Применения разработок физики элементарных частиц в других областях человеческой деятельности.

Ю. Мусиенко

Институт ядерных исследований РАН (Москва)

и

FNAL (Batavia)

Содержание

- *Мотивация*
- *Приборы физики элементарных частиц (ФЭЧ)*

  - ускорители

  - экспериментальные установки для регистрации элементарных частиц (детекторы)
- *Применения ускорителей элементарных частиц*

  - Ионно-лучевая терапия

  - Производство изотопов для медицинских целей
- *Применения детекторов частиц в ядерной медицине*

  - Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (SPECT)

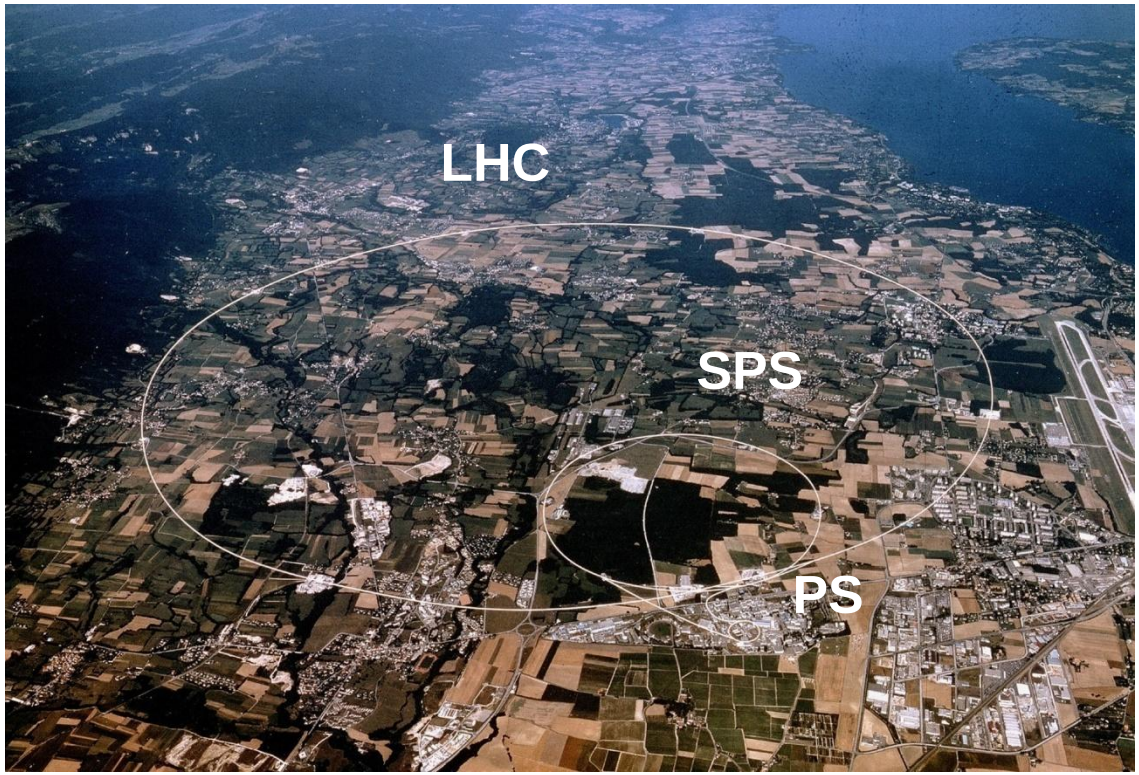
  - Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)
- *Применения детекторов частиц в флюорографии и системах радиографического контроля*
- *Заключение*

Мотивация

Разные мои знакомые часто задают мне один и тот же вопрос: какую пользу приносит человечеству (вариант - народному хозяйству) физика элементарных частиц? В данной презентации я попытаюсь (хотя бы частично) ответить на этот вопрос.

Ускорители ЦЕРНа

Ускорители частиц - современные "микроскопы". Для того, чтобы глубже заглянуть в микромир, нужно повышать энергию и интенсивность пучков частиц (см. лекцию П. Белошитского).



Увеличение энергии → увеличение размеров ускорителя и увеличение магнитного поля для удержания частиц на круговой траектории

Экспериментальная установка ФЭЧ

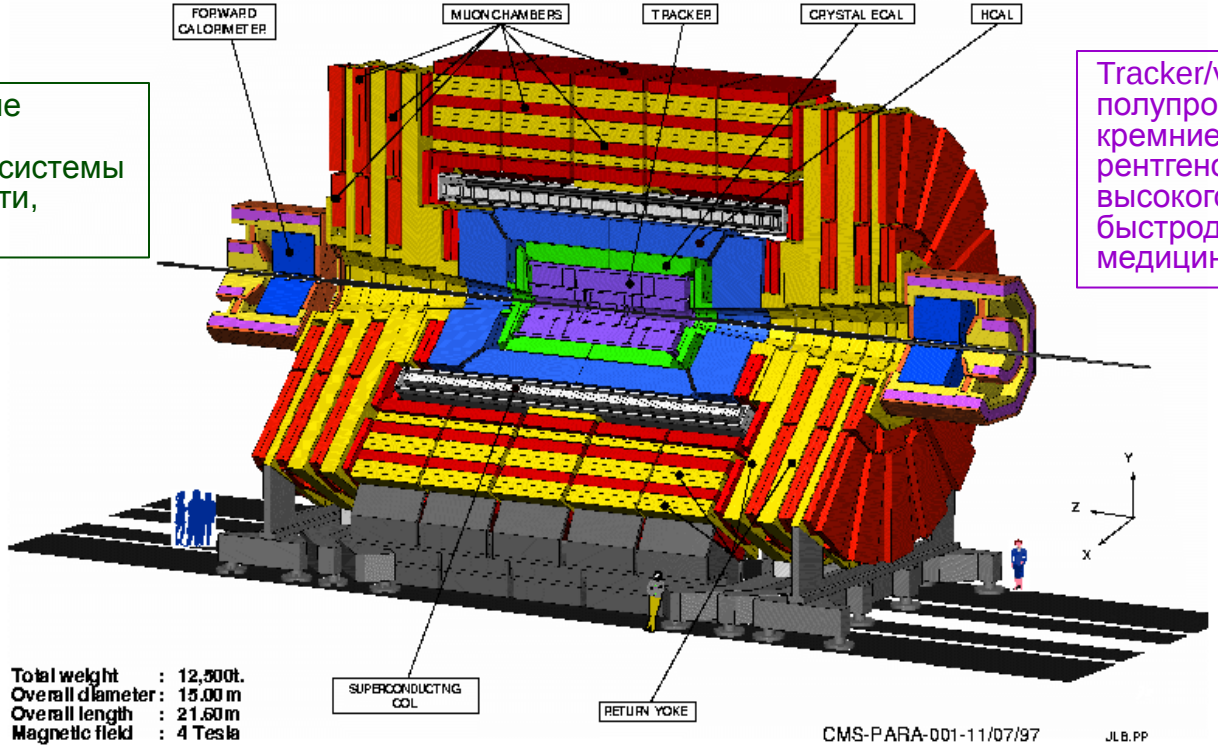
Детекторы ФЭЧ - уникальные достижения современной технологии, созданы для регистрации элементарных частиц → много применений в различных областях науки, техники и медицины

HCAL: фотоприёмники (SiPM) - ядерная медицина, контроль чистоты атмосферы, приборы ночного видения, биолюминесценция

ECAL: сцинтилляционные кристаллы, фотоприёмники (ЛФД) - ядерная медицина, системы контроля и безопасности

Muon chambers: газовые проволочные камеры, резистивные камеры - системы контроля и безопасности, медицина

Tracker/vertex detector: полупроводниковые кремниевые детекторы - рентгеновские камеры высокого разрешения и быстродействия, медицина

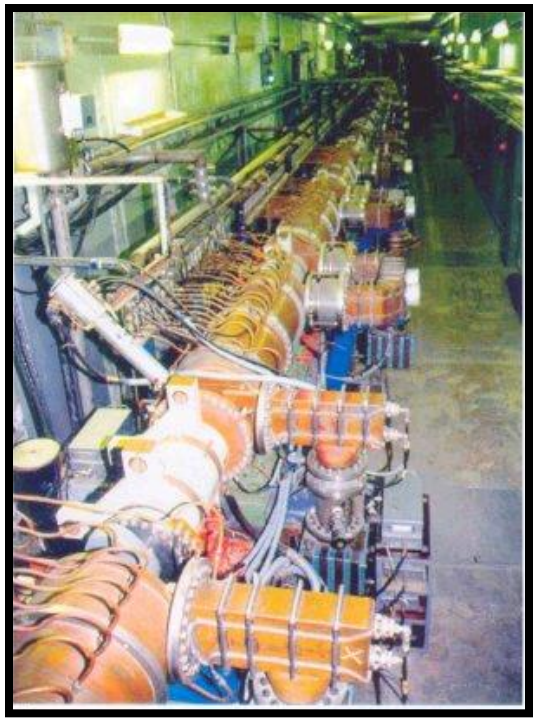


О детекторах ФЭЧ (см. лекцию И. Беляева)

Ускорители частиц

Ускорители бывают линейные и циклические

Линейный ускоритель протонов (E=140-600 МэВ), ИЯИ РАН (Троицк)



Синхрофазотрон в Дубне на 10 ГэВ

Ускорители частиц были изначально разработаны для ядерной физики и физики элементарных частиц. Но оказалось, что у них нашлись применения и в других областях человеческой деятельности (медицине, промышленности и даже в некоторых "экзотических" областях)

Ионно-лучевая терапия

На втором месте
среди причин смертности находятся злокачественные опухоли.
Ежегодно в России рак диагностируется у ≈500 000 человек.
В 1900 году излечиваемость онкологических больных
составляла < 5 проц.,
то в 2000 году она достигла в развитых странах 60 проц.
(в России около 40%).
Лучевая терапия является одним из важнейших методов лечения рака.

В развитых странах лучевое лечение онкологических больных используют в 70% случаев (в основном это электронные ускорители),
в России ~ 20% (в основном ^{60}Co гамма - источники).

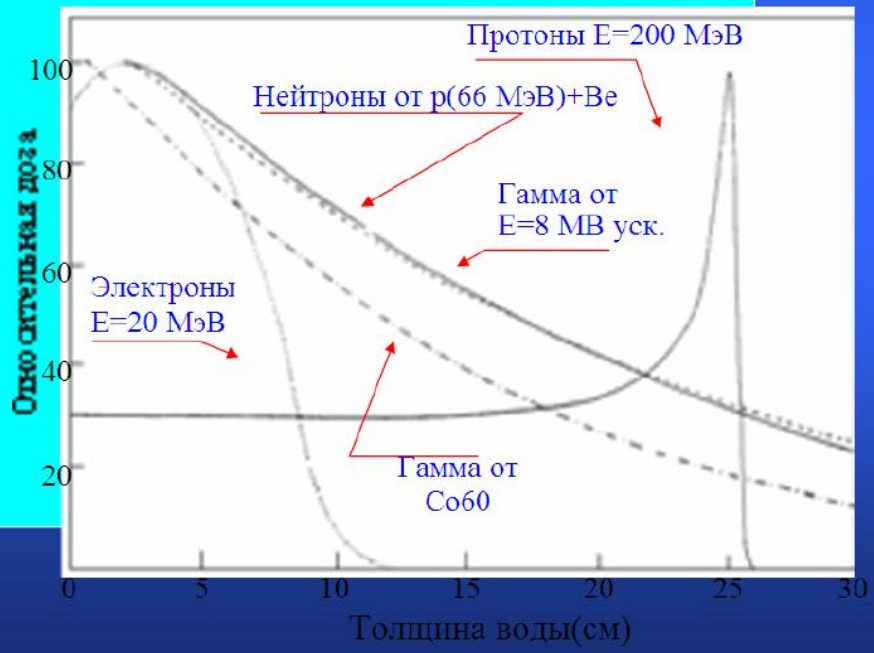
Протоны и ионы: (p, ^{4}He, ^{12}C, ^{16}O, ^{22}Ne, ^{40}Ar)

Три подарка от природы

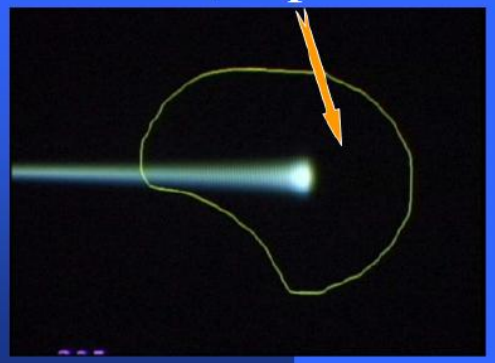
- **Успех ионно-лучевой терапии связан с определенной «толерантностью» живых тканей к облучению для малых значений локализованных потерь энергии (ЛПЭ): способность нормальных тканей к восстановлению ДНК после облучения (миллионы лет эволюции!) – при этом - плохая восстанавливаемость раковых клеток**
- **Тяжелые ионы – большие ЛПЭ - разрушают двойную спираль ДНК – (double strand break) – как для нормальных так и для раковых клеток - «хирургические» или «волшебные» ионы!**
- **При торможении потери заряженных частиц резко возрастают и потом, естественно, падают до 0 – «пик Брэгга» !**

Ионизационные потери протонов и лёгких ядер

Баллистическое преимущество протонов и легких ядер



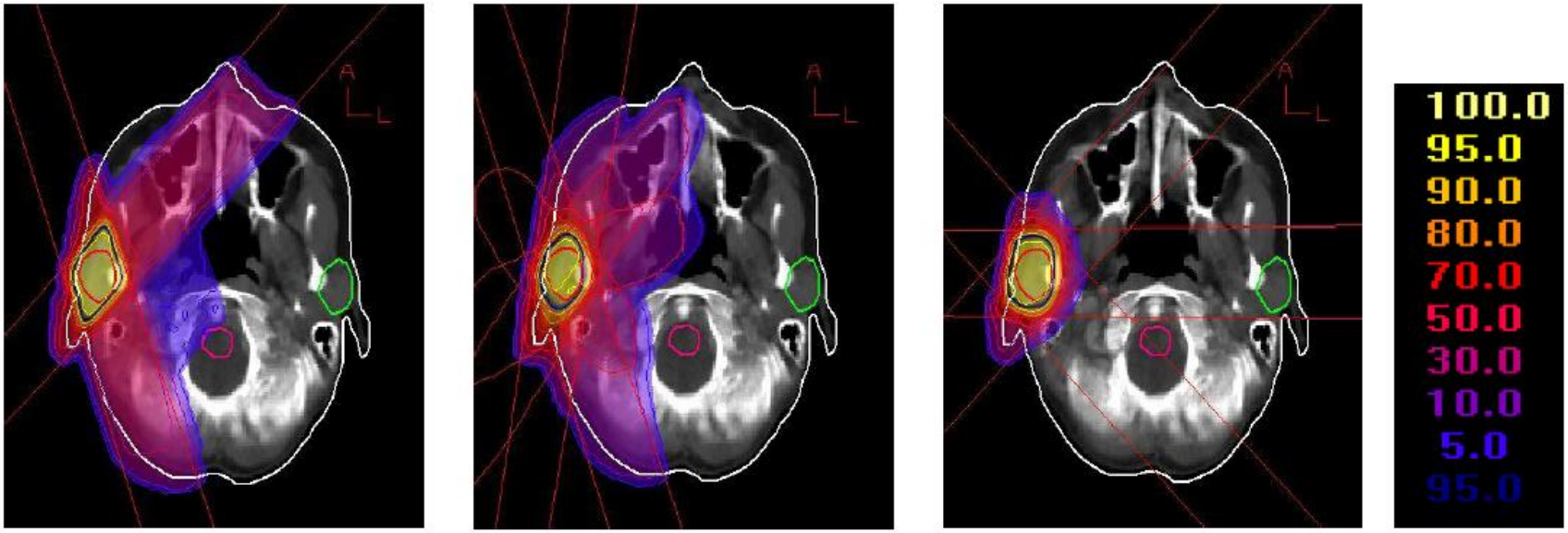
Протоны и легкие ядра имеют четкий пробег, зависящий от энергии, с Брегговским пиком в конце пробега.



Оптимизация дозовых нагрузок и сравнение фотонов и протонов

Пример: фотоны (2 поля и 5 полей) и протоны (3 поля)

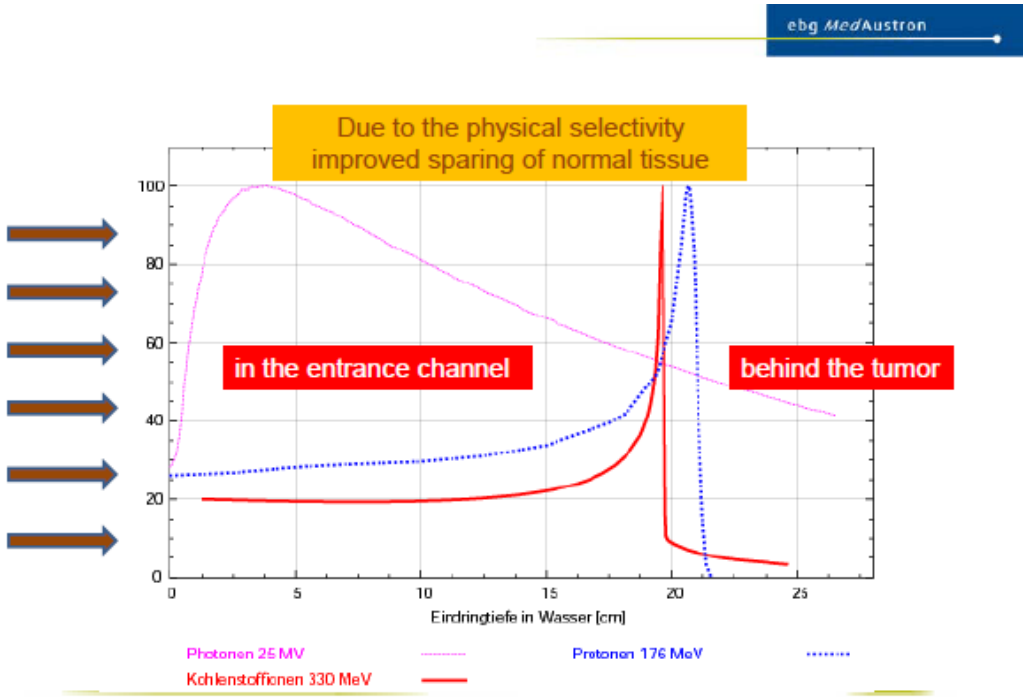
2 fields photons | 5 fields photons | 3 fields protons

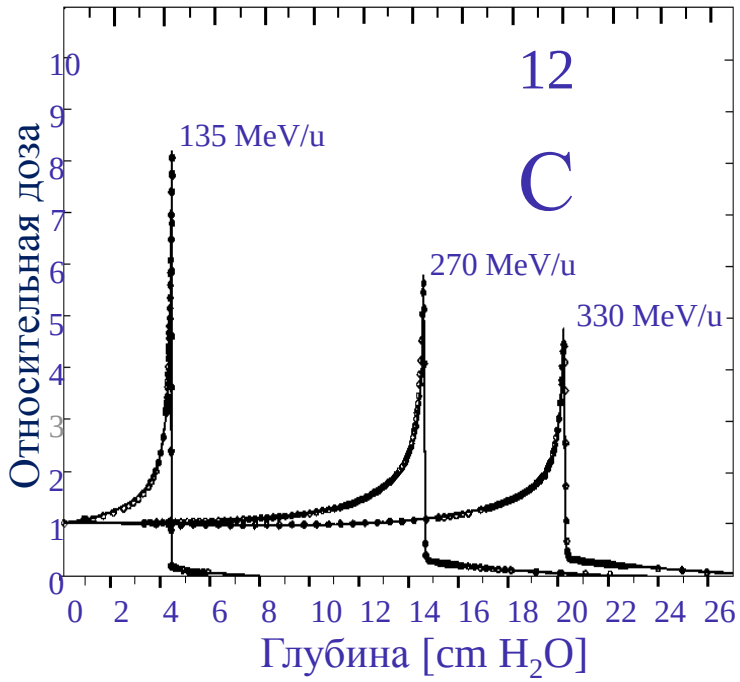


Treatment plan for protons and X-rays

by Universitätskliniken Wien & Innsbruck

^{12}C – «Чудо ион»





- **отношение между эффективной дозой в конце пробега к дозе во входном канале ~5-7– ион ^{12}C - «хирургическая частица»!!!**
- **Дополнительный подарок природы: после пробега в тканях ~14 см поперечный размер пучка 280 МэВ/n ионов ^{12}C – остается практически без изменения**

→^{12}C - очень точный снаряд !!!

Преимущества ионной ^{12}C лучевой терапии

Воздействие на органы, находящиеся вблизи мишени:

- многократное рассеяние для ионов углерода в ≈4 раза меньше, чем для протонов.

Доза облучения:

- отношение между эффективной дозой в конце пробега к дозе во входном канале для ионов углерода больше, чем для протонов.

Биологический эффект:

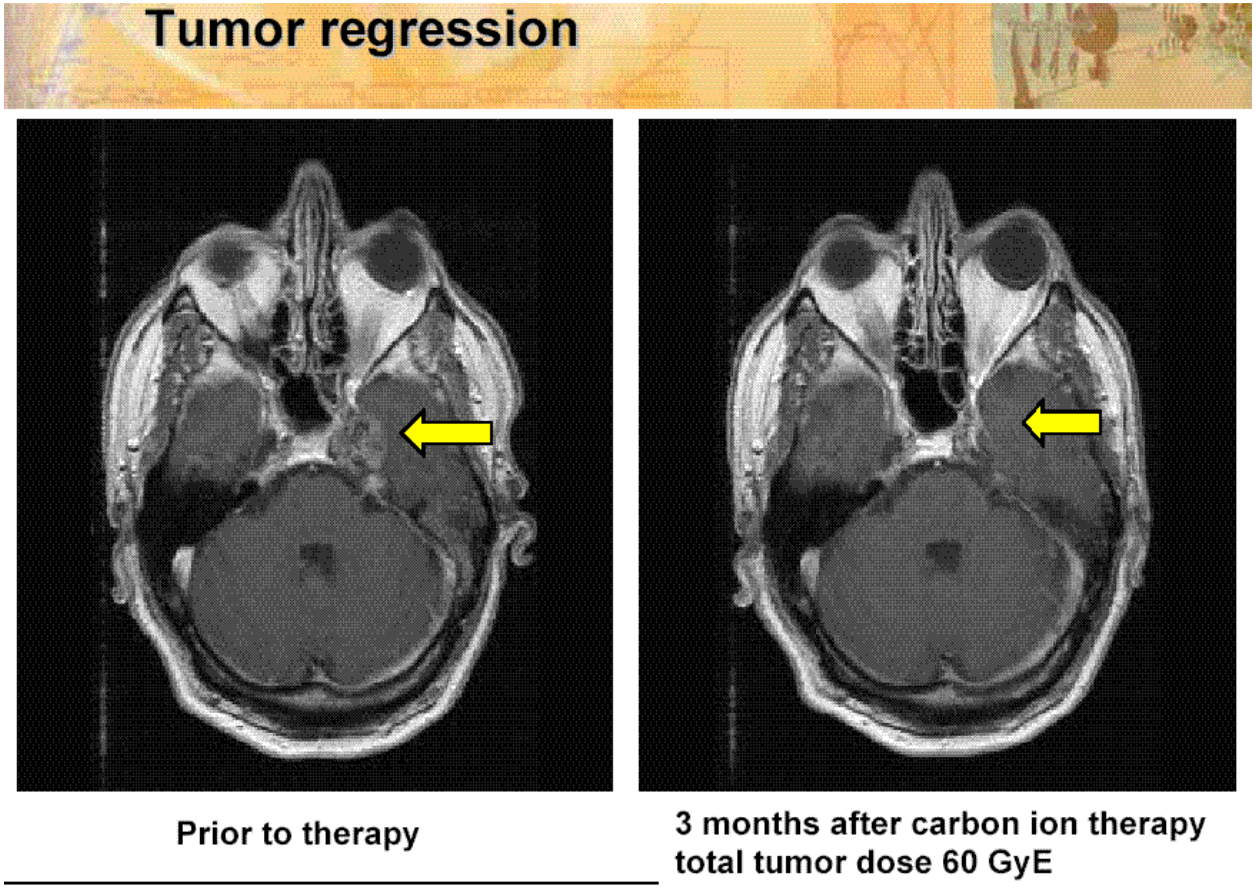
- достигается при меньших общих дозах облучения, чем для протонов;

- подавляет все виды опухолей, включая радиорезистентные, обеспечивая минимальное поражение здоровых тканей.

Уникальная возможность использовать для контроля метод позитронной томографии:

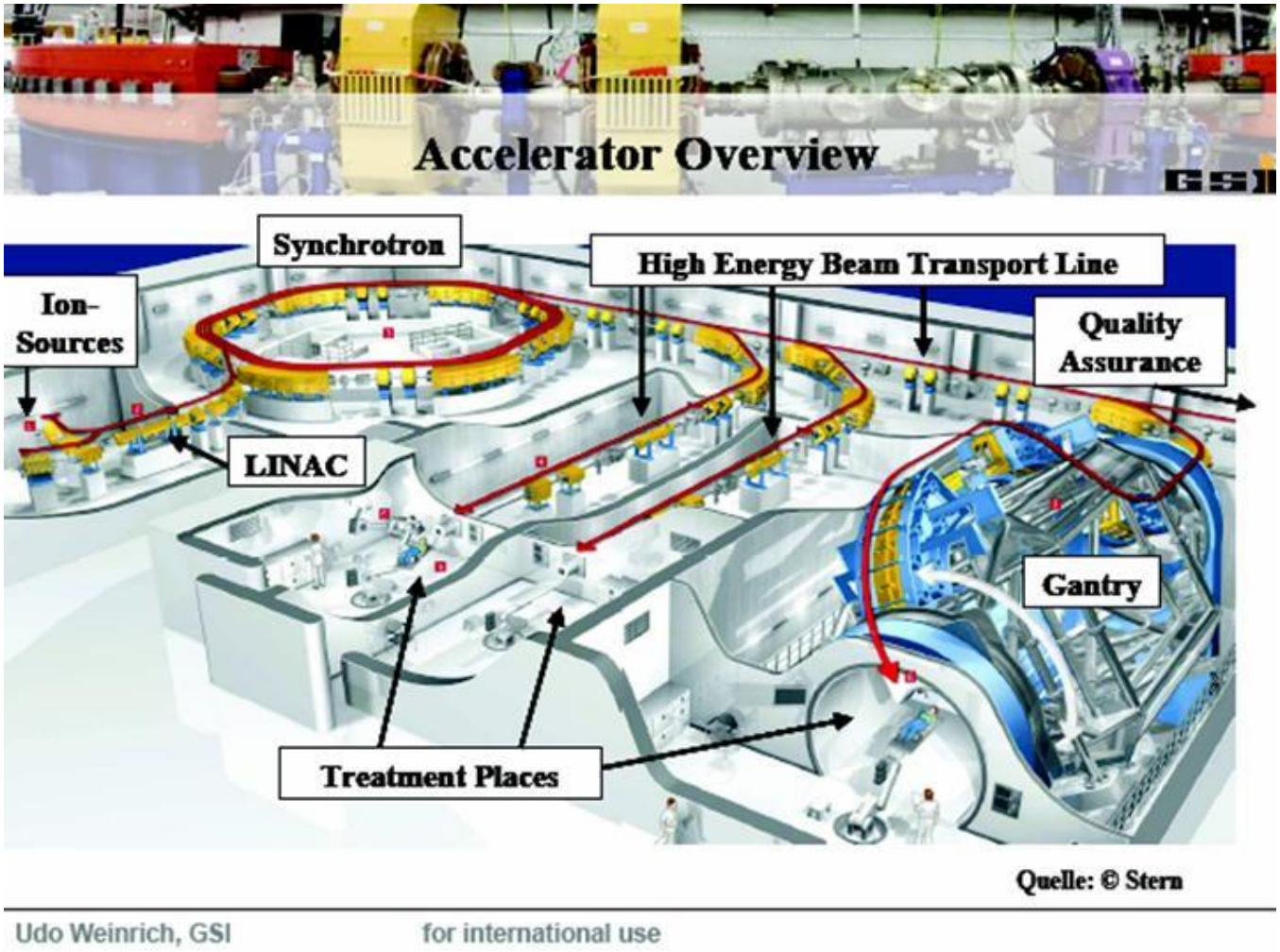
- часть пучка ^{12}C превращается в нестабильные изотопы ^{11}C с выделением позитронов; аннигиляция с электронами рождает γ-кванты, регистрация которых позволяет восстановить распределение остановившихся в мишени частиц.

Ионная (^{12}C) лучевая терапия (практические результаты)



К настоящему времени уже несколько тысяч больных прошли курсы лечения на пучках ионов углерода. Работы по этой тематике проводится в настоящее время в двух странах - Японии и Германии. Уже на практике стало реальностью, что излечиваются до 90% онкологических больных.

Центр адронной терапии в Германии

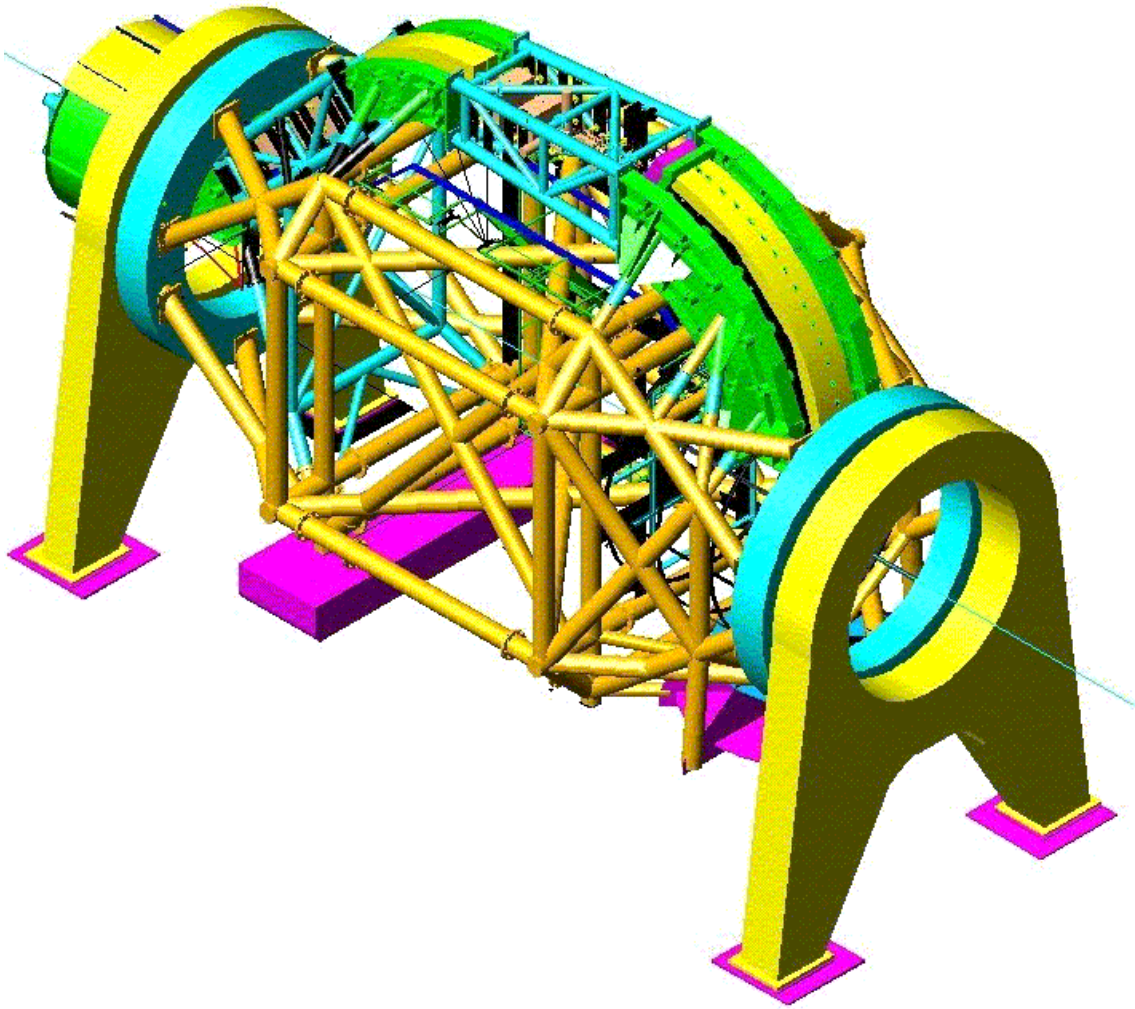


Сканирующий ионный Gantry (GSI)

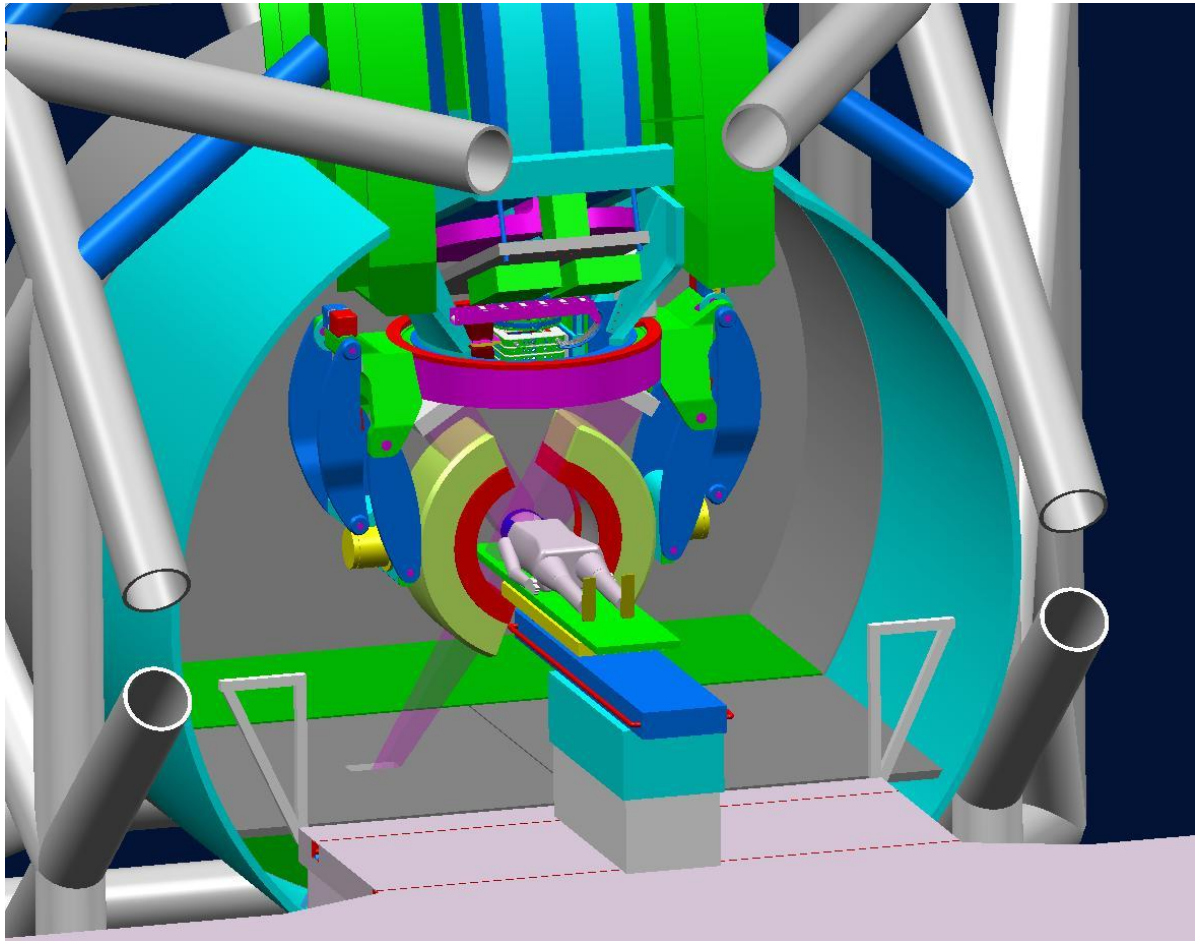
- включает и первое в мире сканирование пучка

- 13m в диаметре
  25m длинной
  600 тонн полный вес
  420 тонн вес поворотной части
  0,5mm max. деформация

- прототип (сегмент) испытан в GSI

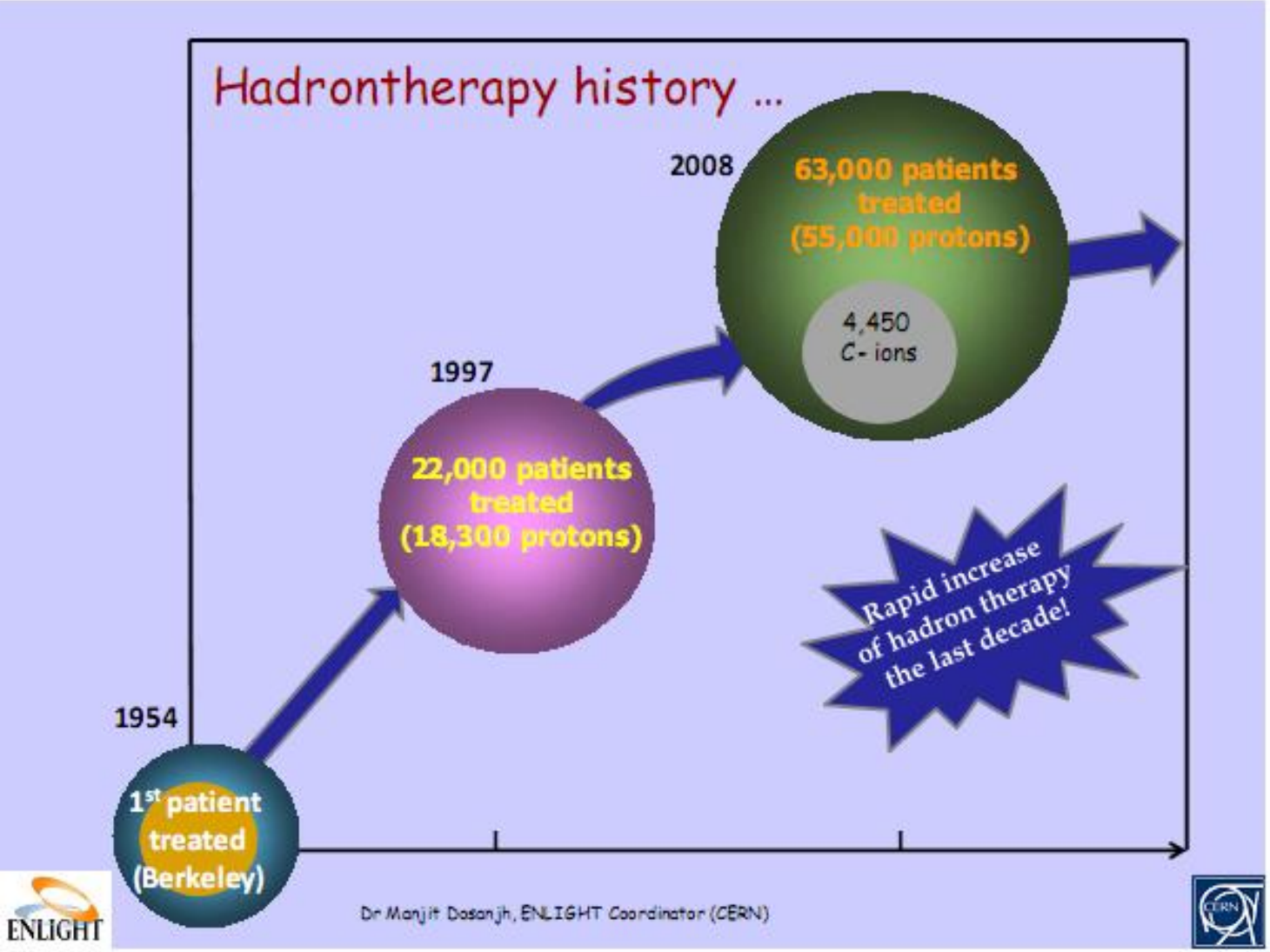


Укладка пациента внутри Gantry

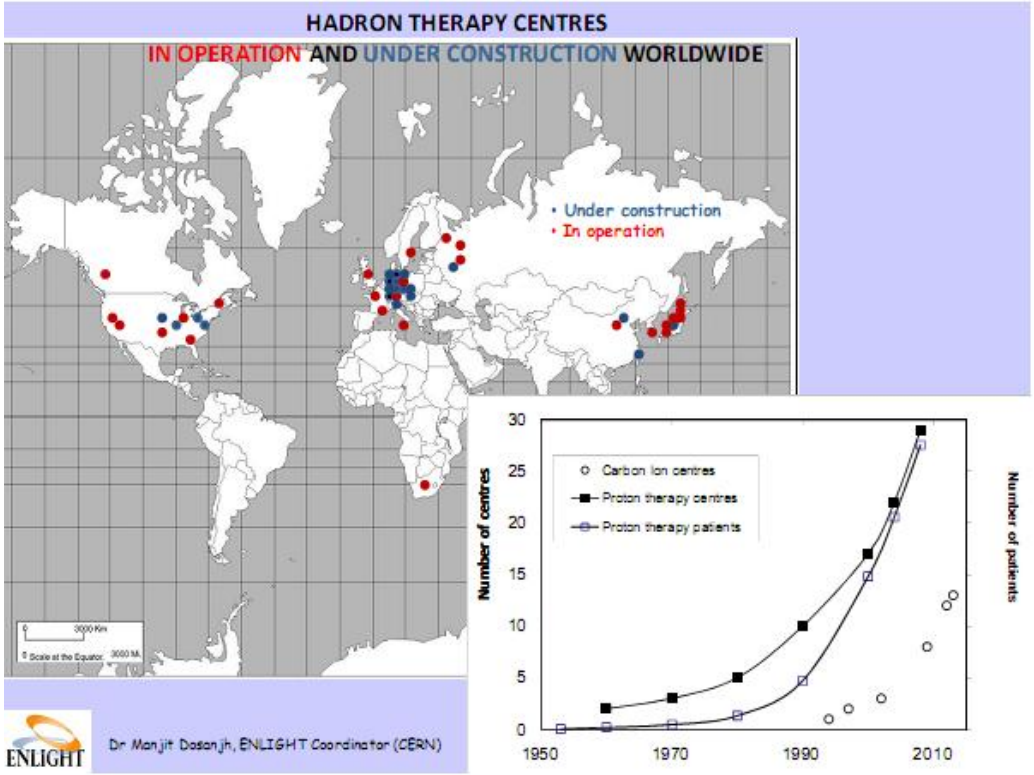


- специальное позиционирование
- интеграция PET и цифровых X-ray систем

Прогресс ионно-лучевой терапии



Крупнейшие центры ионно-лучевой терапии



КРУПНЕЙШИЕ ЦЕНТРЫ ПУЧКОВОЙ ТЕРАПИИ (ЧИСЛО ПАЦИЕНТОВ, ПРОШЕДШИХ ОБЛУЧЕНИЕ >400)

Таблица 1

№	Научный центр	Страна	Пучки	Время действия	Число пациентов
1	Berkley	США	He	1954-1992	2054
2	Harward	США	P	1961-2002	9116
3	**Дубна**	**Россия**	**P**	**1967-2003**	**254**
4	**Москва, ИТЕФ**	**Россия**	**P**	**1969-2003**	**3638**
5	**Гатчина, ПИЯФ**	**Россия**	**P**	**1975-2003**	**1220**
6	PSI	Швейцария	P	1984-2003	4215
7	Cleatterbridge	Англия	P	1989-2003	1201
8	Loma Linda	США	P	1990-2003	8203
9	Nice	Франция	P	1991-2003	1951
10	Orsay	Франция	P	1991-2003	2157
11	HIMAC, Chiba	Япония	C ion	1994-2003	1187
12	GSI, Darmstadt	Германия	C ion	1997-2003	172
13	Tsukuba	Япония	P	2001-2003	237

… в настоящее время ведутся также работы в ИЯИ АН (Троицк), проектируется центры в Димитровграде, в Санкт-Петербурге , Дубне, Пущино и Протвино

Пучки протонов и ионов в ИФВЭ

	Протоны (реализовано)	Ионы C^{+6} (проект)
Е нач.	30 МэВ	16,6 МэВ/нуклон
Е кон.	от 200 МэВ до 1300 МэВ	420 МэВ/нуклон
Интенсивность	$5 \cdot 10^{11}$	$>10^{9}$
Частота работы	~1 Гц	

Центры с пучками протонов и ядер углерода построены и планируются в Японии, Европе, Китае. Планируется построить такой центр и в Протвино (ИФВЭ)

Радиологический центр ИЯИ РАН

Основная задача:

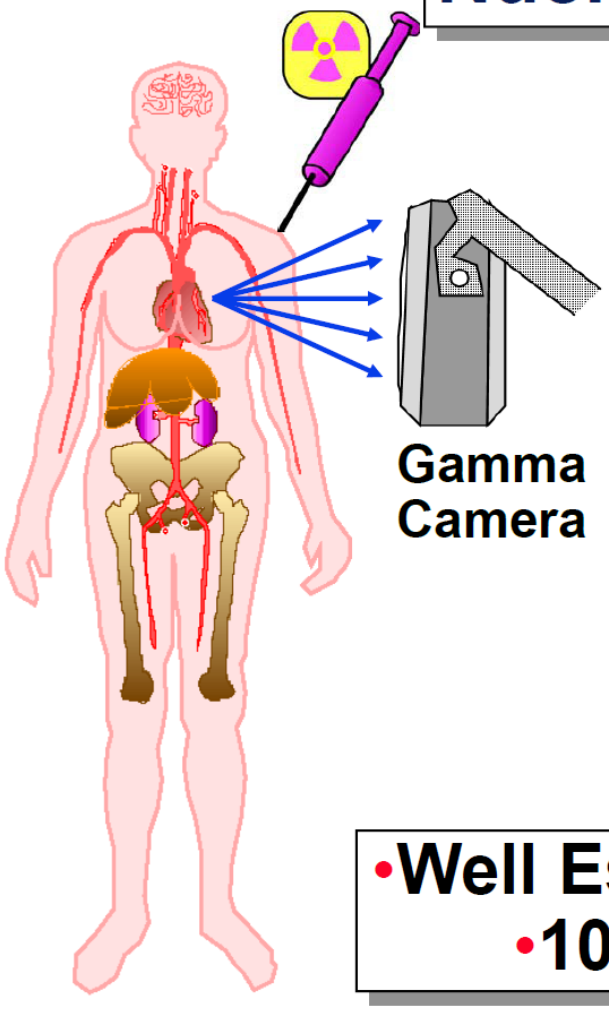
- облучение злокачественных опухолей протонами самостоятельно или в сочетании с облучением фотонами.

Базовые установки:

- линейный ускоритель протонов ММФ ИЯИ (энергия 74 –247МэВ),
- линейный ускоритель электронов СЛ-75-5-МТ (энергия до 6МэВ). В состав Центра также входят:
- канал транспортировки протонов, 2 камеры облучения (с фиксированным горизонтальным пучком протонов и фотонами),
- амбулатория на 50 пациентов в день,
- рентгеновская лаборатория.

Принципы ядерной медицины

Nuclear Medicine

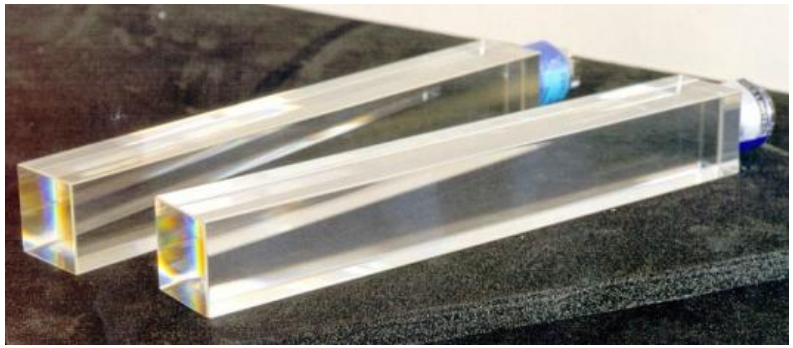


- Patient injected with *small* amount of radioactive drug.
- Drug localizes in patient according to metabolic properties of that drug.
- Radioactivity decays, emitting gamma rays.
- Gamma rays that exit the patient are imaged.

•Well Established Clinical Technique
•10 Million Studies Annually

Вклад ФЭЧ

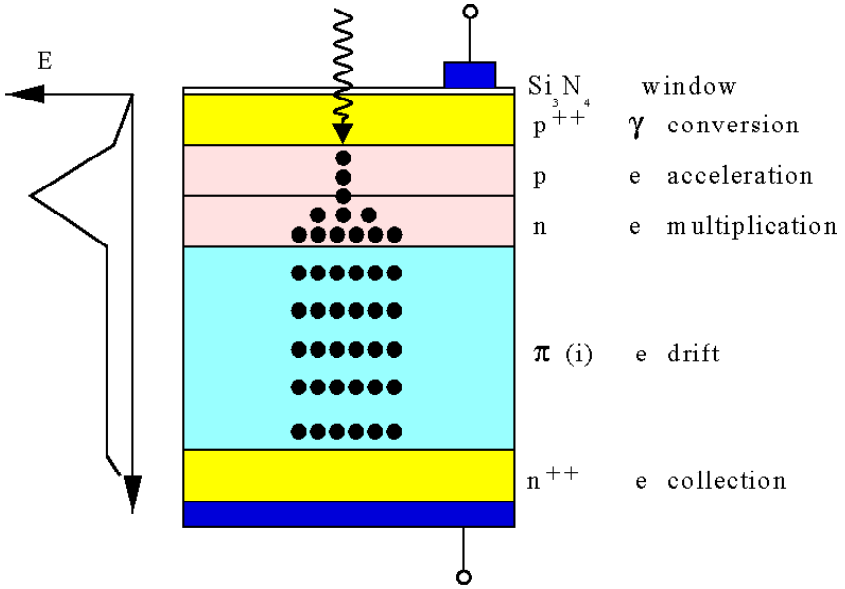
- Радиоизотопы ("меченые атомы") производятся на ускорителях частиц (^{18}F, ^{99}Tc ^{103}Pd, ^{82}Sr, ^{67}Cu , ^{117}Sn ...)
- В гамма-камерах используются сцинтилляционные кристаллы (BGO) и фотоприёмники (ЛФД), разработанные для ФЭЧ
- Для получения качественных изображений используются программные алгоритмы, разработанные для экспериментов ФЭЧ

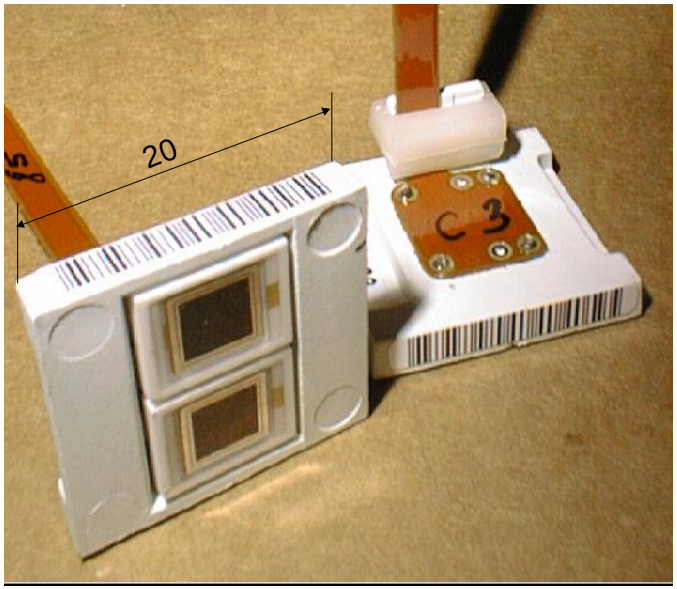


Кристаллы BGO ($Bi_3Ge_4O_{12}$ обладают очень высокой плотностью (7.1 г/см^3) и высоким световыходом (8200 фотонов/МэВ) - отличный сцинтиллятор для ФЭЧ и ядерной медицины

Электромагнитный калориметр эксперимента L3 (LEP, ЦЕРН), 12 000 кристаллов BGO

Кремниевые лавинные фотодиоды (ЛФД) электромагнитного калориметра CMS





Лавинные фотодиоды (ЛФД) - это фотодиоды, сконструированные таким образом, что внутри них можно создать такие высокие напряжённости электрического поля (2-3*10^5 В/см), при которых в кремнии возникает процесс ударной ионизации (лавинное размножение электрон-дырочных пар).

Параметры ЛФД CMS

Напряжение : 400 В

Коэффициент усиления : 50 - 500

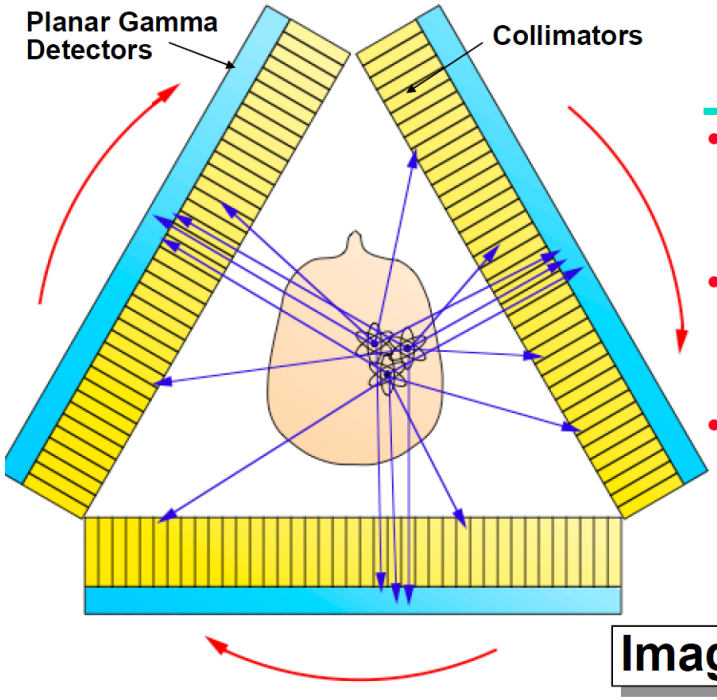
Квантовая эффективность (420 нм) - 70%

ЛФД могут работать в очень сильных магнитных полях (>8 Тл)

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (SPECT)

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (SPECT) - один из наиболее распространённых методов ядерной медицины

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



- One, two, or three imaging heads (cost / performance tradeoff)
- Direction of gamma defined by mechanical (parallel hole) collimators.
- Multiple views obtained by rotating the imaging heads around the patient.

Images 140 keV Photons

Медицинские препараты, содержащие радиоизотопы, вводятся в кровь. Препараты подбираются таким образом, чтобы они концентрировались в областях тела, определяющих ту или иную болезнь. Затем делается 3-D сканирование и определяются места скопления радиоизотопов. Качество изображения сильно зависит от размера коллиматоров. Но для получения чёткого изображения требуется вводить большое количество радиоизотопов → опасно для здоровья.

Перечень SPECT изотопов

Radiotracer	Half-life (hours)	γ-ray energy (keV)	Clinical application
^{99m}Tc	6.0	140	various
^{67}Ga	76.8	93, 185, 300, 394	tumour detection
^{201}Tl	72	167, 68–82 (X-rays)	myocardial viability
^{133}Xe	127.2	81	lung ventilation
^{111}In	67.2	171, 245	inflammation

Изотопы производятся на специальных ускорителях. Ускорители находятся в центрах, в которых имеется также и радиохимическая лаборатория, в которой изготавливаются медицинские препараты, содержащие "меченые" атомы.

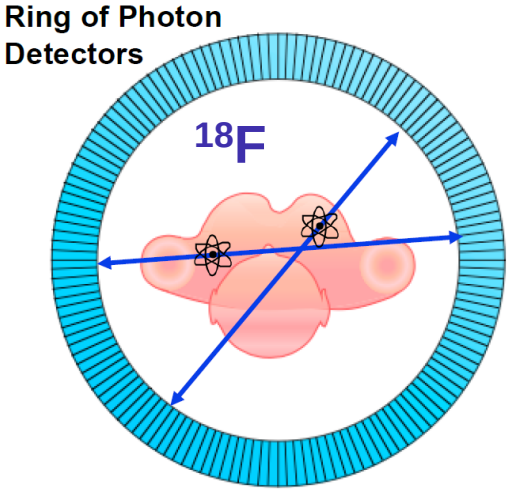
SPECT – сканеры в работе

A whole-body scan, made from a composite of ten different scans, showing the uptake of ^{99m}Tc-methylenediphosphonate within the body. The faint background is due to Compton-scattered γ-rays.

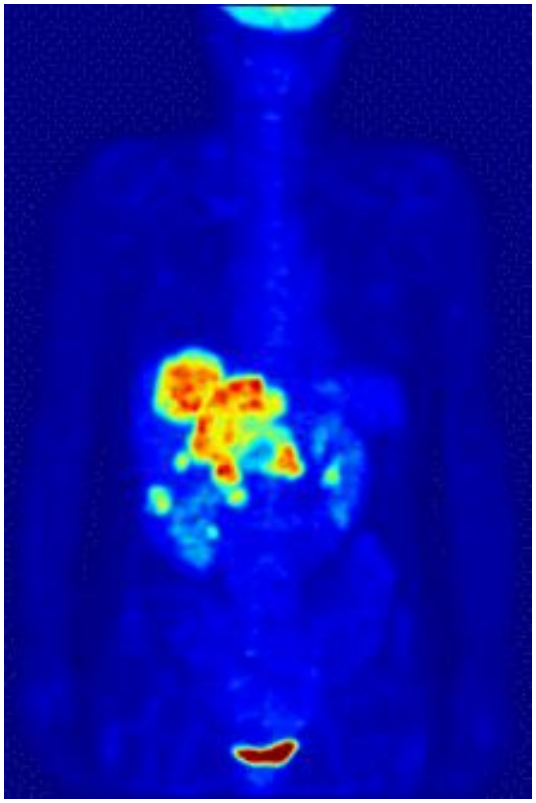
Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) — радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием.

Positron Emission Tomography (PET)



- Radionuclide decays by emitting a positron (β^+).
- β^+ annihilates with e^- from tissue, forming back-to-back 511 keV photon pair.
- 511 keV photon pairs detected via time coincidence.
- Positron lies on line defined by detector pair.

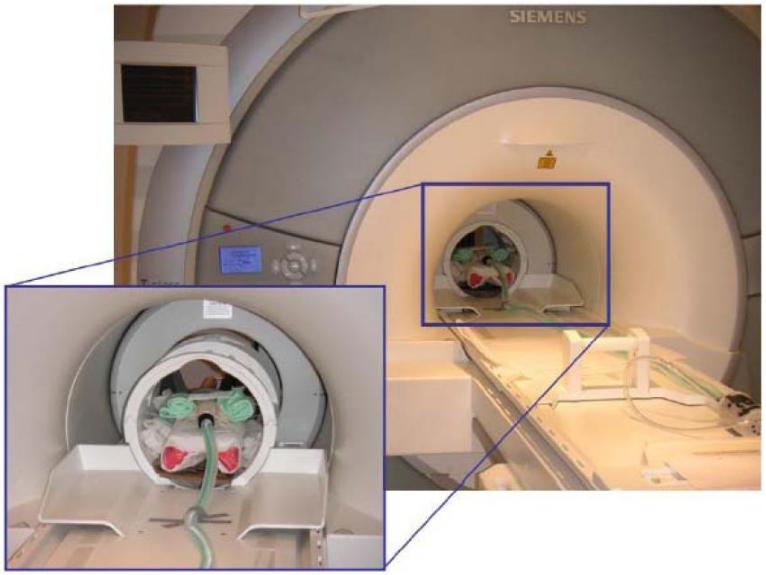


- **Detects Pairs of Back-to-Back 511 keV Photons**
- **No Collimator Needed ⇒ Much Higher Efficiency**

Качество изображений в ПЭТ лучше, чем SPECT даже при меньшем количестве вводимых в организм изотопов (используется изотоп ^{18}F, вводимый в глюкозу).

Комбинированная система: ПЭТ + Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)

Simultaneous PET/MRI

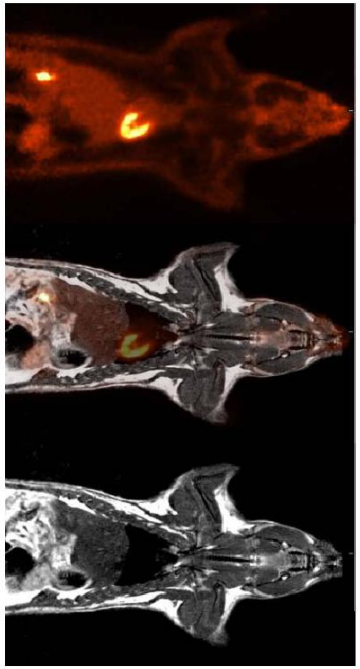


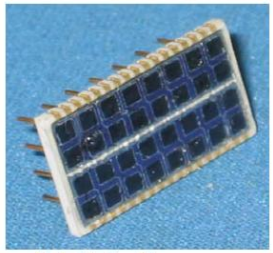
Rat

PET

Merged

MRI





APD Array

Human Brain / Animal PET/MRI Camera Using APDs

Одновременное использование ПЭТ и ЯМР позволяет точнее локализовать раковую опухоль. Очень важно для разработки новых лекарств от рака.

Фотоприёмники ПЭТ должны работать в очень сильных (и переменных) магнитных полях → ЛФД или кремниевый фотоумножитель (компактны и обладают большим усилением)

Низкодозовая флюорография

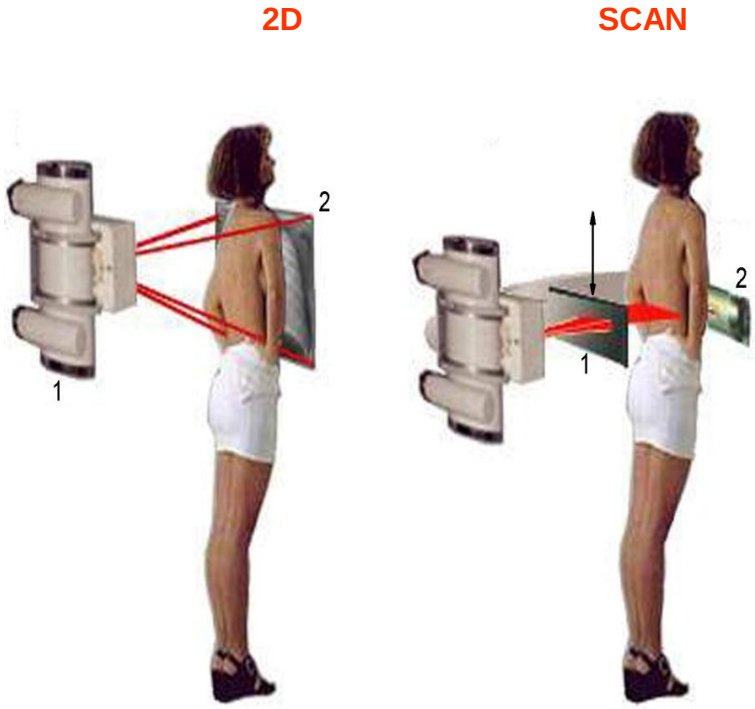
Advantages of scanning method

- the dose ~10 times lower at same contrast (depends on thickness)
- the image length is not limited (up to 2 m)
- good image quality in hole field
- big dynamic range

Disdvantages

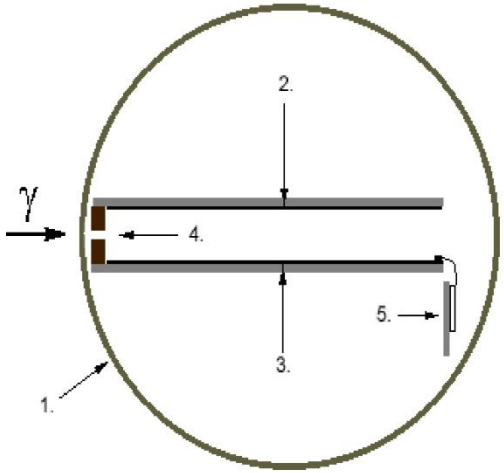
- **long scanning time (3-5 s vs. 0.01 sec in 2D methods)**
- **precision mechanics**

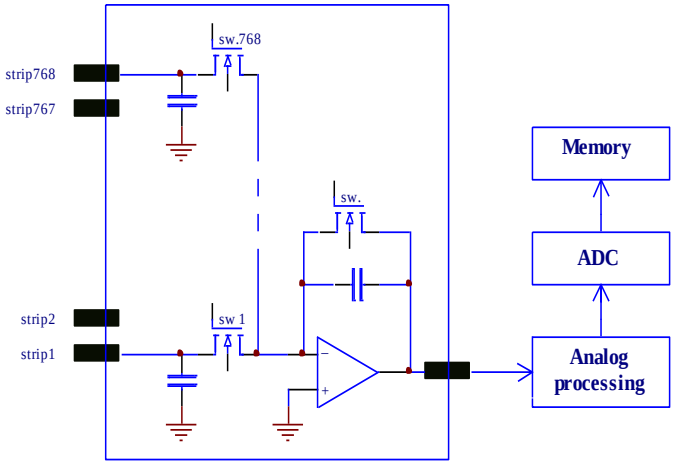
One remark: it seems in the case of scanning method an image is not sharp due to movements of internals but it is not true! The time for read out of one string is very short (<0.001 s) and image dynamically is very sharp and provide additional information for a doctor.



Высокоэффективная многоканальная ионизационная камера (MIC)

Xe, Kr up to 40 bar





MIC schematic diagram:

1 – detector housing;
2 – anode plane;
3 – cathode strip plane;
4 – input diaphragm;
5 – readout electronics.

Разработка Института ядерной физики им. Будкера (Новосибирск)

MICs для различных применений

Type	Gas	P, *bar*	Noise, *photons*	Strips, *mm*	#channel	Application	Status
MICm	Xe, Kr	20	3	0.1	2048	Mammogra	Lab test
MIC1024	Xe, Kr	40	3	0.4	1024	Fluorograph	Mass product
MIC1536	Xe, Kr	40	3	0.3	1536	Fluorograph	Lab test
MIC2048	Xe, Kr	40	3	0.2	2048	General diagnostics	Mass product
MIC800	Xe	40	3	1.0	800	Security	Mass product

Преимущества MIC

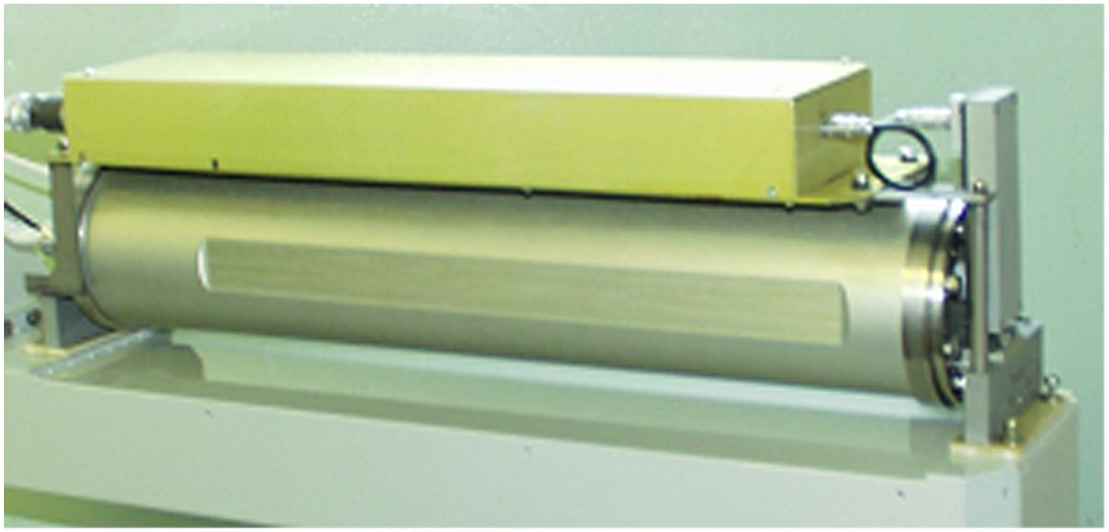
Advantages of MIC :

- Low noise
- Large dynamic range
- High radiation resistance
- Fill factor 100%

Disadvantage:

- High pressure

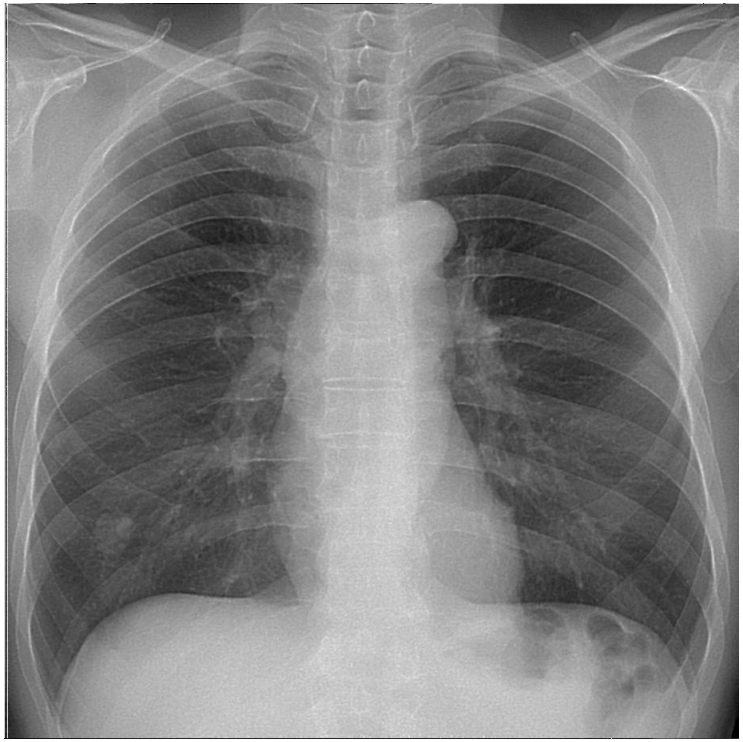
The MIC800 for security (800 mm)



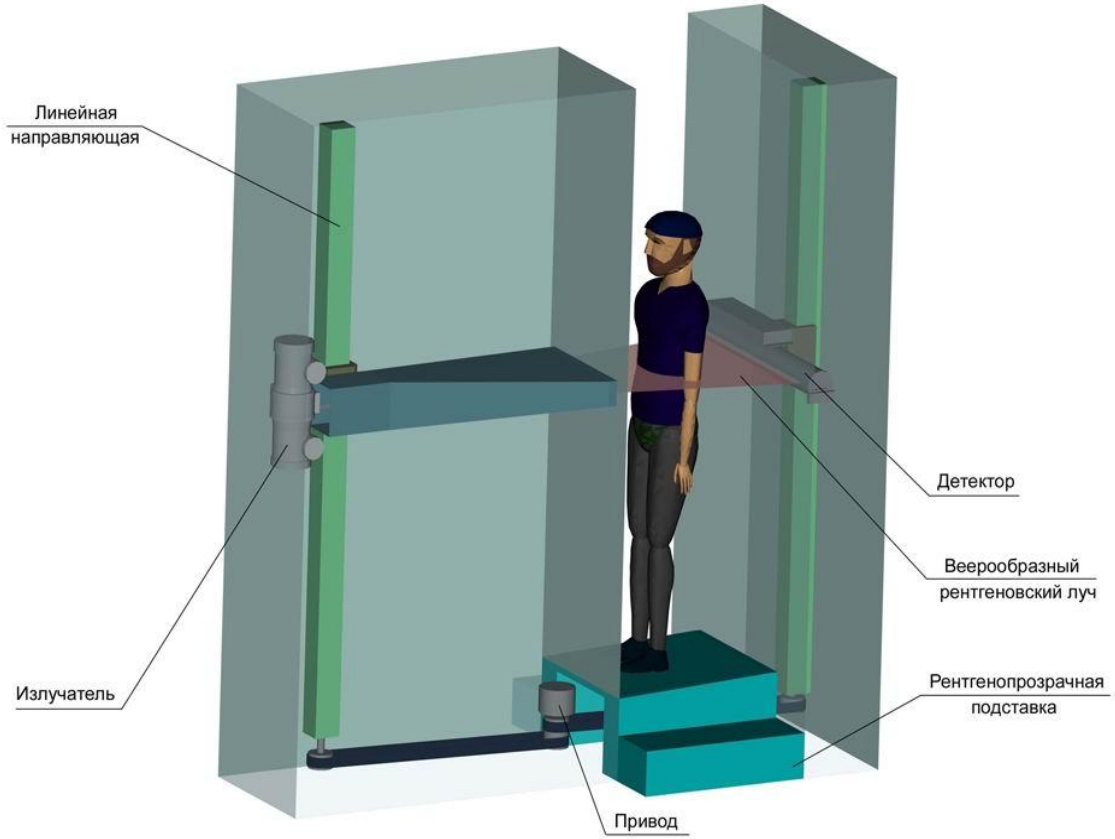
Аппараты для флюорографии с МІС

Fluorograph
FMC – NP –O
Russia

Fluorograph
DRC
South Korea



Система радиографического контроля (СРК)



Общий вид установки рентгеновского контроля
(стенки условно показаны прозрачными)

Первый "Сибскан"

- Maximum scanning height 2000 mm
- Image width 800 mm
- Channel size (resolution) 1x1 mm
- Scanning speed 40 cm/s
- Maximum scanning time 5 s
- Capacity 3 persons/min
- Radiation dose per 1 inspection ~0,5 μSv *

This dose is equivalent to 5 minutes of flights cosmic ray background dose!

The permitted years dose (in many countries) is 1000 μSv*
Each passenger can pass SRC inspection many times without any trouble

*medical inspections are not included!

6 СРК сканеров работали в российских аэропортах в 2007 г.

Три "террориста" найденных при помощи СРК

О чём я хотел рассказать, но не успел …

- Более широко о применениях ускорителей в промышленности
- О применении проволочных газовых детекторов для сканирований грузов и поиска ядерных материалов
- О применение многопроволочных камер для изучения внутренностей древних пирамид
- О применении детекторов ФЭЧ для изучения предметов искусства и археологии
- О применении детекторов ФЭЧ для поиска полезных ископаемых (газа, нефти и др.)
- О ксеноновом наркозе, ксеноновой и криптоновой терапии
- О применении лавинных фотодиодов в регистрации биолюминесценции (в т.ч. в контроле качества пива и других продуктов питания)
- …

Заключение

Я попытался поделиться с вами тем, что я знаю о том, какую пользу приносит человечеству физика элементарных частиц. Конечно, я высветил лишь небольшую долю из того огромного числа применений разработок, которые были сделаны для ФЭЧ, в различных областях человеческой деятельности. Но, с моей точки зрения, уже и этой доли вполне достаточно, чтобы увидеть, что те значительные финансовые ресурсы, которые выделяются на нашу науку - уже давно себя окупили (даже если мы забудем упомянуть Интернет, который был изобретён в ЦЕРНе).

Благодарность

В данной презентации использованы слайды из докладов Г. Феофилова, П. Белошитского, Т. Куртыки, Ю. Антипова, Ю. Тихонова, П. Лекока, Р. Дейча и многих других. Выражаю им свою искреннюю благодарность.