширина спектра	0.2 МэВ
Длина импульса	15 мкс
Частота повторения	до 250 Hz
Размеры	0.8*1.4*2.2 м



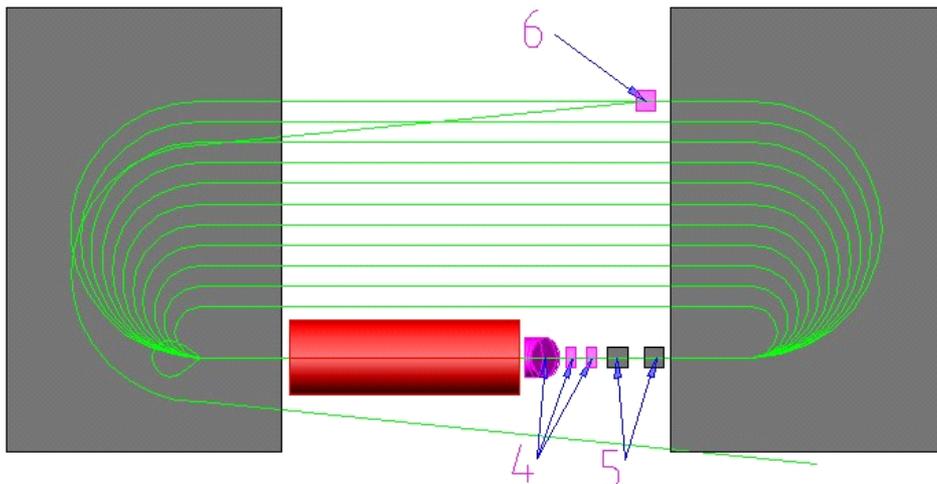
Ускоритель с большой яркостью пучка:

Выходная энергия	5 - 35 МэВ
Длина сгустка	4 – 1 пс
Частота следования	1 - 150 Гц
Рабочая частота	2,856 MHz
Магнитное поле	0.5 Т

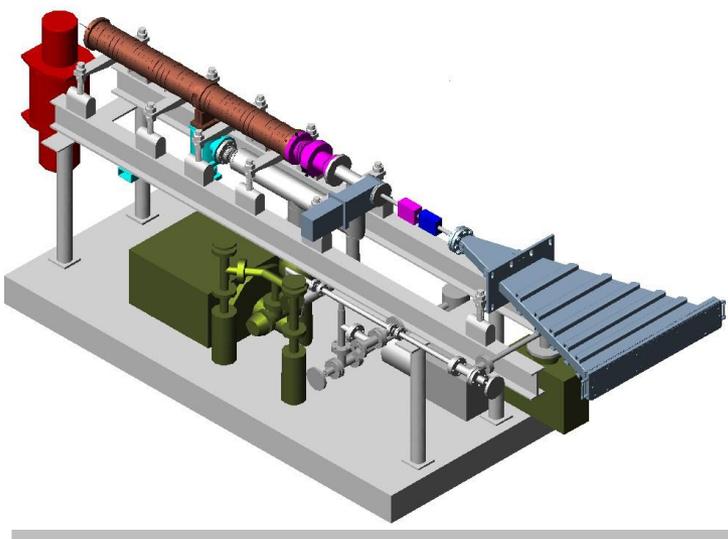


Мощный промышленный ускоритель:

Энергия пучка	1.2 МэВ
Макс. мощность пучка	60 кВт
Рабочая частота	2450 МГц
Размеры модуля	1*0.4*0.7 м3
Вес модуля	70 кг
КПД	30%



Инспекционно - досмотровый комплекс



6/3.5 МэВ линейный ускоритель электронов с поимпульсной модуляцией энергии с коллиматором

Инспекционно - досмотровый комплекс

A603501 2014-05-28 12:57:52 0000022 0017

Изображение 28-05-2014 13:30:30

СКАНТРОНИК
СИСТЕМ

Регулировка контрастности,
выравнивание гистограммы,
гамма-коррекция, сегментация,
фильтрация, установка маркеров,
разделение групп материалов,
определение атомного номера и веса,
определение энергии излучения,
оценка веса составных частей груза.



Решение

Подозрений не выявлено / Подозрения выявлены

Повторная обработка

Обработка

Фильтры

Оконтуривание / Анализ сыпучих грузов

Темные области / Светлые области

Режимы

Инструментарий

Анализ области

Ln e^-

C Al Fe Pb

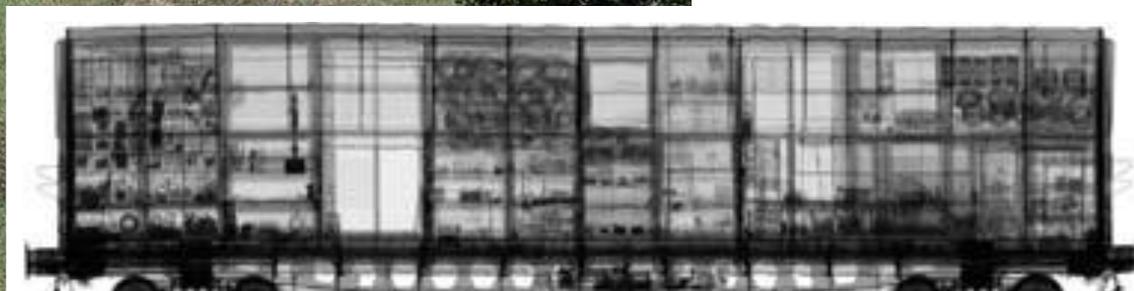
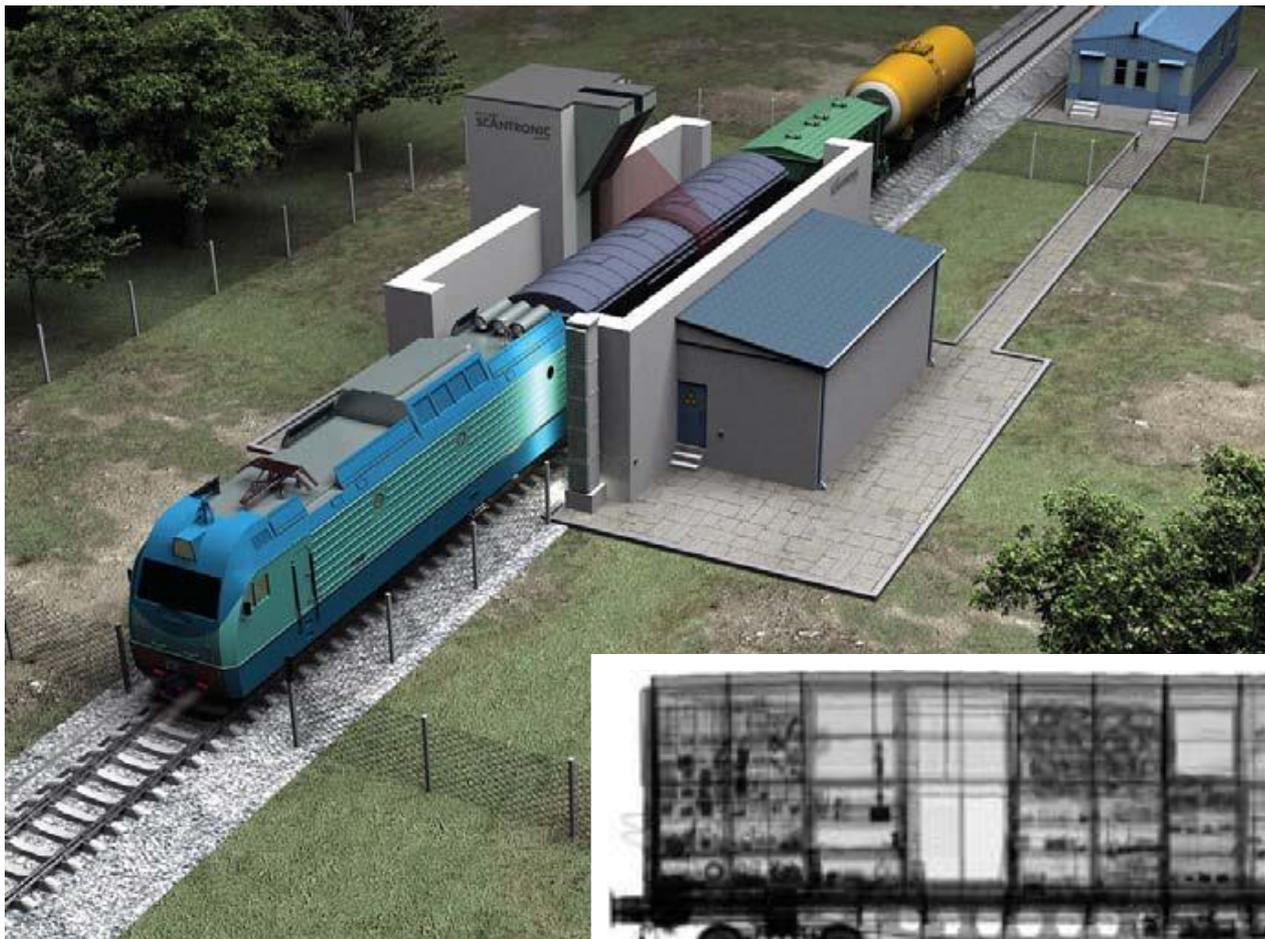
Эксперт

Печать

Скрыть

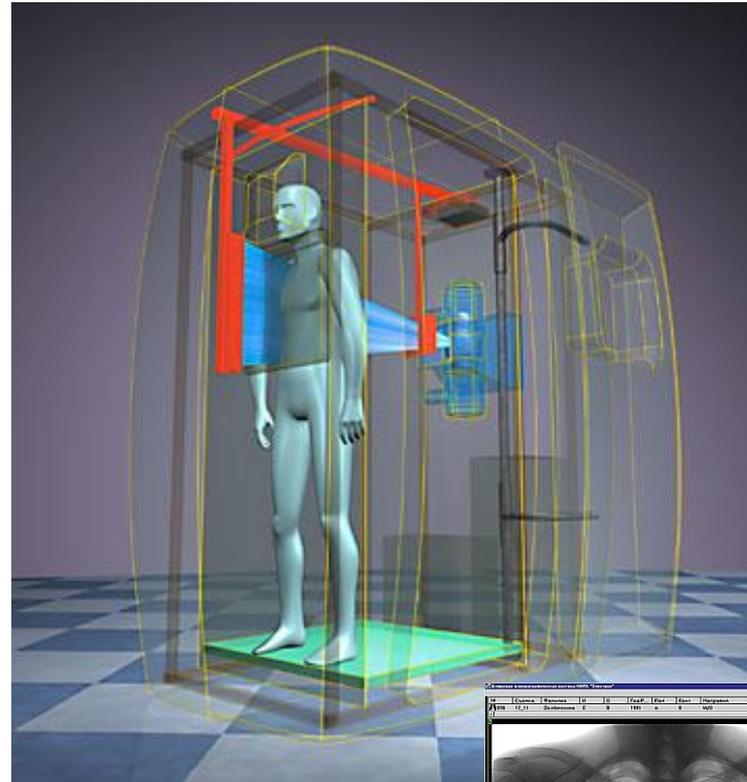
Сброс

Инспекционно - досмотровый комплекс



Скорость поезда при досмотре с распознаванием материалов **до 50 км/час**

Цифровая рентгенология

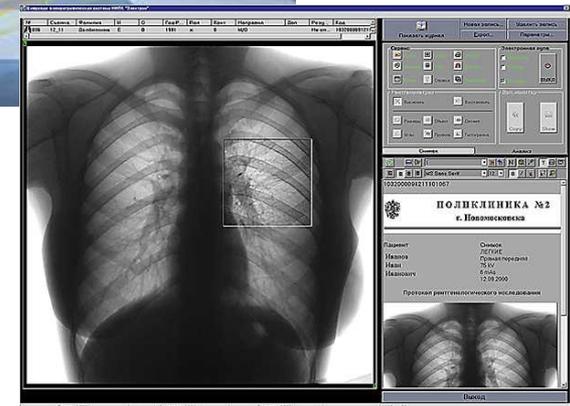


Дозовая нагрузка (снимок)

Пленочная флюорография – 0,5 мЗв

Цифровая флюорография – 0,02 мЗв

Естественный фон – 2,4 мЗв/год



Компьютерная томография (КТ)

В КТ для получения изображения используется рентгеновское излучение. Первый рентгеновский компьютерный томограф был сконструирован в 1969 году английским инженером-физиком Г. Хаунсфилдом и носил название «ЭМИ-сканер» (EMI-scanner). В 1972 году прошли его клинические испытания



Нобелевская премия по физиологии или медицине
1979 г. – А. Кормак, Г. Хаунсфилд. За разработку компьютерной томографии.

Компьютерная томография (КТ)



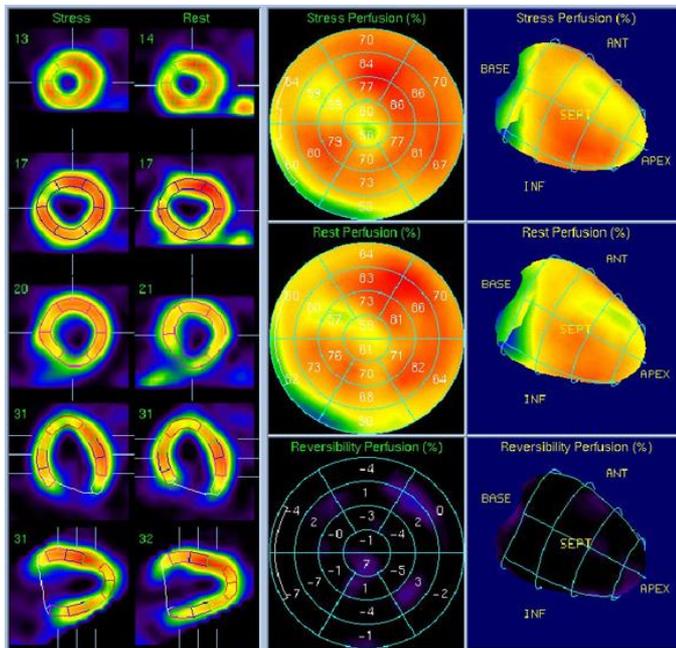
Цикл сканирования одного слоя около
2,5 с.

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

В основе – гамма-излучение радиофармпрепарата

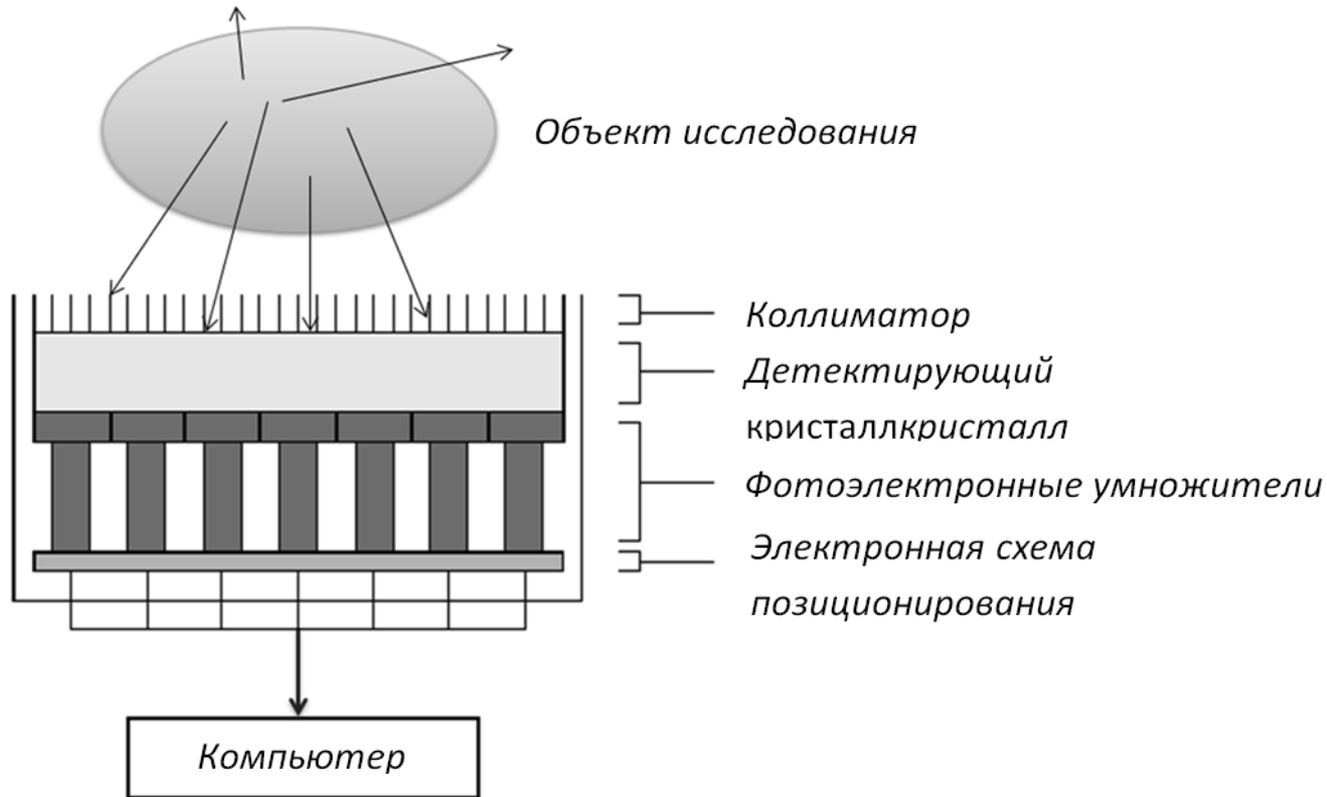
^{99m}Tc , ^{201}Tl , ^{123}I , ^{131}I , ^{111}In и ^{67}Ga

РФП для ОФЭКТ готовят преимущественно на ядерных реакторах, что обеспечивает относительную дешевизну исследования.



Миокард. **^{99m}Tc , ^{82}Rb , ^{201}Tl**

1958 год. Х. Ангер (Беркли, Калифорния, США) : **Гамма-камера** – прибор для создания двумерного изображения распределения гамма-источников в исследуемом объекте.



Структура гамма-камеры позволяет использовать для реконструкции изображения только гамма-кванты выделенного направления, что в свою очередь позволяет определить положение источника излучения в пространстве

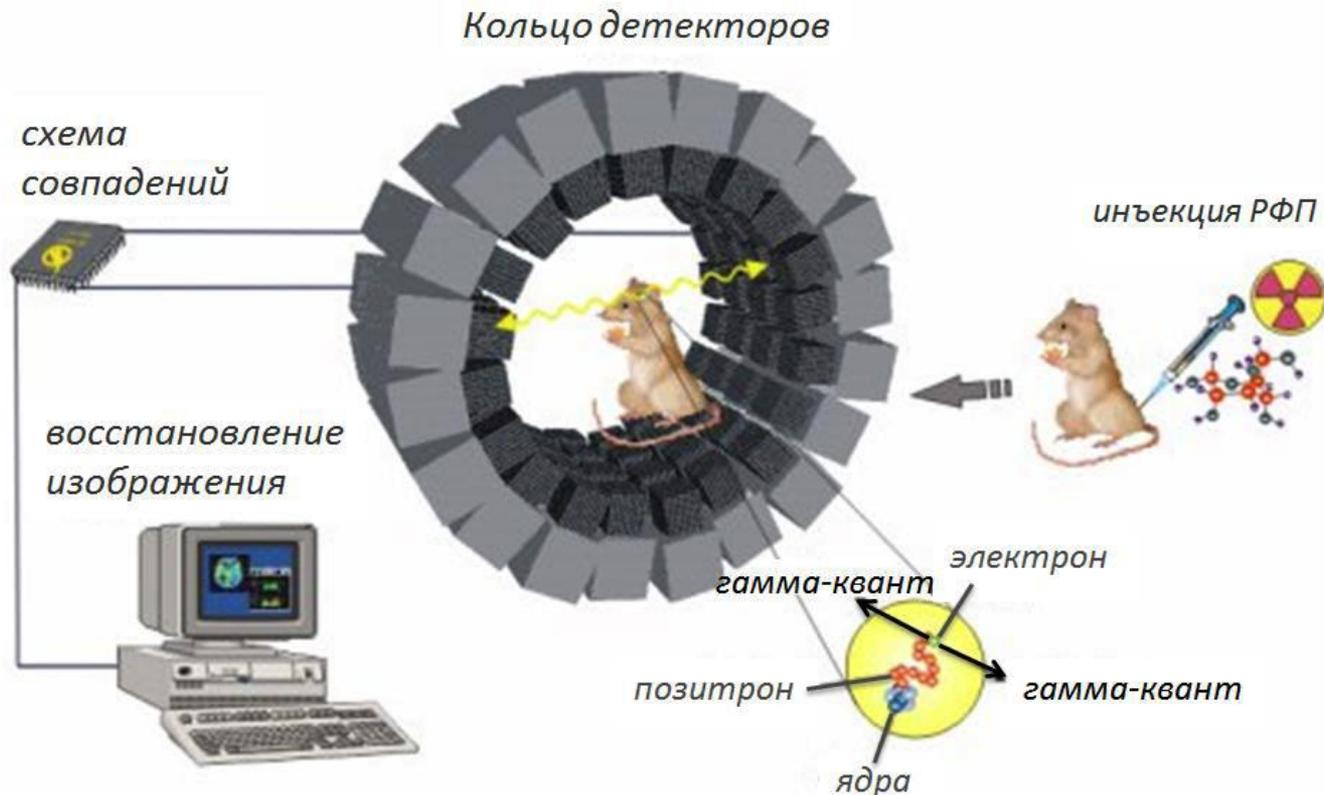


ОФЭКТ состоит из двух подвижных блоков. Первый блок – детектирующая система, которая состоит из одной, двух, трех или более гамма-камер, которые вращаются вокруг пациента для получения томографического изображения. Второй блок – стол, перемещающийся в горизонтальной плоскости. Детекторы могут менять взаимное расположение для удобства снятия информации разных локализаций объекта.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)

Метод радиоизотопной диагностики, позволяющий получать информацию о функционировании выбранного органа или всего тела путём регистрации позитронов (e^+), испущенных введенным РФП.

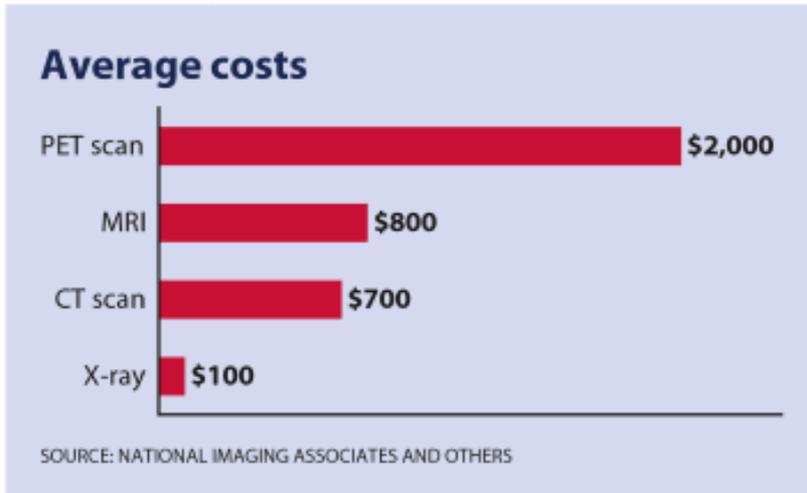
^{18}F , ^{82}Rb , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N



Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)

Для ПЭТ используются короткоживущие изотопы, получаемые на циклотронах. ПЭТ центр включает в себя

- циклотрон для производства изотопов,
- радиохимическую лабораторию для приготовления радиофармпрепаратов
- ПЭТ установки.



(+) Низкая доза при исследовании. Краткий период полураспада изотопов

(-) Стоимость обеспечивающей инфраструктуры во много раз превосходит стоимость аппаратуры. Огромная стоимость владения. 46

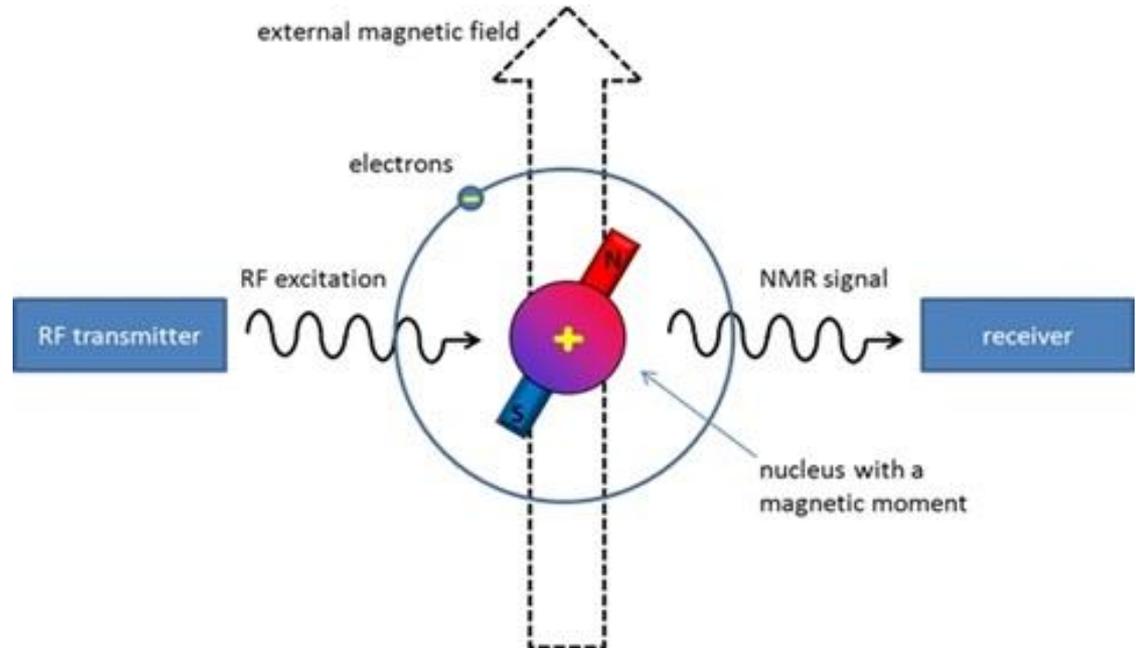
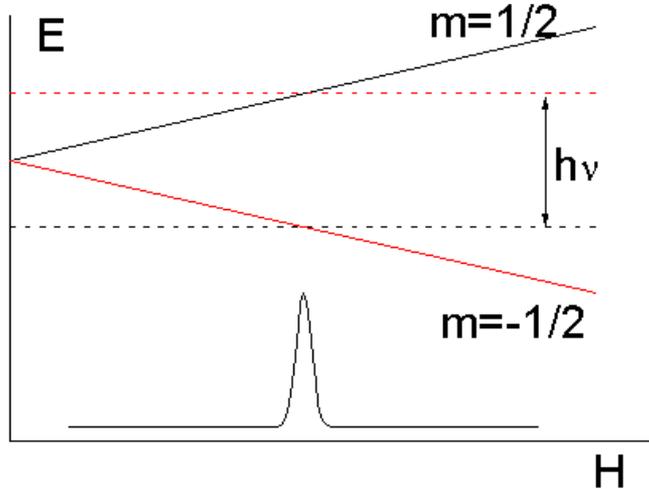
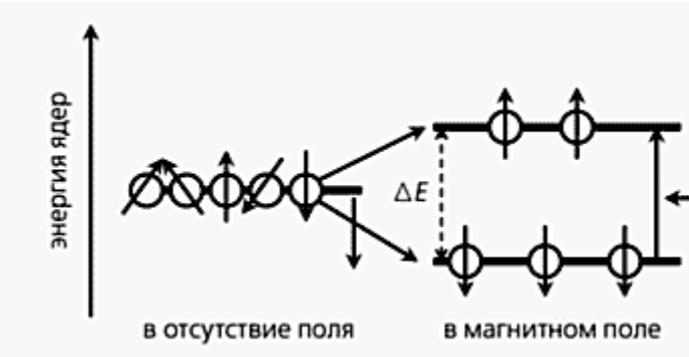
Магнитно-резонансная томография (МРТ)

Ядра атомов при помещении их в магнитное поле способны поглощать энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия РЧ импульса. При этом напряженность постоянного магнитного поля и частота радиочастотного магнитного поля должны строго соответствовать друг другу (резонанс).

Наиболее интересными для медицины являются ядра водорода (^1H), углерода (^{13}C), натрия (^{23}Na) и фосфора (^{31}P), так как все они присутствуют в теле человека. Современные МР-томографы (МРТ) чаще всего «настроены» на ядра водорода, то есть позволяют получить трехмерную карту распределения ядер водорода в теле пациента.

МРТ является конкурентом компьютерной томографии. В отличие от КТ, МРТ хорошо отображает мягкие ткани, тогда как КТ лучше визуализирует костные структуры. Кроме того магнитно-резонансный метод незаменим при обследовании головного и спинного мозга. Современные методики МРТ делают возможным без хирургического вмешательства исследовать функцию органов — измерять скорость кровотока, тока спинномозговой жидкости, видеть активацию коры головного мозга при функционировании органов, за которые отвечает данный участок коры.

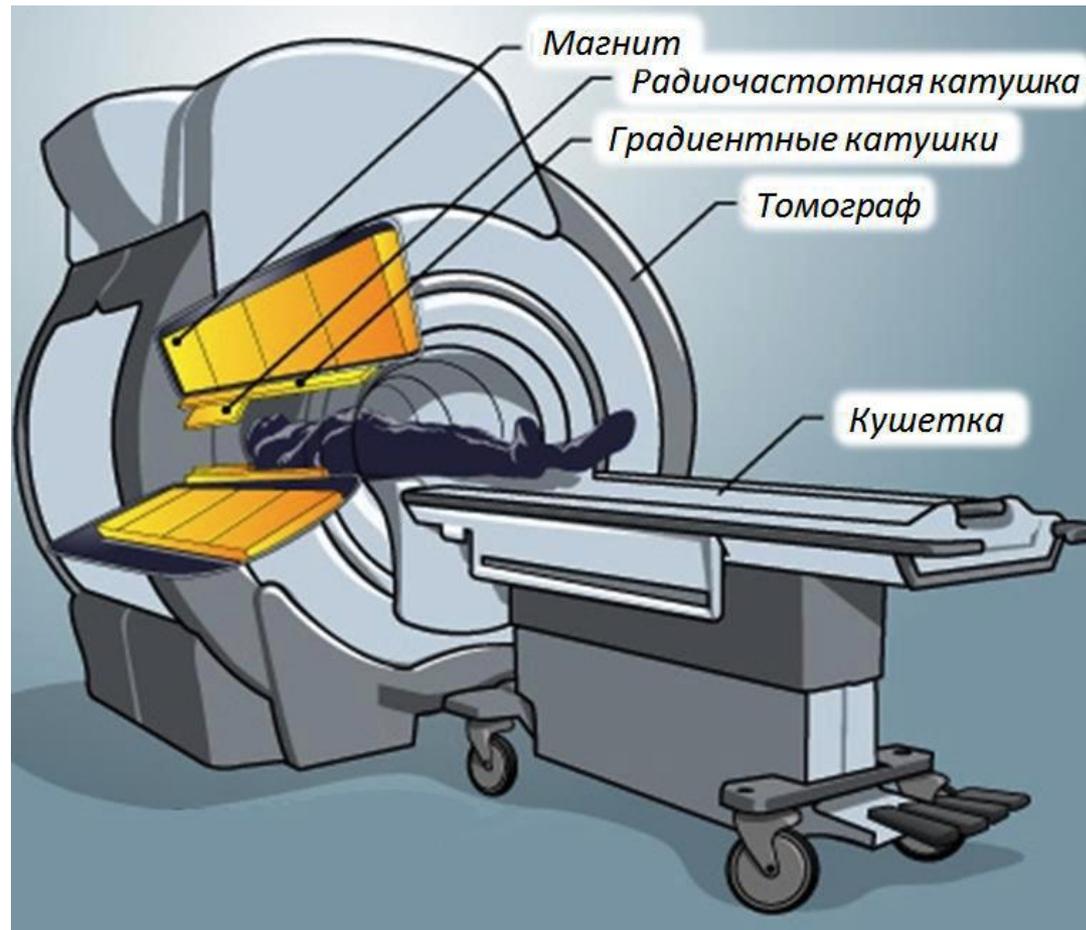
Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)



Нобелевская премия по физике

1952 г. – Ф. Блох, Э. Парсел. За развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия.

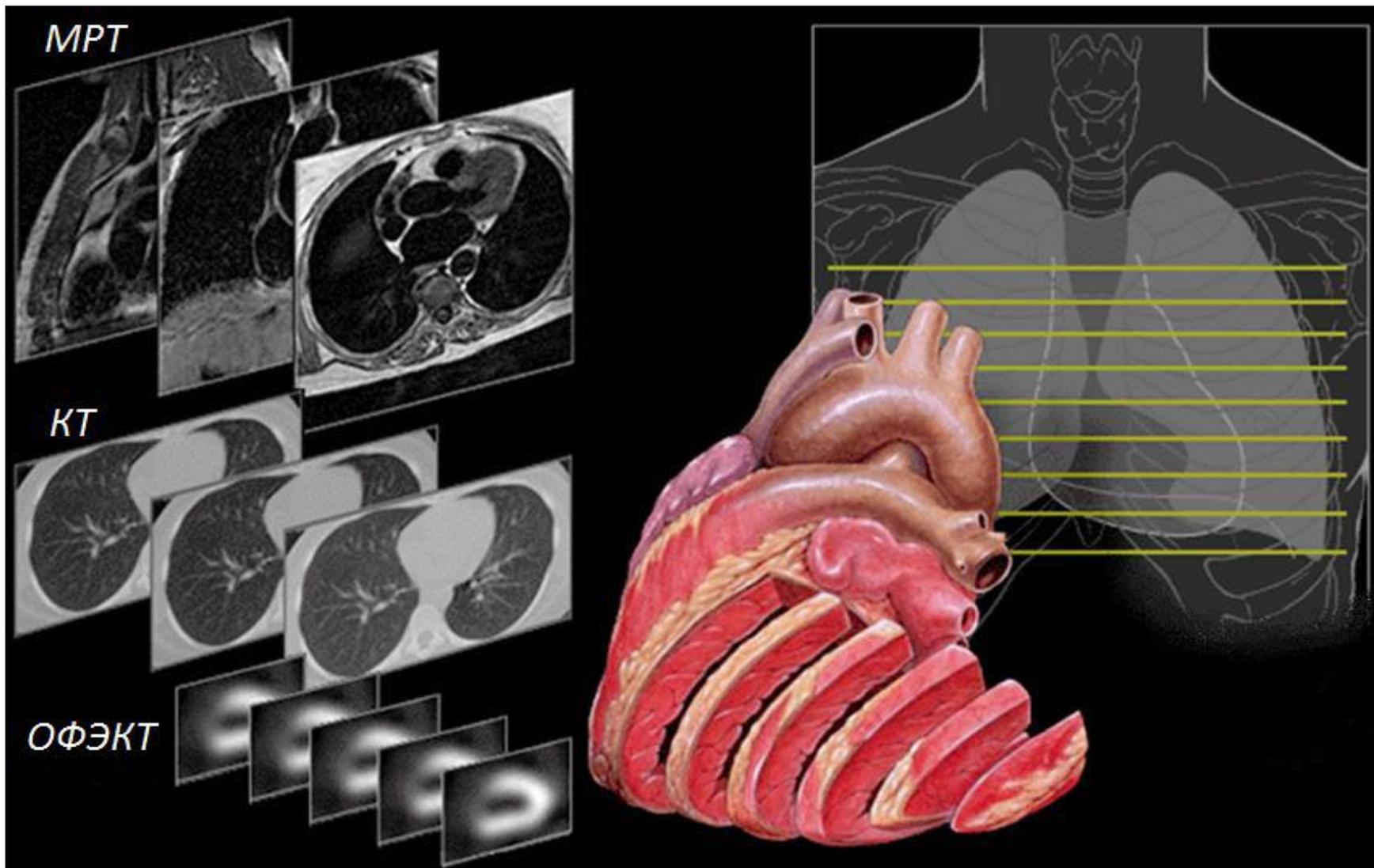
Магнитно-резонансная томография (МРТ)



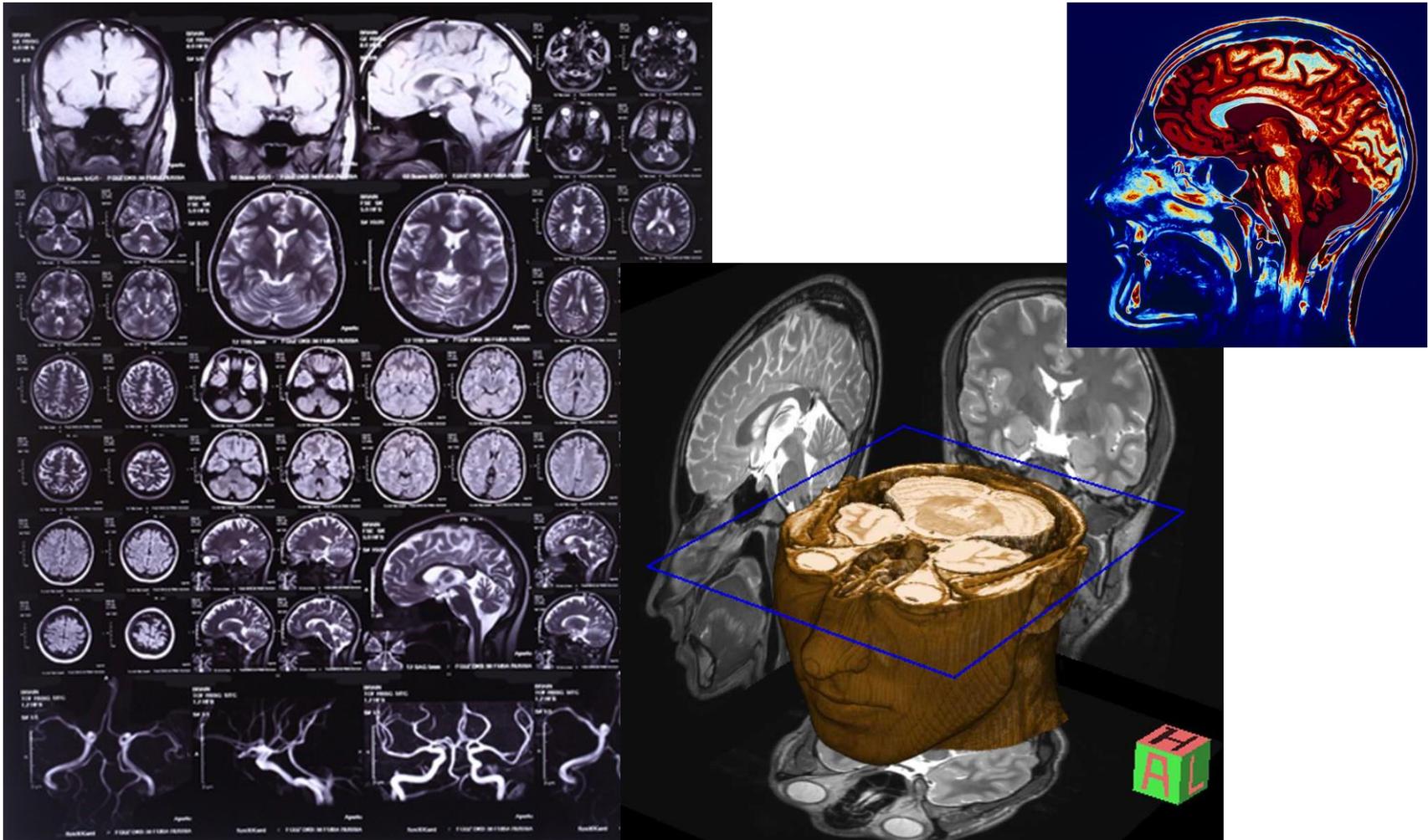
Нобелевская премия по физиологии или медицине

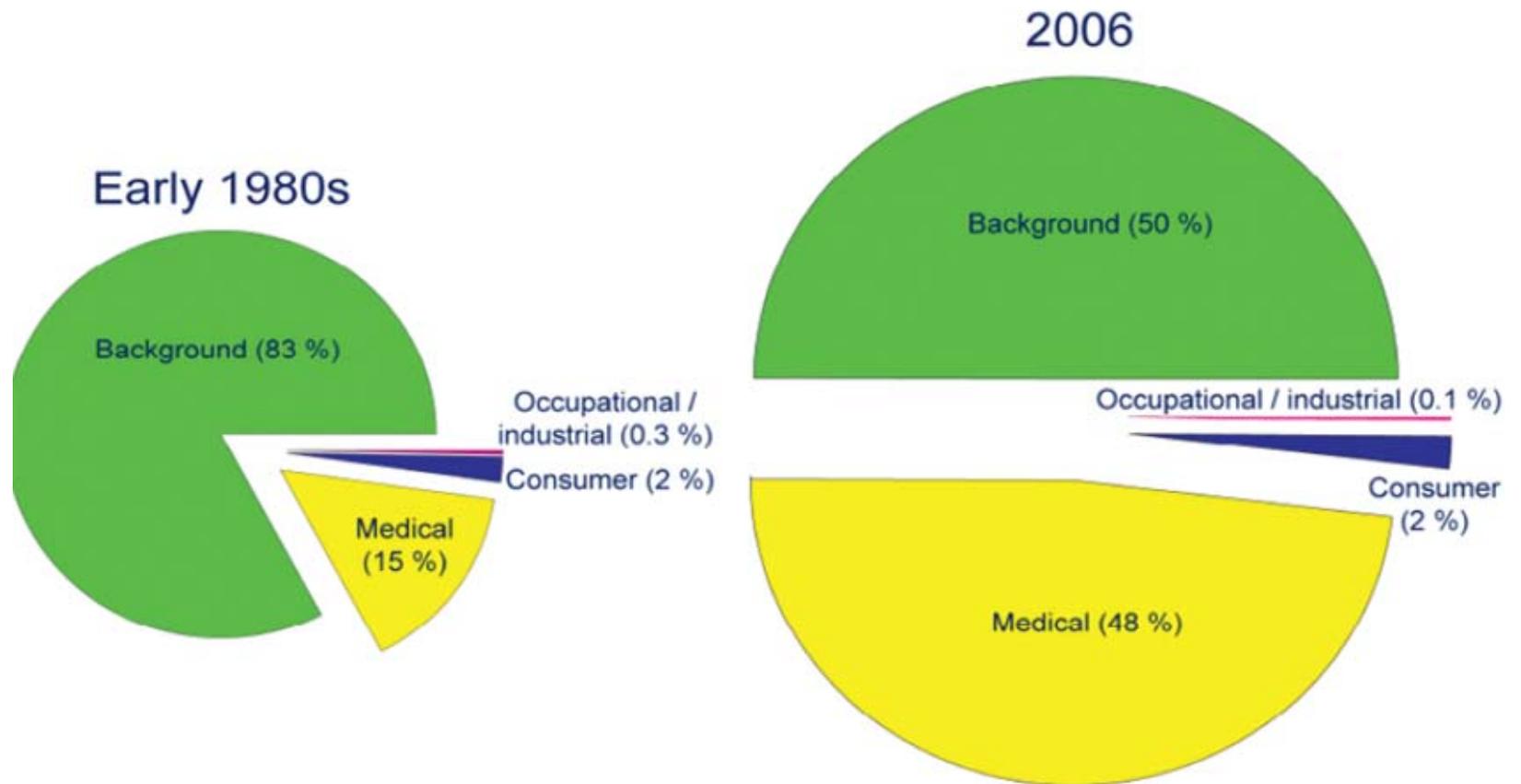
2003 г. – П. Лотербур, П. Мэнсфилд. За изобретение метода магнитно-резонансной томографии.

Магнитно-резонансная томография (МРТ)



Магнитно-резонансная томография (МРТ)





	Early 1980s	2006
Collective effective dose (person-Sv)	835,000	1,870,000
Effective dose per individual in the U.S. population (mSv)	3.6	6.2