



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

**Кафедра №7
экспериментальной ядерной физики и космофизики**

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №15

**Прикладная экспериментальная ядерная
физика**

2017

Лекция №15

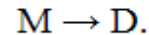
Прикладная экспериментальная ядерная физика

1. Ядерная хронология
2. Нейтронно-активационный анализ
3. Нейтронный и гамма-каротаж
4. Масс-спектрометрия с ускорителями
5. Радиоизотопная диагностика в ядерной медицине
6. Радиационная терапия в ядерной медицине
7. Системы безопасности

1. Ядерная хронология

Предложена Уиллардом Либби в 1946 году (Нобелевская премия по химии, 1960).

В основе метода ядерной хронологии – метода определения возраста образца – лежит явление радиоактивного распада. Радиоактивный изотоп M превращается в радиогенный стабильный или радиоактивный изотоп D



Уменьшение числа радиоактивных ядер M со временем описывается соотношением

$$M(t) = M_0 e^{-\lambda t},$$

где M_0 – число радиоактивных ядер M в момент времени $t = 0$, λ – постоянная распада радиоактивного изотопа M . Число образовавшихся ядер радиогенного изотопа $D(t)$ равно числу распавшихся ядер изотопа $M(t)$

$$D(t) = M_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

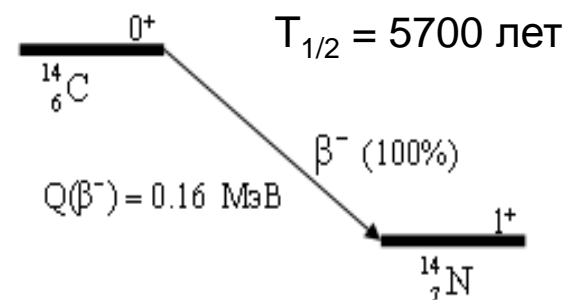
Отношение числа образовавшихся ядер $D(t)$ к числу радиоактивных ядер $M(t)$ в образце определяется соотношением

$$D(t) = M(t)(e^{\lambda t} - 1).$$

Принципиальная схема определения возраста образца состоит в следующем. Измеряется отношение содержания в исследуемом образце двух изотопов, один из которых является радиоактивным, а другой радиогенным продуктом распада и сравнивается с аналогичным отношением, которое предполагается известным в момент образования образца.

В качестве радиоактивных меток в ядерной хронологии выбираются

1. Долгоживущие изотопы радиоактивных семейств,
2. Долгоживущие радиоактивные изотопы, образующиеся при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли,
3. Долгоживущие радиоактивные изотопы, образовавшиеся во время формирования Солнечной системы.



Изотопы, используемые в ядерной хронологии

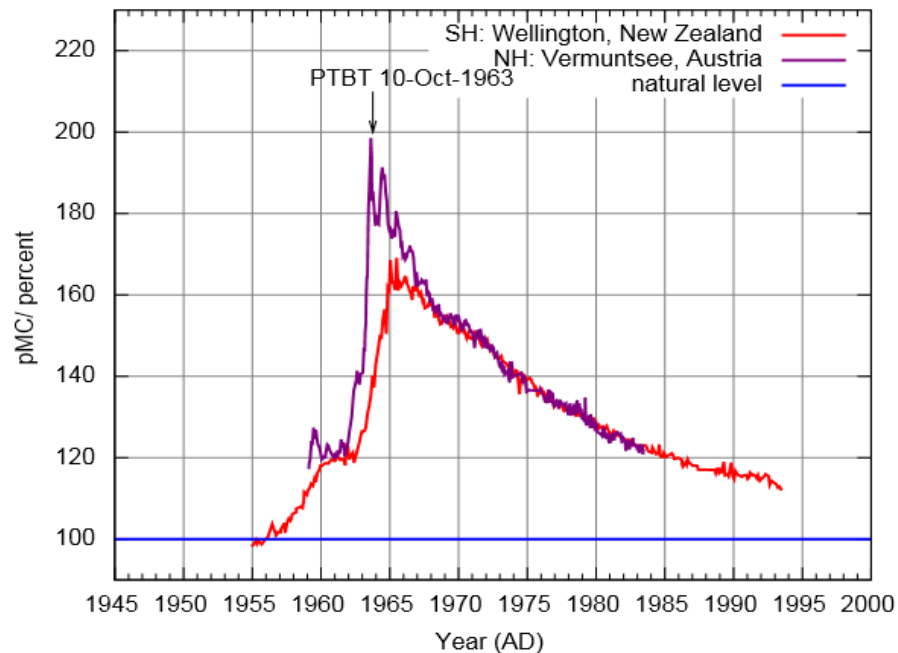
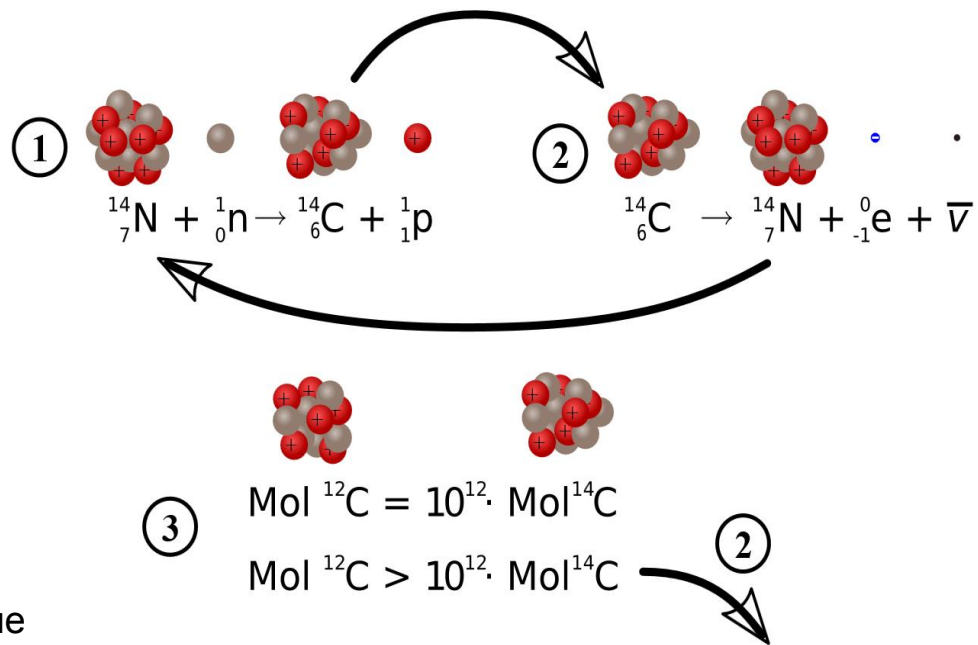
Исходный изотоп	Период полураспада, лет	Распространенность, %	Ядро-продукт
^{14}C	5700		^{14}N
^{40}K	$1.238 \cdot 10^9$	0.0117	^{40}Ar
^{87}Rb	$4.81 \cdot 10^{10}$	27.84	^{87}Sr
^{129}I	$1.57 \cdot 10^7$		^{129}Xe
^{232}Th	$1.40 \cdot 10^{10}$	100	^{208}Pb
^{235}U	$7.04 \cdot 10^8$	0.7204	^{207}Pb
^{238}U	$4.468 \cdot 10^9$	99.2742	^{206}Pb

Изотоп ^{14}C постоянно образуется в верхних слоях атмосферы на высоте 12-15 км при столкновении вторичных нейтронов от космических лучей с ядрами атмосферного азота. В среднем образуется 7.5 кг в год при общем количестве содержания углерода в атмосфере Земли 75 тонн

Радиоизотоп углерода ^{14}C подвержен β -распаду с периодом полураспада $T_{1/2} = 5730 \pm 40$ лет:

Удельная активность изотопа в живом организме ^{14}C составляет 0.23 Бк на 1 г углерода. При гибели организма поступление углерода ^{14}C в организм прекращается и удельная активность углерода ^{14}C в останках живого организма начинает падать с периодом полураспада $T_{1/2} \approx 5700$ лет. Зная начальную активность образца и измеренную активность на данный момент, можно определить время гибели живого организма.

В 2015 году учёные из Имперского колледжа Лондона подсчитали, что промышленное использование углеводородов скоро сведёт на нет радиоуглеродный метод



В момент образования Солнечной системы отношения изотопов урана и тория составляли

$$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.3, \quad ^{232}\text{Th}/^{235}\text{Th} = 35.$$

В настоящее время эти отношения равны

$$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 7.3 \cdot 10^{-3}, \quad ^{232}\text{Th}/^{235}\text{Th} = 4,$$

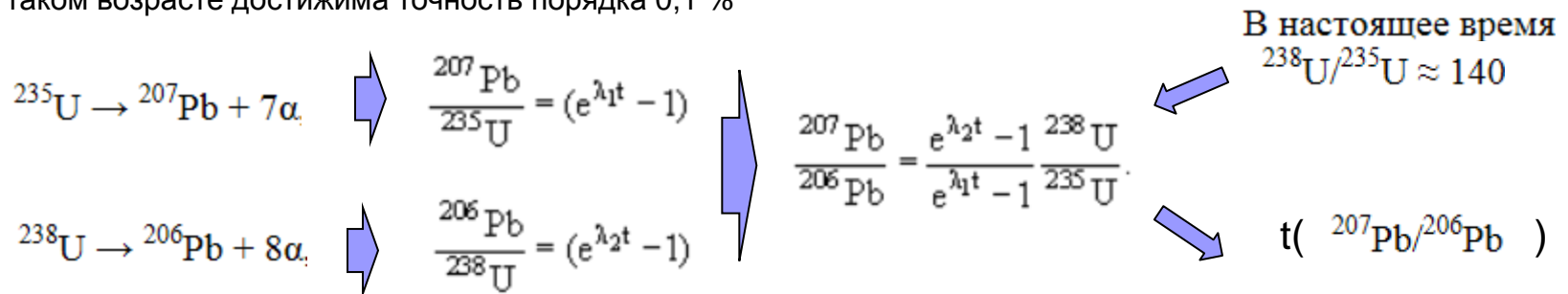
что позволяет оценить возраст Солнечной системы **$t = 4.5 \cdot 10^9$ лет.**

В геохронологии используется несколько методов.

1. Уран, торий-свинцовый метод.
2. Свинцовый метод.
3. Калий-аргоновый метод.
4. Рубидий-стронциевый метод.

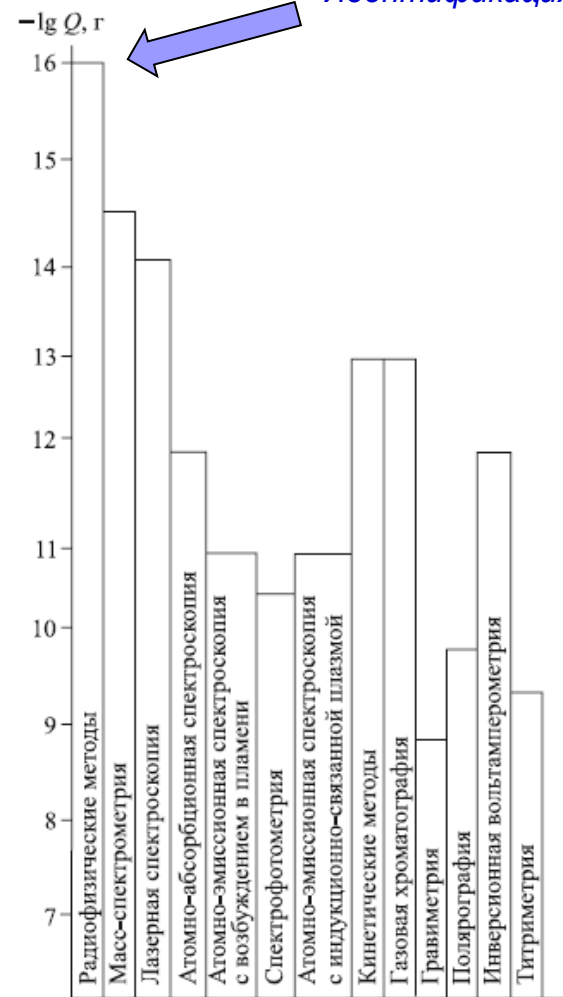
Уран-свинцовый метод — один из самых старых и хорошо разработанных способов радиоизотопного датирования и, при хорошем исполнении, самый надёжный метод для образцов с возрастом порядка сотен миллионов лет.

При таком возрасте достижима точность порядка 0,1 %



2. Нейтронно-активационный анализ

Идентификация материалов по гамма-спектрам: $n + {}^A_Z \rightarrow {}^{A+1}_Z^* \rightarrow {}^{A+1}_Z + \gamma$



Нижние границы определяемых содержаний компонентов ($-\lg Q, \text{ г}$) для некоторых методов анализа

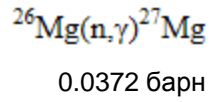
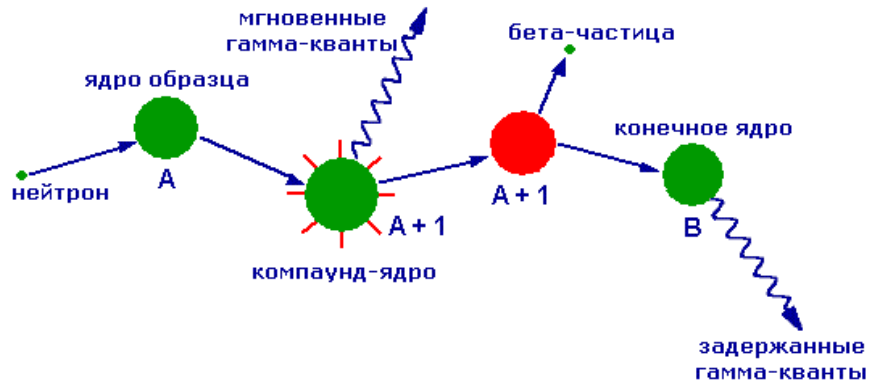
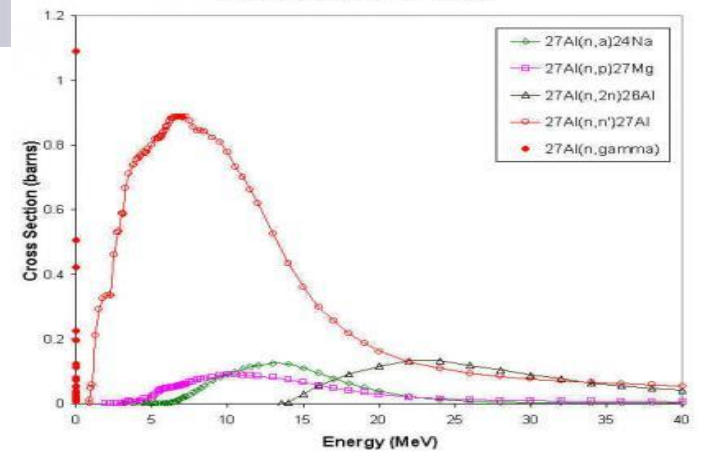
Метод НАА берет свое начало в 1936 г., когда Хевиши и Леви, используя нейтроны Ra-Be-источника, определяли редкоземельные элементы. В 1938 г. НАА был впервые применен Сиборгом и Ливингудом для определения серы по реакции ${}^{32}\text{S}(n, p){}^{32}\text{P}$ в биологическом образце — бумаге. В 1948 г. Браун и Голдберг, используя нейтроны реактора, определили малые концентрации гадолиния и палладия в метеоритах. С этого момента НАА на реакторных нейтронах стал интенсивно использоваться для анализа руд, минералов, биологических объектов.

Мощные реакторные потоки ($10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), сочетание различных вариантов метода, использование современных полупроводниковых детекторов высокого разрешения ($\sim 2 \text{ кэВ}$), измерительной и вычислительной компьютерной техники, а также передовых компьютерных технологий в обработке и интерпретации данных определяют современный уровень НАА.

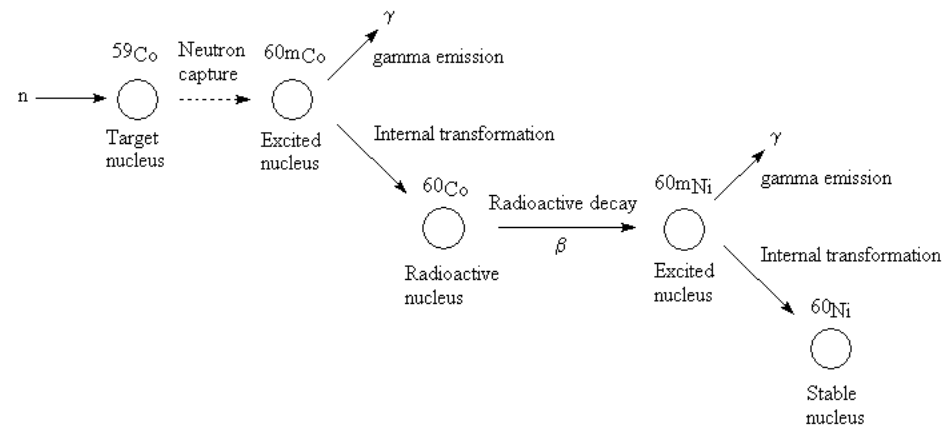
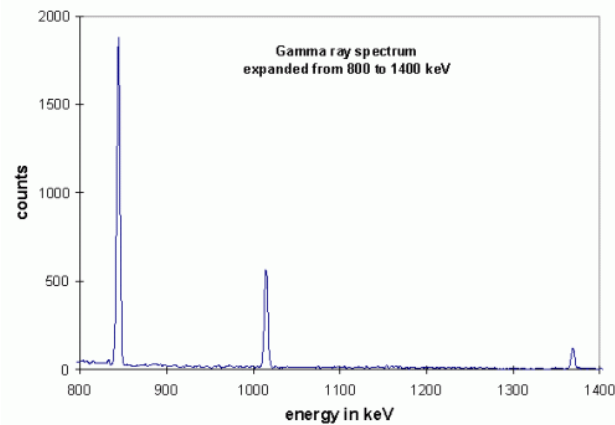
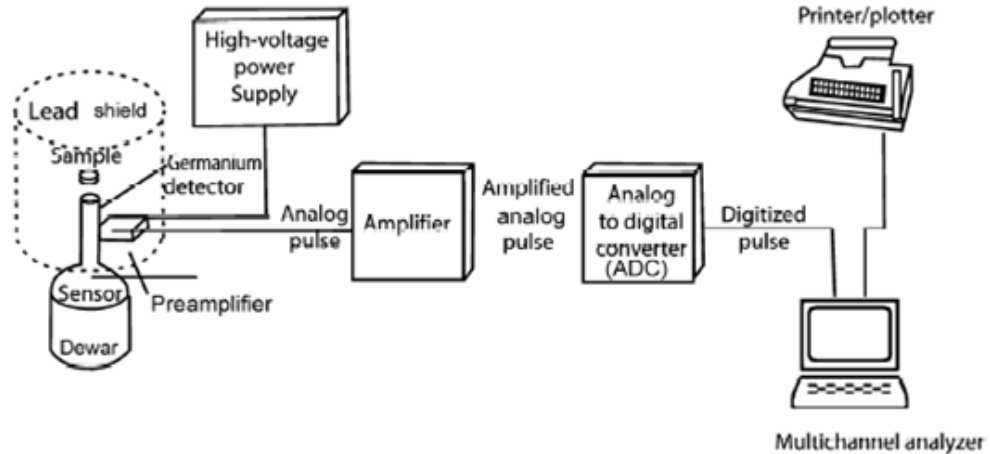
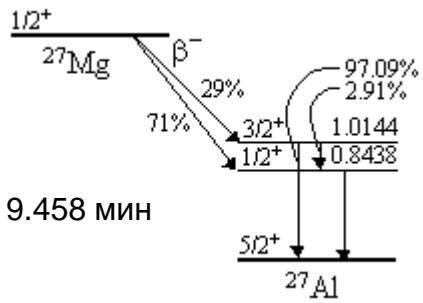
К преимуществам НАА относятся:

- высокая чувствительность для большинства элементов, особенно для тяжелых металлов с $Z > 10$;
- хорошая селективность, связанная со специфичностью ядерно-физических характеристик элементов;
- возможность одновременного определения большого числа элементов;
- независимость результатов анализа от вида химических соединений элементов;
- неdestructивный характер анализа и, следовательно, отсутствие риска загрязнений реактивами или неполного растворения образцов;
- простота процедуры подготовки образцов для анализа;
- хорошая точность порядка $\pm(10-15) \%$ при определении содержаний **7** порядка 10^{-6} г ;

Reaction Cross Sections



$T_{1/2} = 9.458$ мин

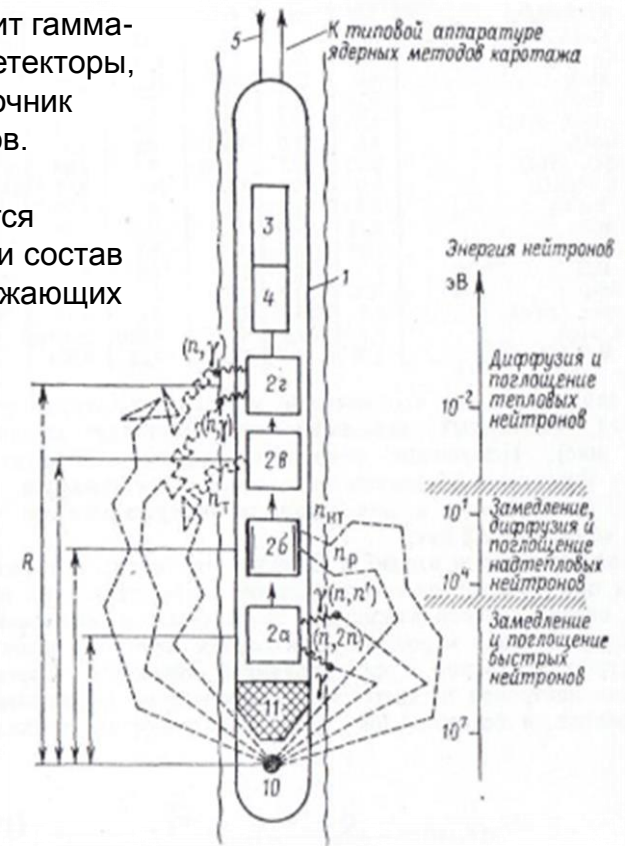
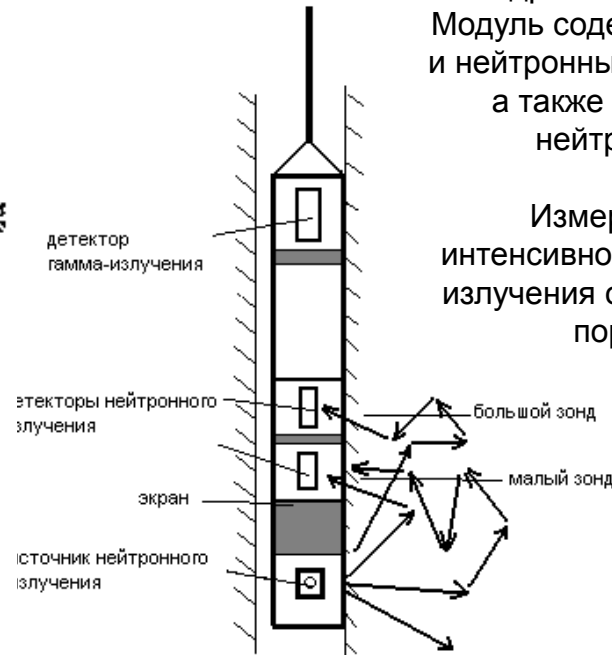
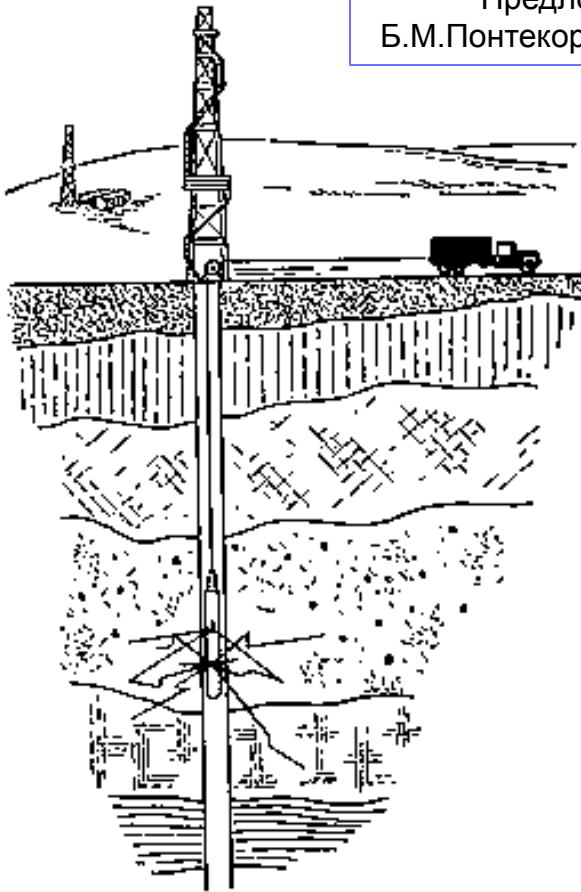


3. Нейтронный и гамма-каротаж

Предложен
Б.М.Понтекорво в 1941 г.

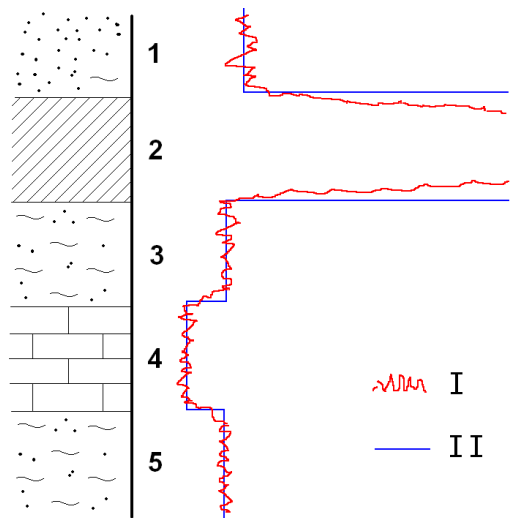
Один из основных методов разведки нефти и др. ископаемых. Модуль содержит гамма- и нейтронные детекторы, а также источник нейтронов.

Измеряется интенсивность и состав излучения окружающих пород



$$I_{SH} = \frac{GR - GR_{MIN}}{GR_{MAX} - GR_{MIN}}$$





ГГК-П (плотностной гамма-каротаж) - показания характеризуются в основном по Комптоновскому эффекту, применяют на нефтяных и газовых месторождениях:

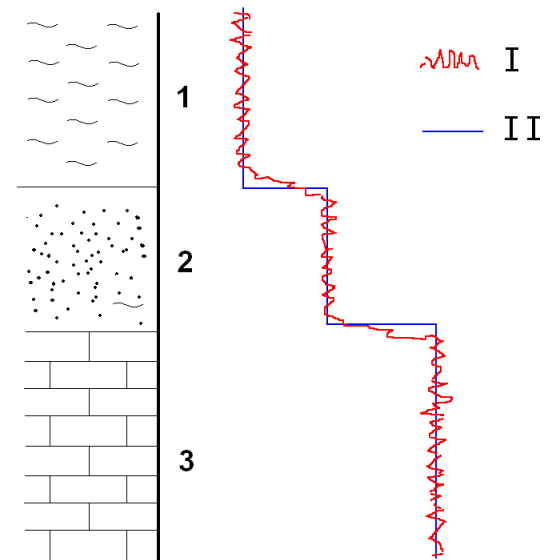
I — наблюдаемая кривая, II — теоретическое поле.
 Породы: 1 — песчаник; 2 — уголь; 3 и 5 — глины, суглинки; 4 — известняк.

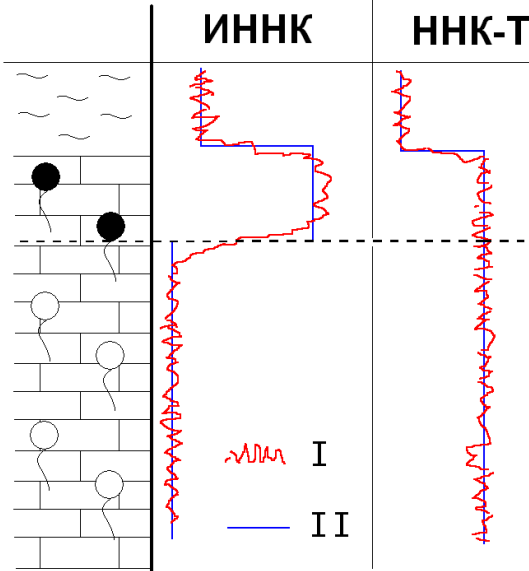
Плотный известняк характеризуется низкими значениями, а низкоплотный уголь — аномально высокими

НГК (нейтронный гамма-каротаж) - породу облучают постоянным потоком нейтронов и регистрируют образовавшееся гамма-излучение:

I — наблюдаемая кривая, II — теоретическое поле.
 Породы: 1 — глины; 2 — песчаник; 3 — известняк.

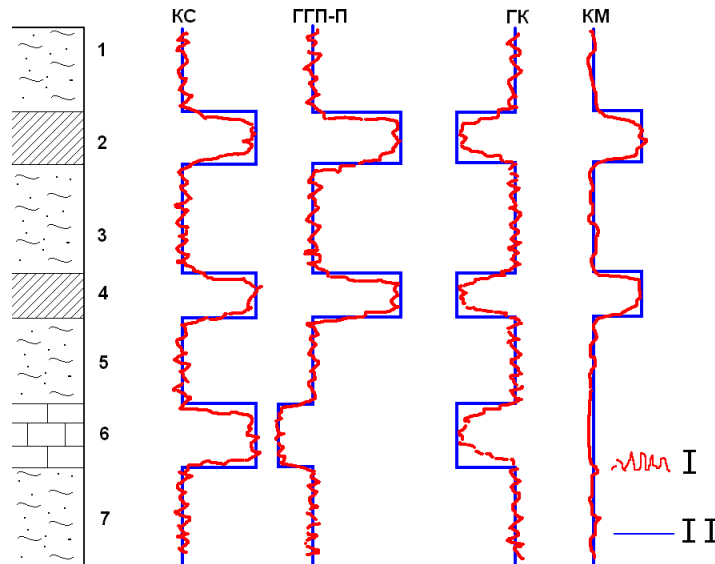
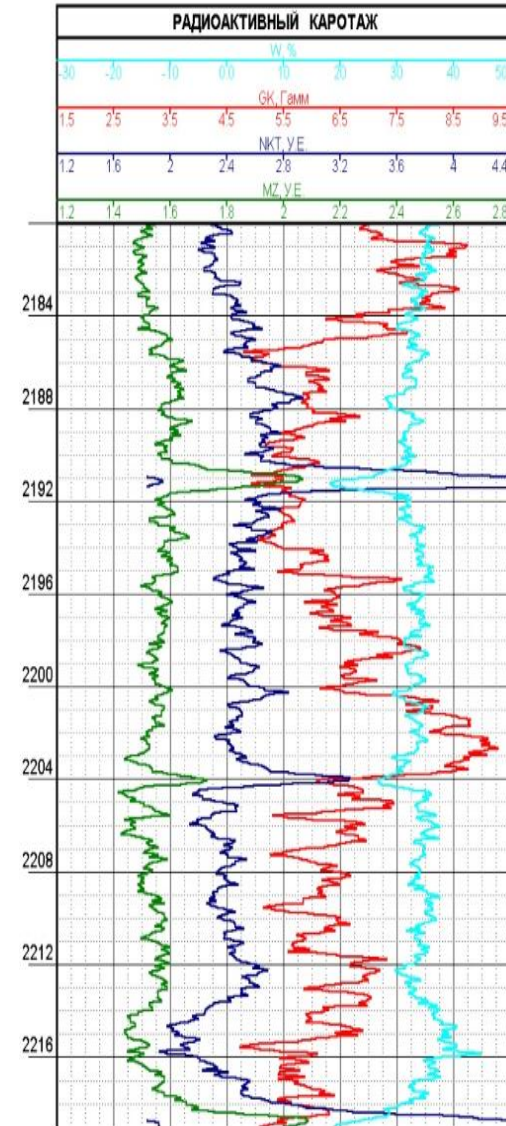
Показания метода сильно зависят от содержания водорода в исследуемой среде. В глине всегда содержится большое количество связанной воды в порах (до 44%). В плотном известняке воды и других содержащих водород веществ практически нет.





ННК-Т — нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам — измеряют *изменение плотности потока* тепловых нейтронов

ИННК -- импульсный нейтрон-нейтронный каротаж — измеряют *среднее время жизни надтепловых* нейтронов, которое зависит от содержания поглотителей (хлора и др.) и водорода:
0,3-0,6 мс — пласты, насыщенные пресной водой или нефтью
0,11-0,33 мс — пласты, насыщенные минерализованной водой
0,6-0,8 мс — пласты, насыщенные природным газом



Выделение угольных пластов комплексом методов.

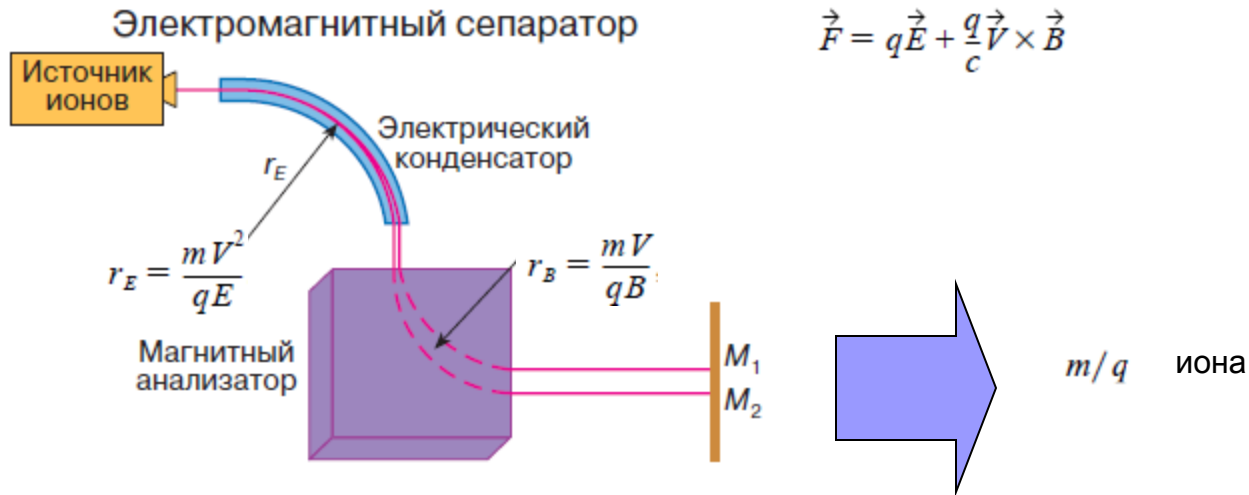
I — наблюденная кривая, II — теоретическое поле.

Породы: 1, 3, 5 и 7 — суглинки, 2 и 4 — каменный уголь, 6 — известняк.

4. Масс-спектрометрия с ускорителями

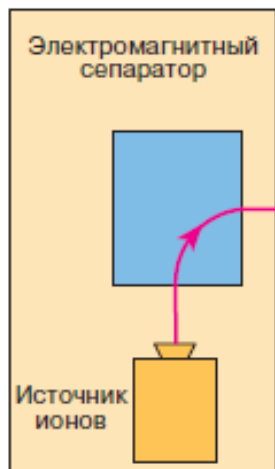
Ионная масс-спектрометрия

Используется для анализа изотопного состава вещества

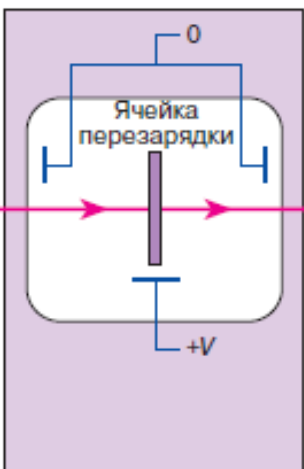


Впервые на возможность применения ускорителя элементарных частиц для измерения изотопных отношений указали Л. Альварес (L. Alvarez) и Р. Корног (R. Cornog) в 1939 году.

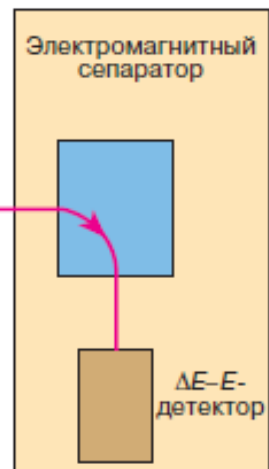
Масс-спектрометр
низкой энергии



Электростатический
тандемный
ускоритель



Масс-спектрометр
высокой энергии

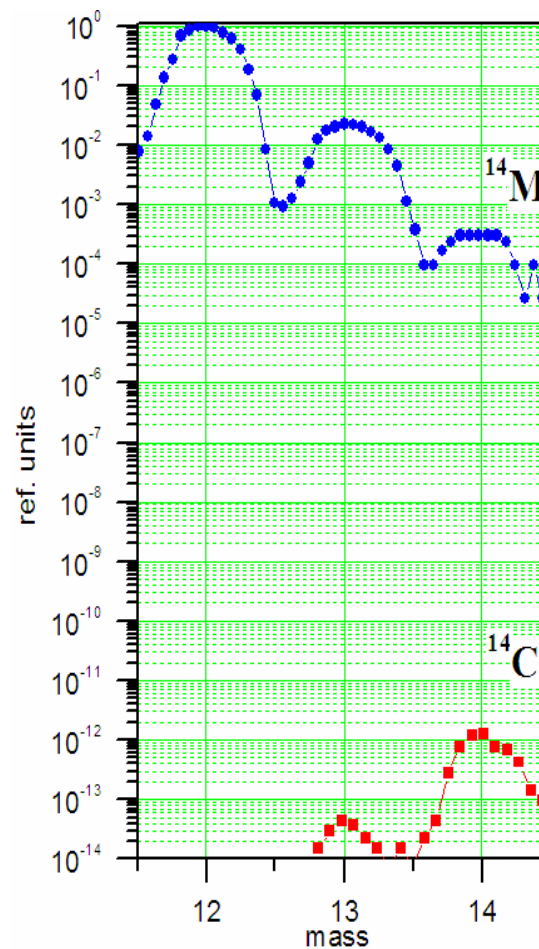


Блок-схема установки для ускорительной
масс-спектрометрии (УМС)



Таблица 1. Характеристики УМС при регистрации космо-
генных нуклидов

Нуклид	Химическая форма	Эффектив- ность, %	Предел чувстви- тельности
^{10}Be	BeO	1	10^{-15}
^{14}C	C	2	10^{-15}
^{26}Al	Al_2O_3	0,1	10^{-15}
^{36}Cl	AgCl	0,5	10^{-15}
^{129}I	AgI	0,5	10^{-14}



Масс-спектр на
малой энергии

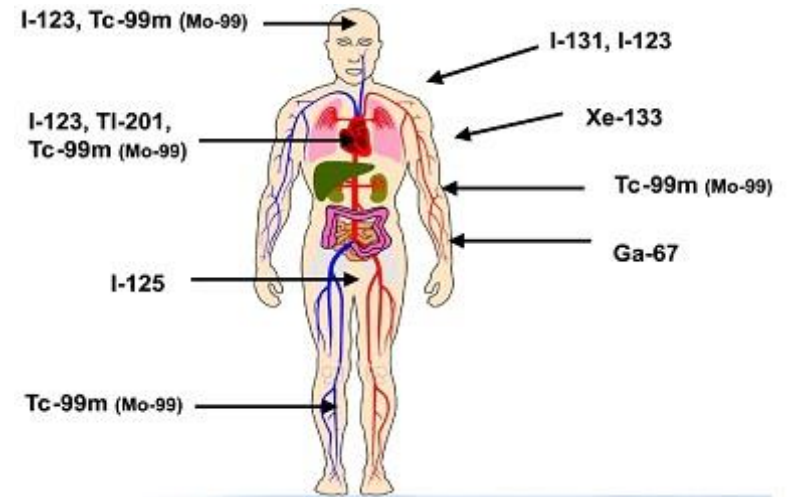
На выходе
УМС анализатора

5. Радиоизотопная диагностика в ядерной медицине

Ядерная медицина

- Ядерная медицина - это медицина, которая использует радиоактивные изотопы для постановки диагноза и лечения болезней (терапия).
- Ядерная медицина позволяет получать данные о функционировании органа и его структуре на молекулярном уровне.
- Ядерная медицина использует относительно небольшие количества открытых радиоактивных материалов (радиофармпрепаратов) для диагностирования и лечения болезней.
- Радиофармпрепараты - это вещества, которые локализуются в отдельных органах, костях или тканях.

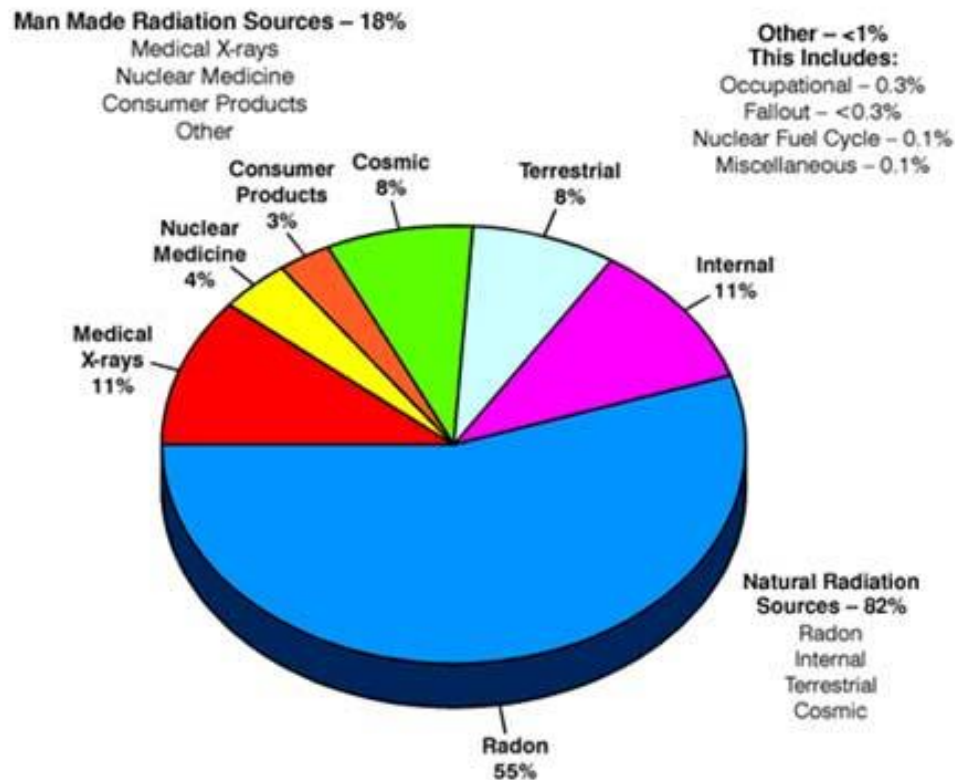
Использования радионуклидов для диагностики *in vivo*



Основные методы получения изображений в ядерной медицине:

- Проекционная рентгеновская визуализация органов и тканей
- Рентгеновская компьютерная томография (КТ)
- Радионуклидная планарная сцинтиграфия
- Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)
- Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ)
- Ядерная магнито-резонансная томография (ЯМРТ)
- Комбинированная компьютерная томография (Fusion): КТ / ПЭТ; КТ/ЯМРТ; КТ/ОФЭКТ

Ionizing Radiation Exposure to the Public



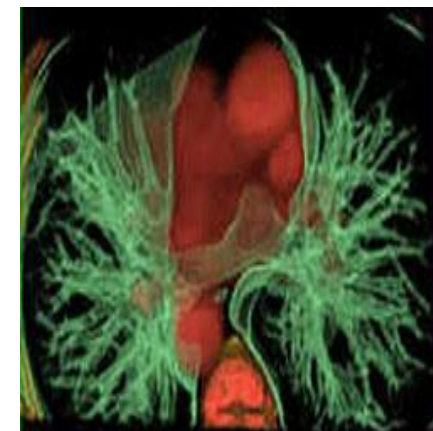
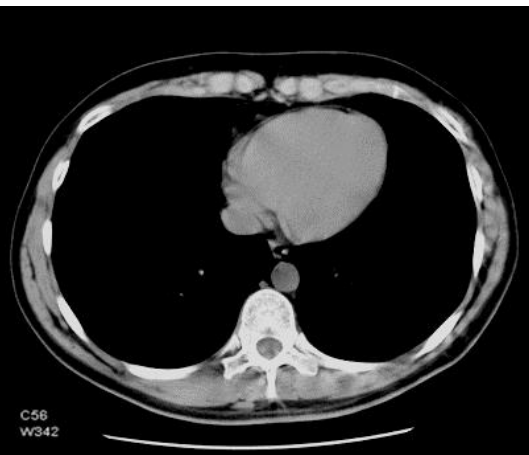
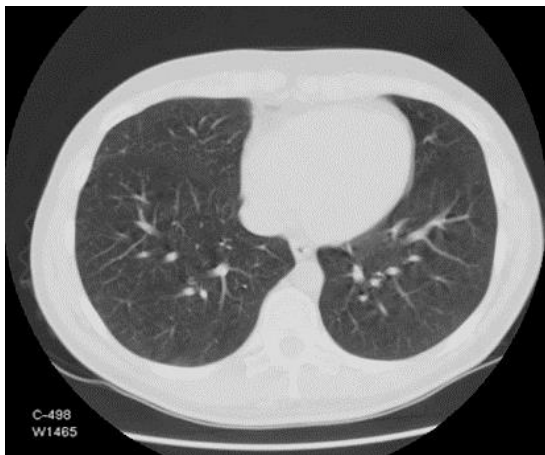
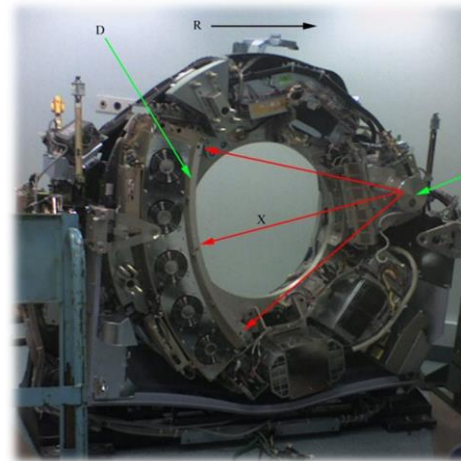
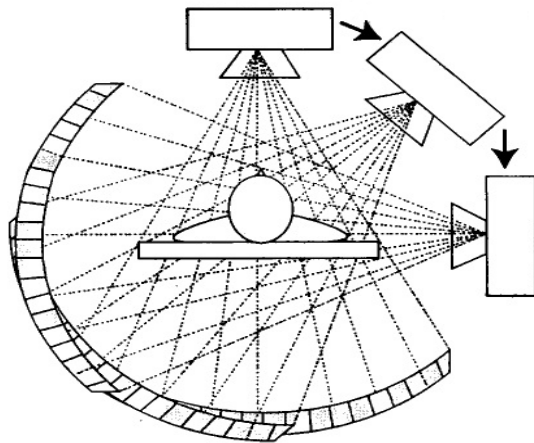
The above chart is taken from the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) Report No. 93, "Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States," 1987.

This chart shows that natural sources of radiation account for about 82% of all public exposure while man-made sources account for the remaining 18%.

Компьютерная Томография (КТ)

Метод послойного рентгеновского исследования внутренней структуры объекта

Предложен в 1972 году Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком (Н.п. по физиологии и медицине 1979 г.)



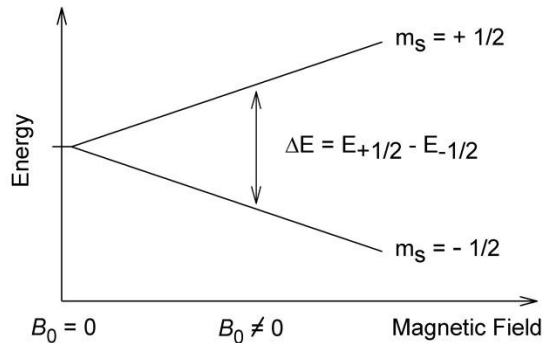
Магнито-Резонансная Томография (МРТ)

томографический метод исследования внутренних органов и тканей с использованием **ядерного магнитного резонанса (ЯМР)**. ЯМР - резонансное поглощение или излучение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, на частоте ν обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер с полуцелым спином $1/2, 3/2, 5/2$

Изобретен В.А.Ивановым в 1960 г.

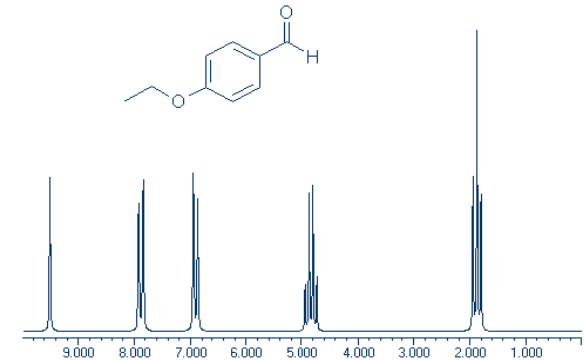
Питер Мэнсфилд и Пол Лотербур получили в 2003 году Нобелевскую премию в области медицины

Расщепление энергетических уровней ядра со спином $1/2$ в магнитном поле

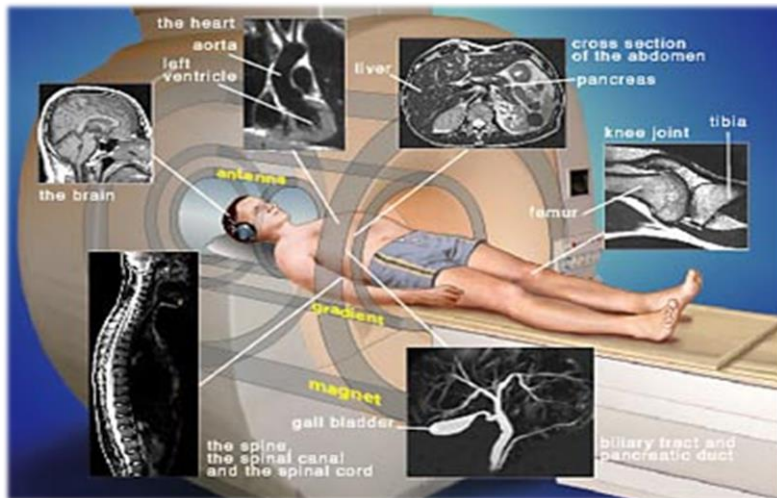


Ларморовские частоты ядер

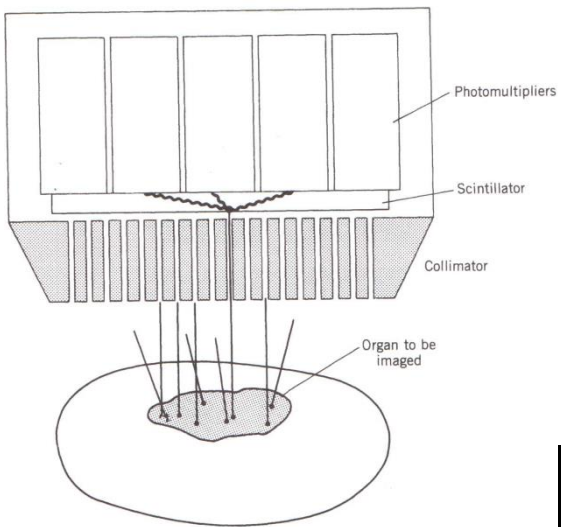
ядро	0,5 Тесла	1 Тесла	7,05 Тесла
^1H (Водород)	21,29	42,58	300.18
^2D (Дейтерий)	3,27	6,53	46,08
^{13}C (Углерод)	5,36	10,71	75,51
^{23}Na (Натрий)	5,63	11,26	79.40
^{39}K (Калий)	1,00	1,99	



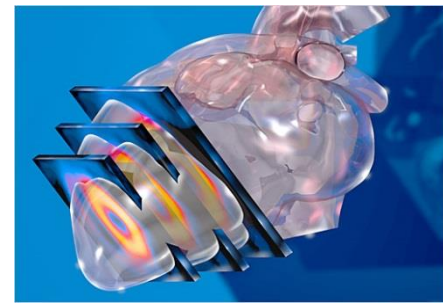
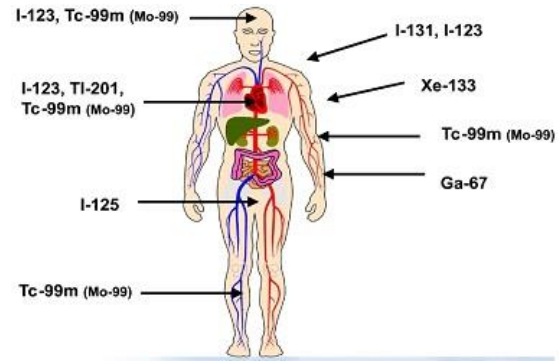
ЯМР спектр ^1H 4-этоксibenзальдегида (м.д. – миллинная доля частоты прибора)



Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

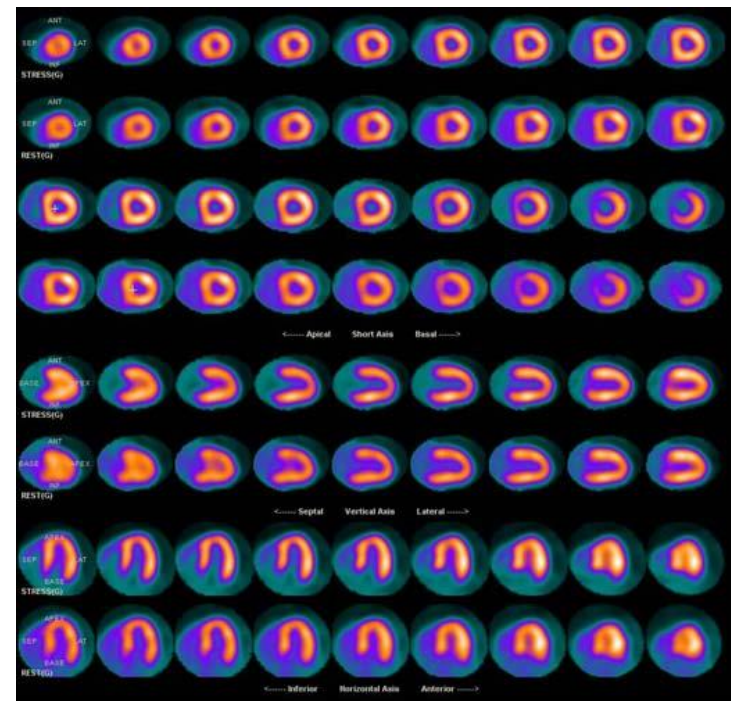
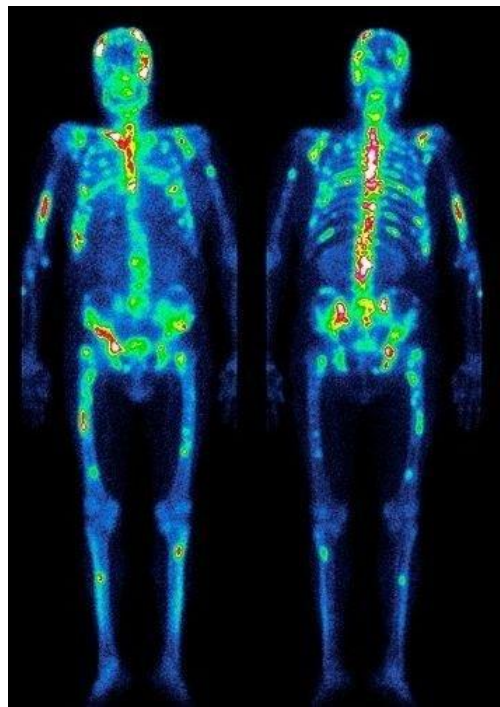


Гамма-камера

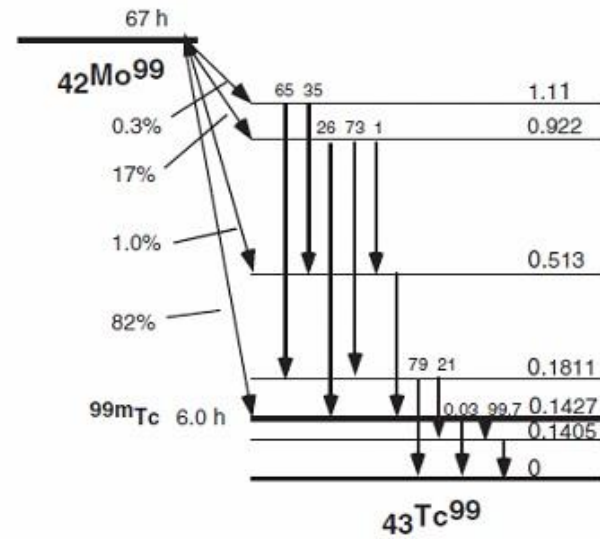
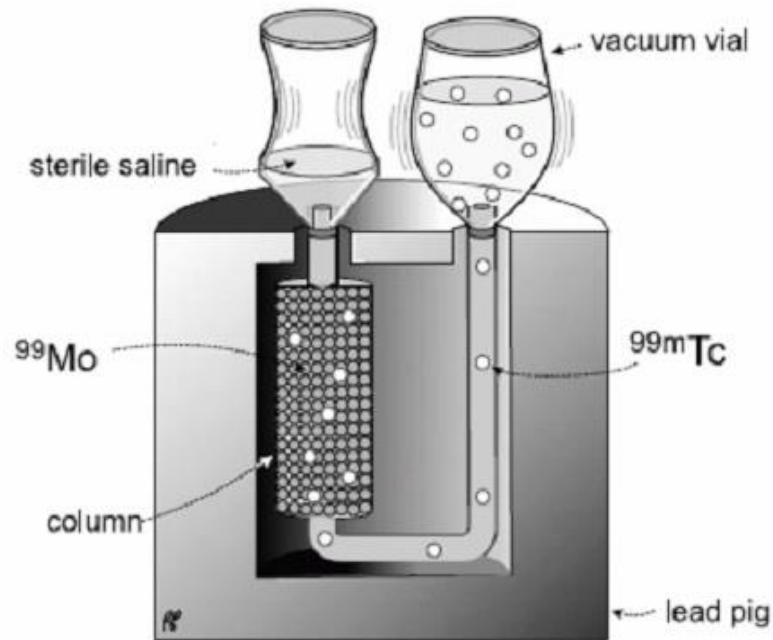


Кардиология

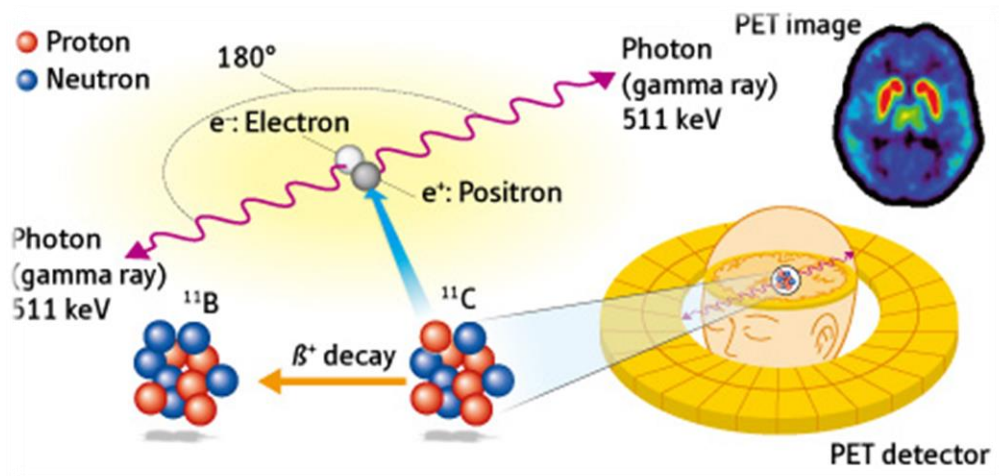
Онкология



Генератор Tc-99m



Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ)



ПЭТ/КТ

Table 2. Radio-isotopes used in PET

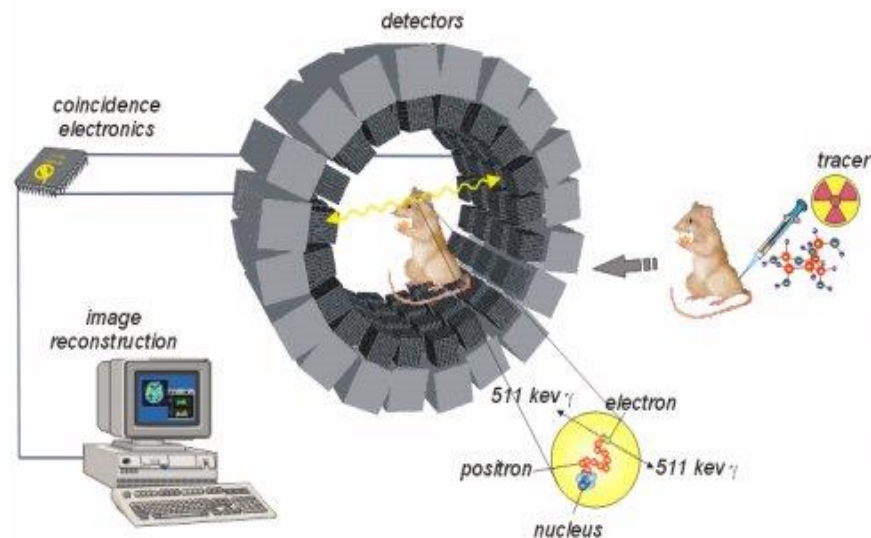
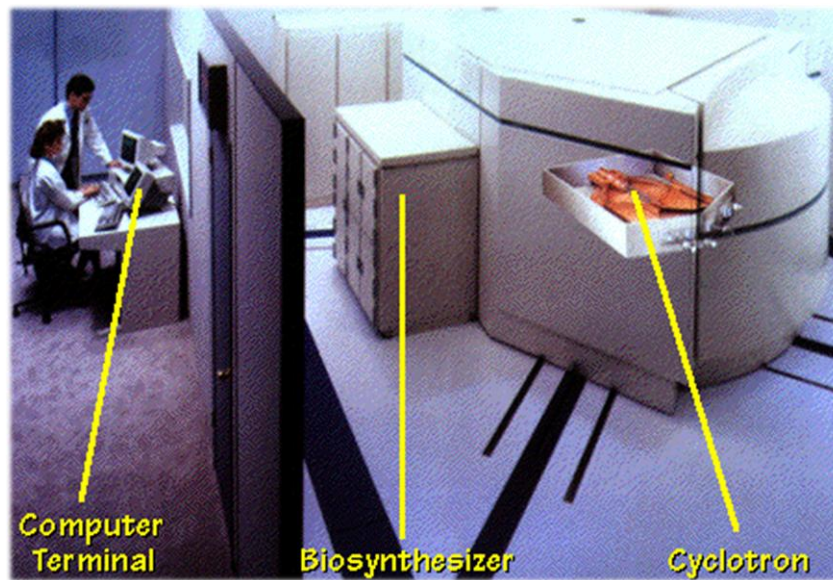
Isotope	Half life	Decay	Proton energy range [MeV]	Utilization
^{11}C	20.4 min	β^+	6-25	Indicator of cellular activity
^{15}O	2.1 min	β^+	5-21	Indicator of tumour necrosis
^{18}F	109 min	β^+	3-20	Metabolism of the glucose
^{81}Rb	4.6 hours	β^+	>20	Myocardium and brain

Производство радиофармпрепаратов

Радиохимия - область химии, изучающая химию радиоактивных изотопов, элементов и веществ, законы их физико-химического поведения, химию ядерных превращений и сопутствующие им физико-химические процессы

Радиофармпрепараты

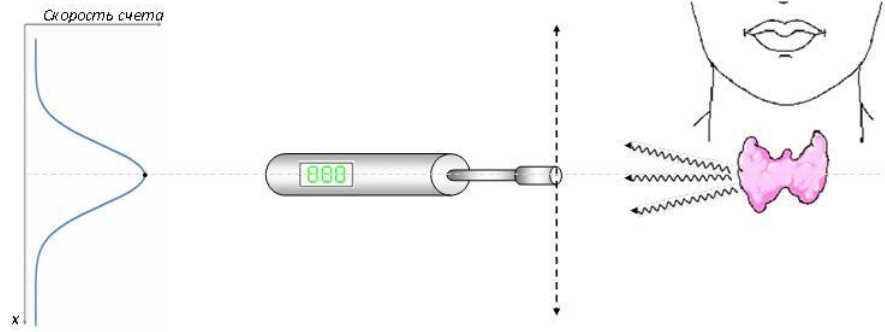
- это радиоактивные изотопы или их соединения с различными неорганическими или органическими веществами, предназначенные для диагностики и лечения различных заболеваний





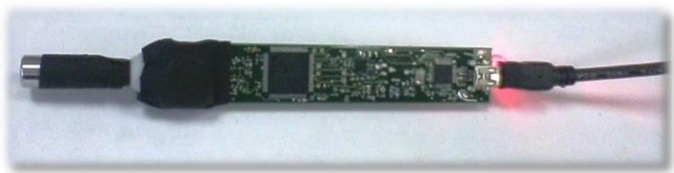
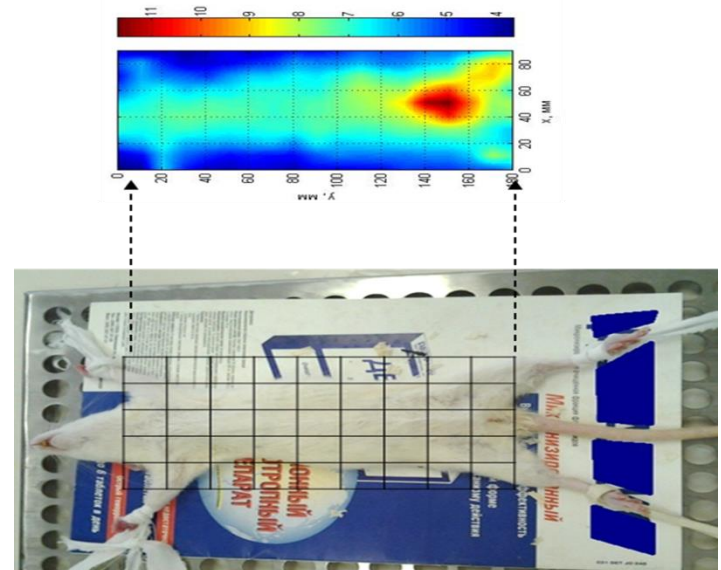
Гамма –зонды

используются как вспомогательный диагностический инструмент для оперативного контроля метастаз

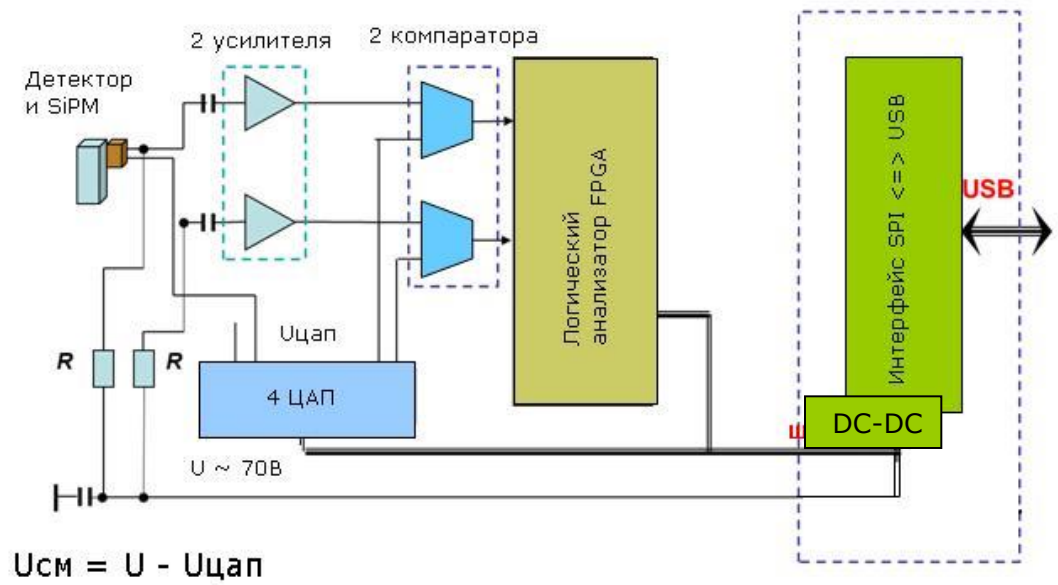


$^{99m}\text{Tc-MIBI}$, ^{99m}Tc -тетрофосмин – примеры неспецифичных РФП; проникновение молекул из крови через клеточную мембрану носит характер пассивной диффузии по градиенту концентрации

Гамма-локатор, разработанный в МИФИ

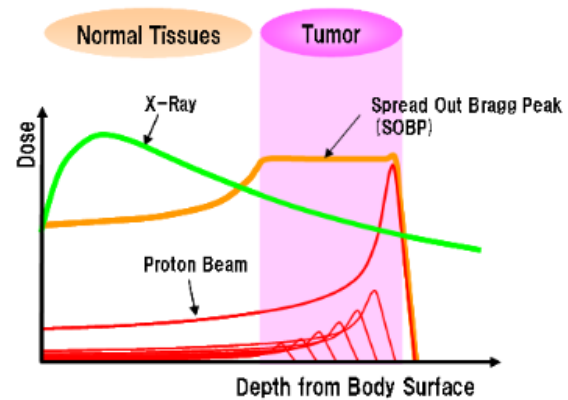
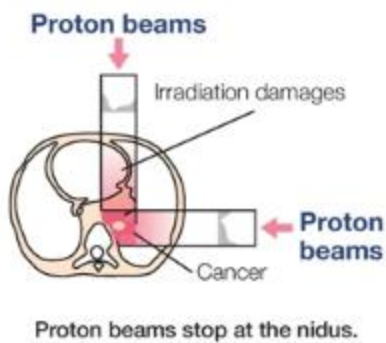
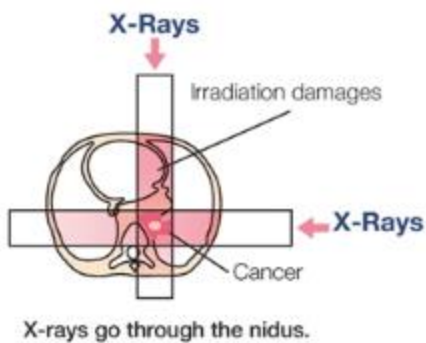
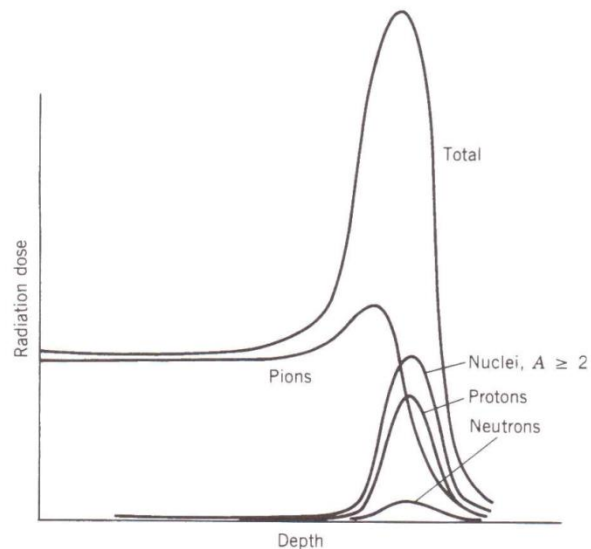
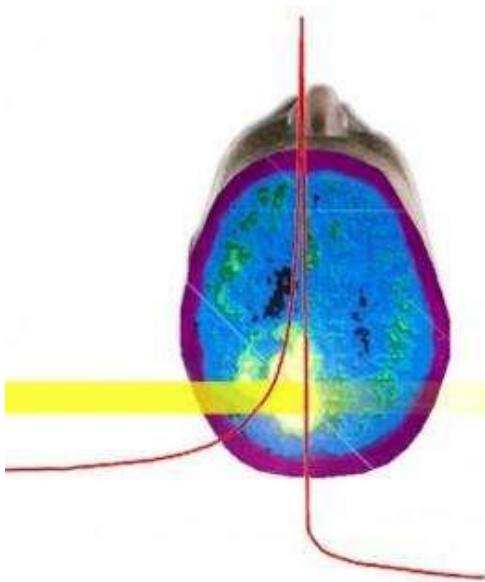


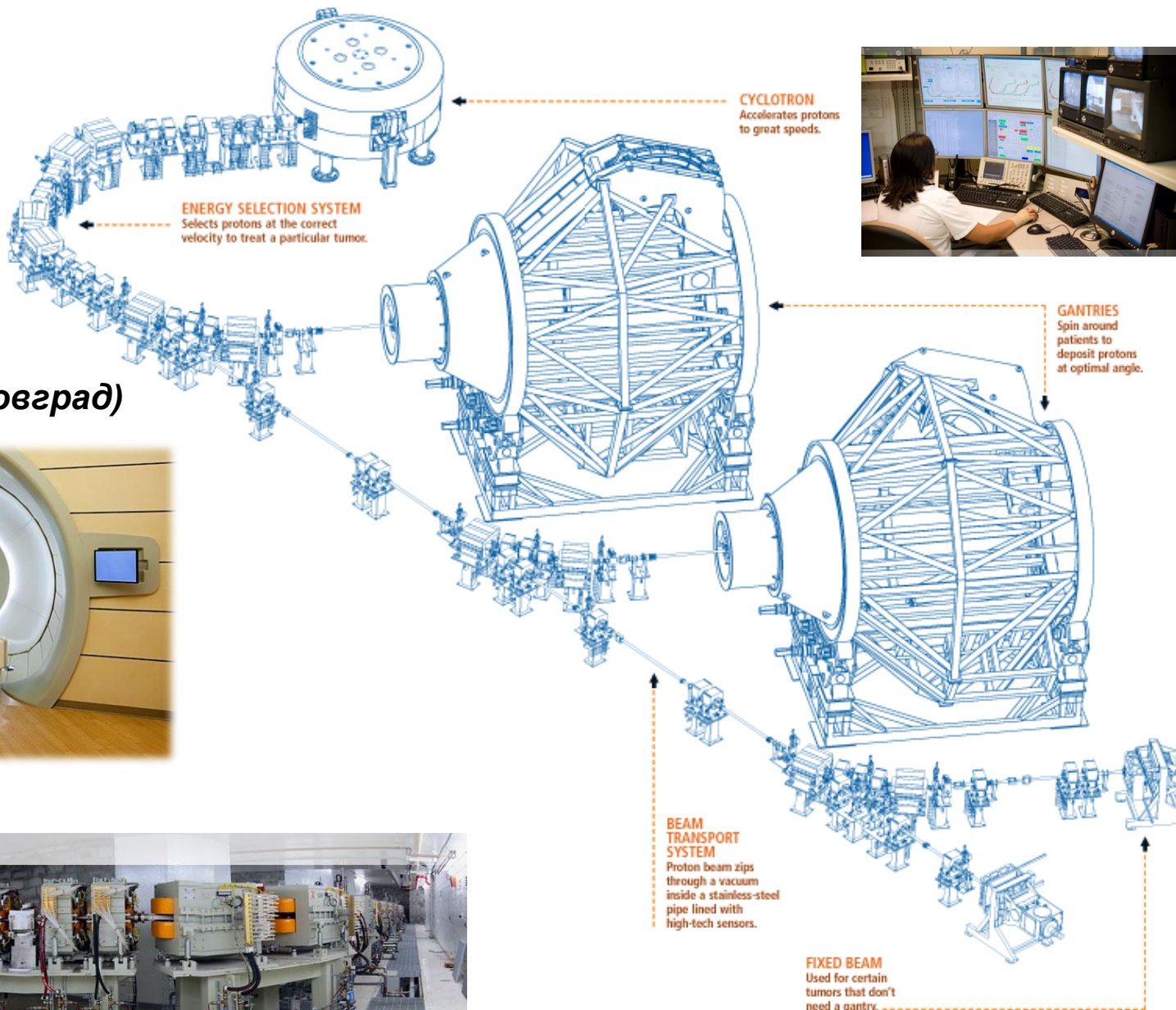
Через разъем USB локатор подключается к компьютеру. Специальное программное обеспечение позволяет осуществить индикацию результата, регулировку напряжения и порогов дискриминации.



6. Радиационная терапия

Лучевая терапия



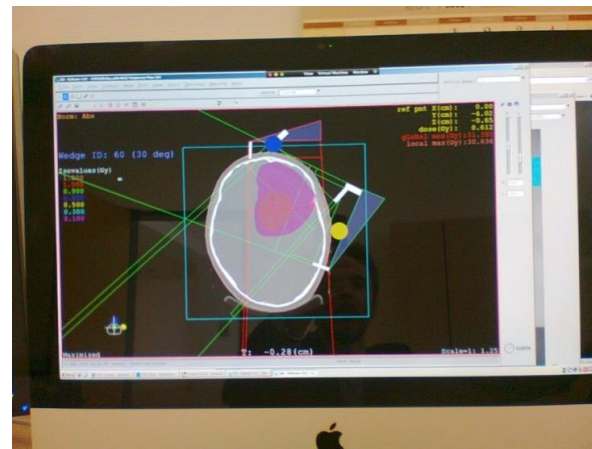


Протонный терапевтический комплекс (Димитровград)

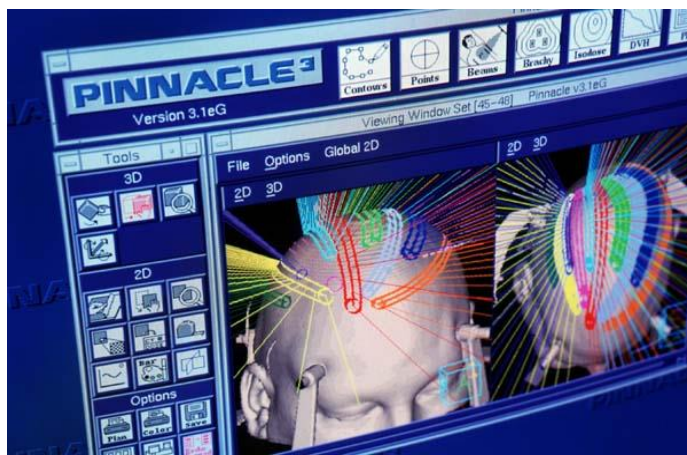
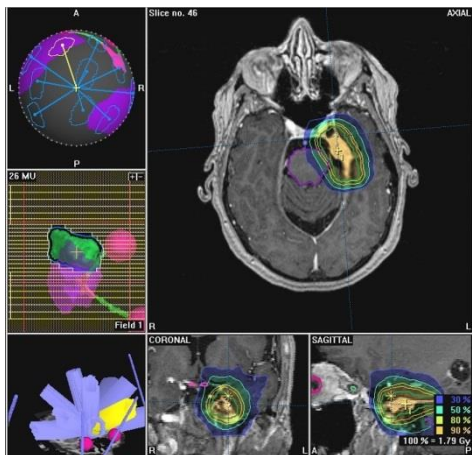




Выпускники МИФИ планируют лучевую терапию с помощью Кибер-Ножа в Центре детской онкологии и гематологии им. Дмитрия Рогачева



Программа планирования лучевой терапии XiO компании Elekta.

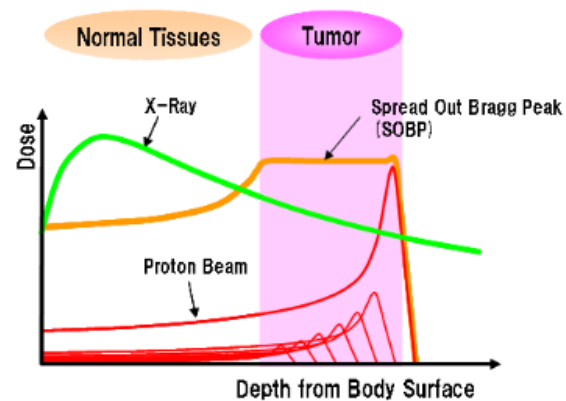
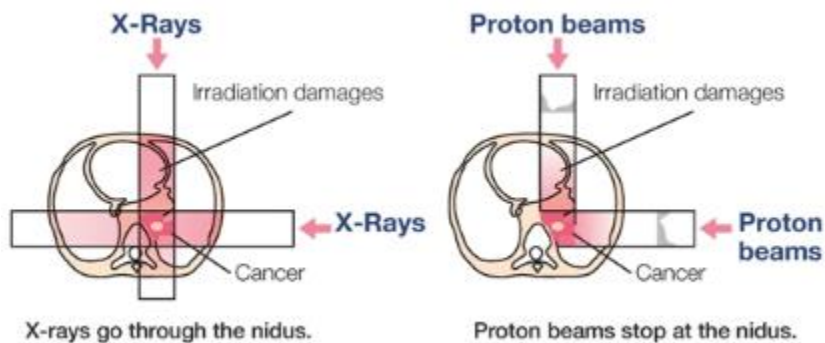




Радиохирургическая система «Кибернож», использующая рентгеновское излучение



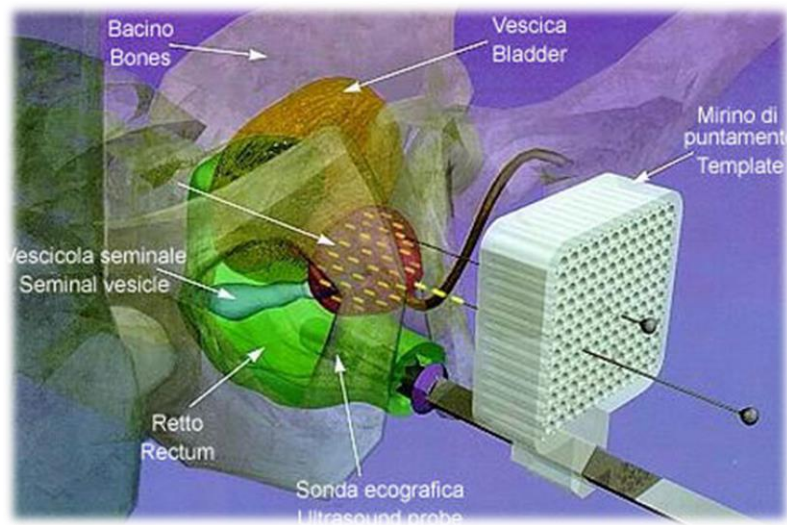
Протонная терапия в РНЦ ИТЭФ



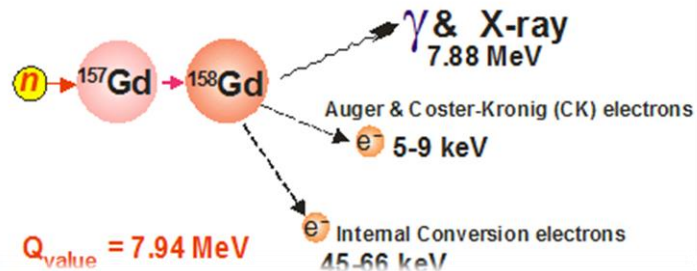
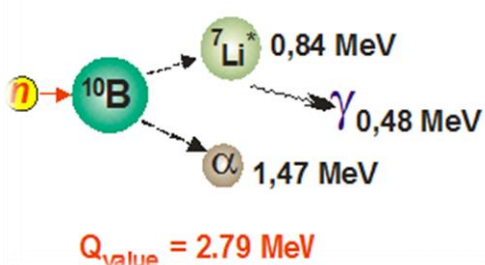
Брахитерапия

Вид радиотерапии, когда источник излучения (Ra-226, Ir-192, I-125, Cs-137, Co-60) вводится внутрь поражённого органа. Преимущество метода заключается в возможности подведения максимальных доз лучевой терапии непосредственно на опухолевый очаг и в зону интереса при минимизации воздействия на критические органы и смежные ткани.

Изотоп	Период полураспада	Средняя энергия	Поглощенная доза при лечении (рака предстат. железы)
I-125	60 дней	28,5 кэВ	145-160 Гр
Pd-103	17 дней	20,8 кэВ	110-115 Гр
Cs-131	9,7 дней	30,4 кэВ	90-100 Гр

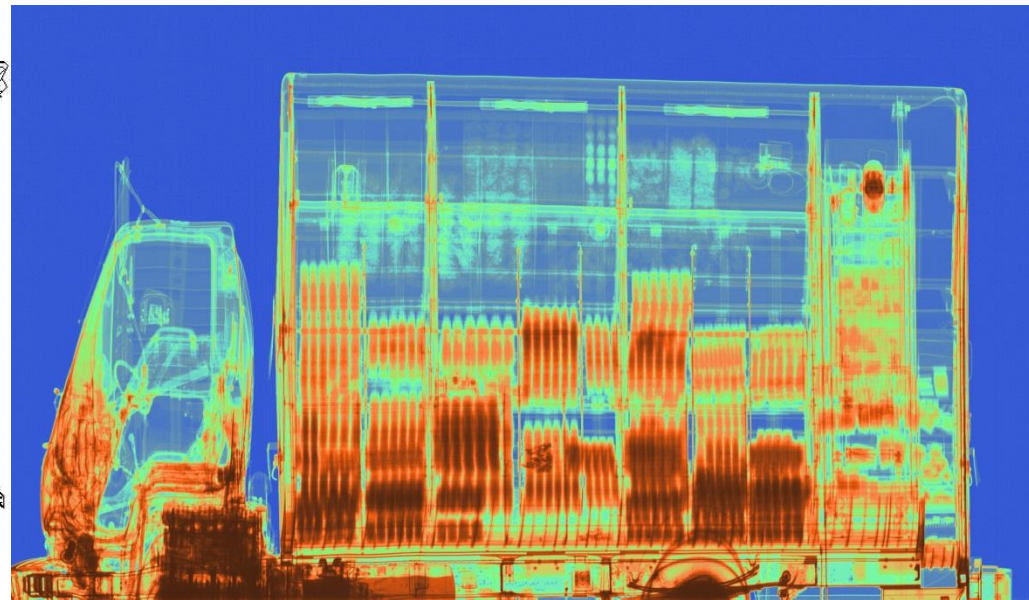
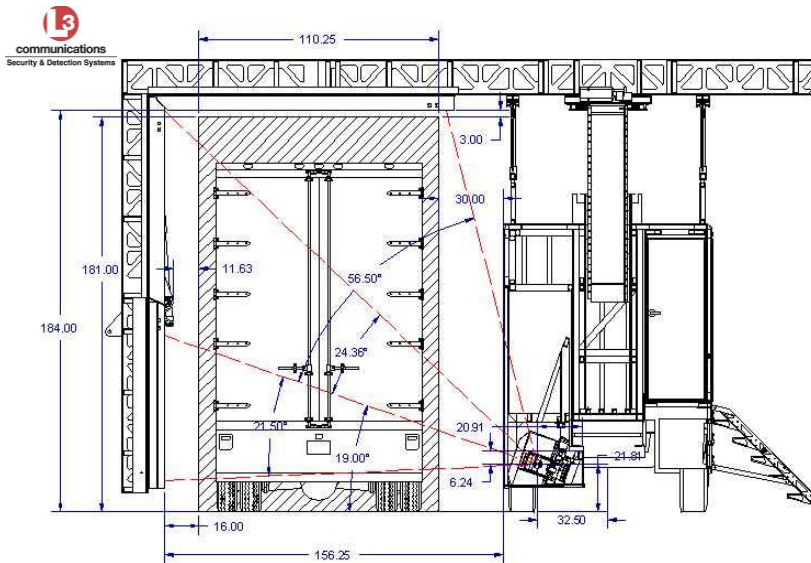


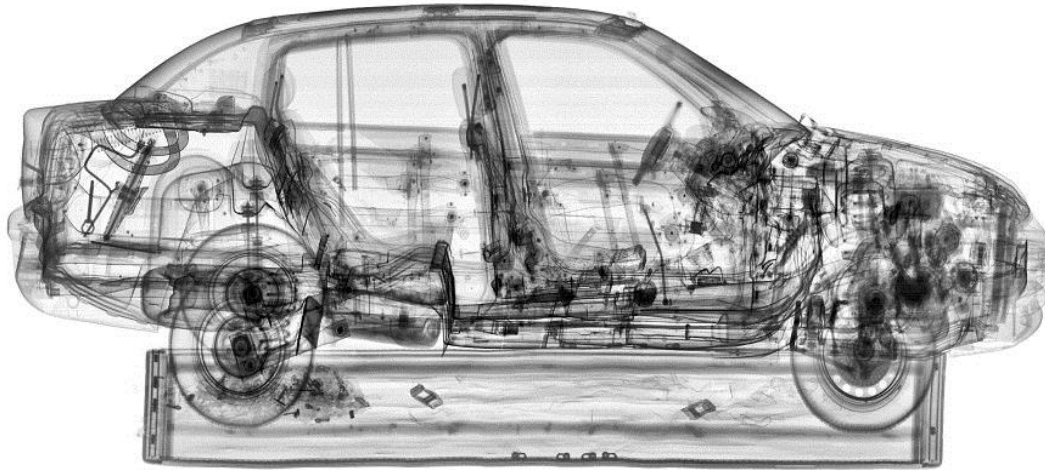
Нейтрон-захватная терапия



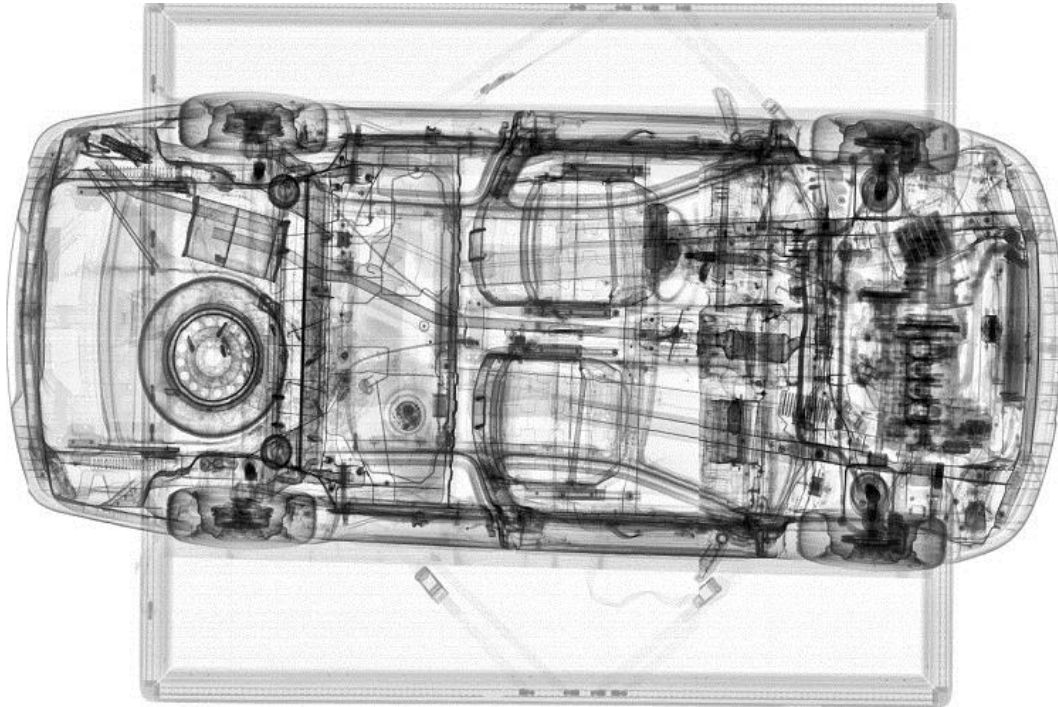
7. Системы безопасности

Рентгено-графические системы для проверки транспортных средств





**L3 Communications, Security,
And Detection Systems**



**X-Ray Imaging:
2 mm Resolution
9 MeV**

Мониторинг ядерных материалов (гамма-спектрометрия)

TSA/LAURUS Systems



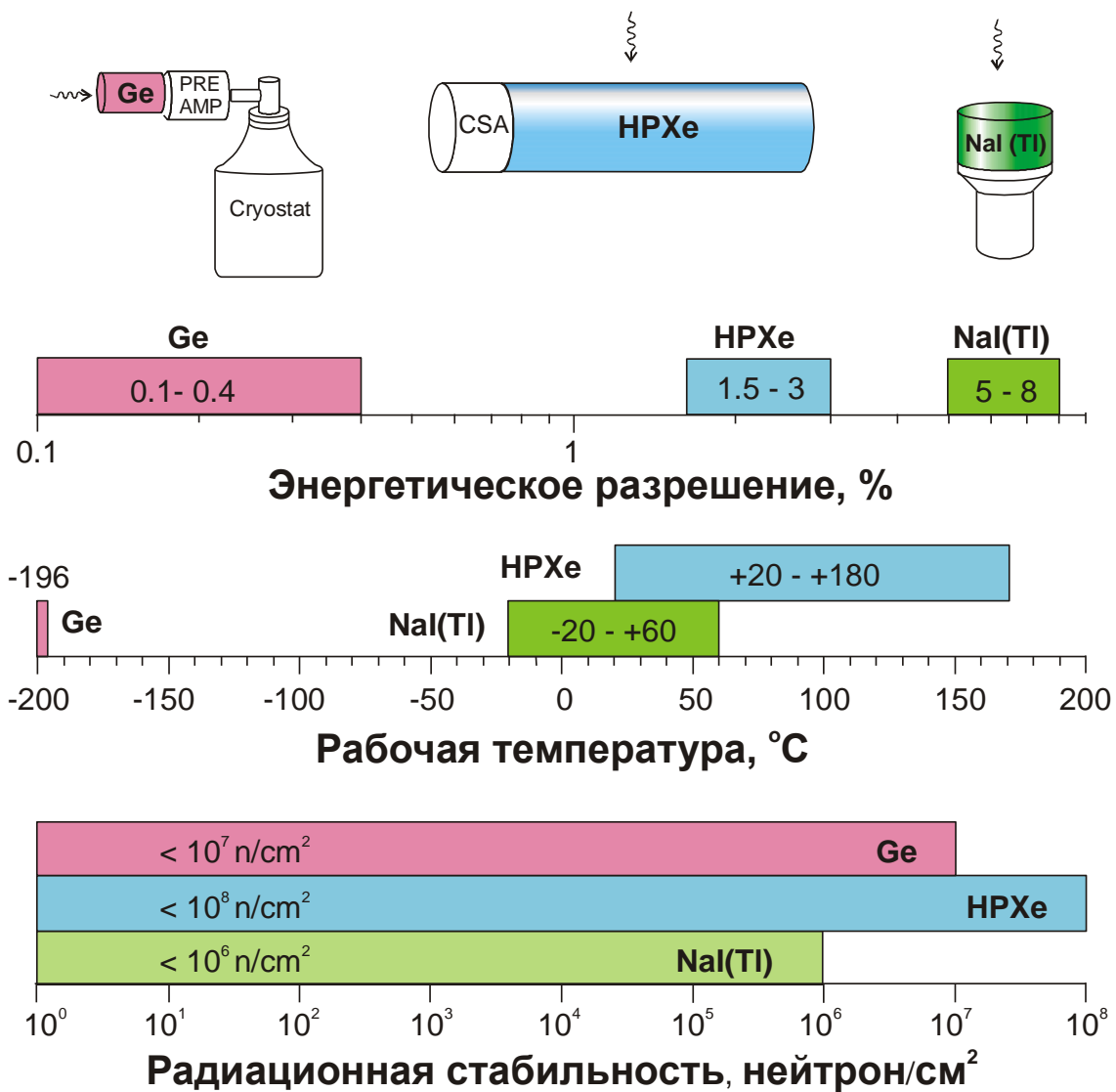
LUNDLUM



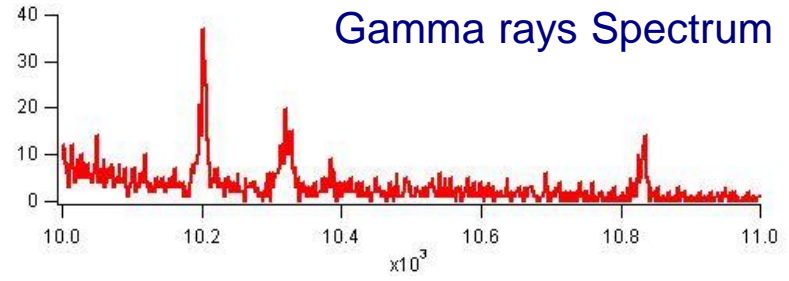
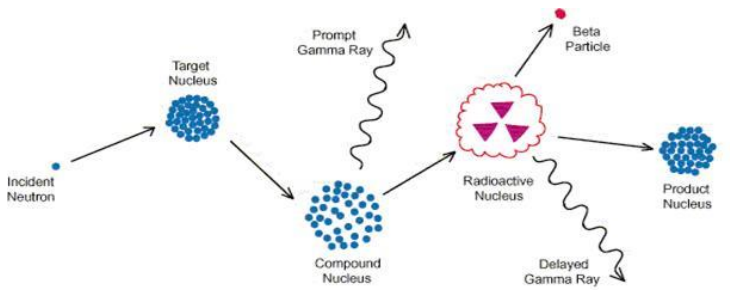
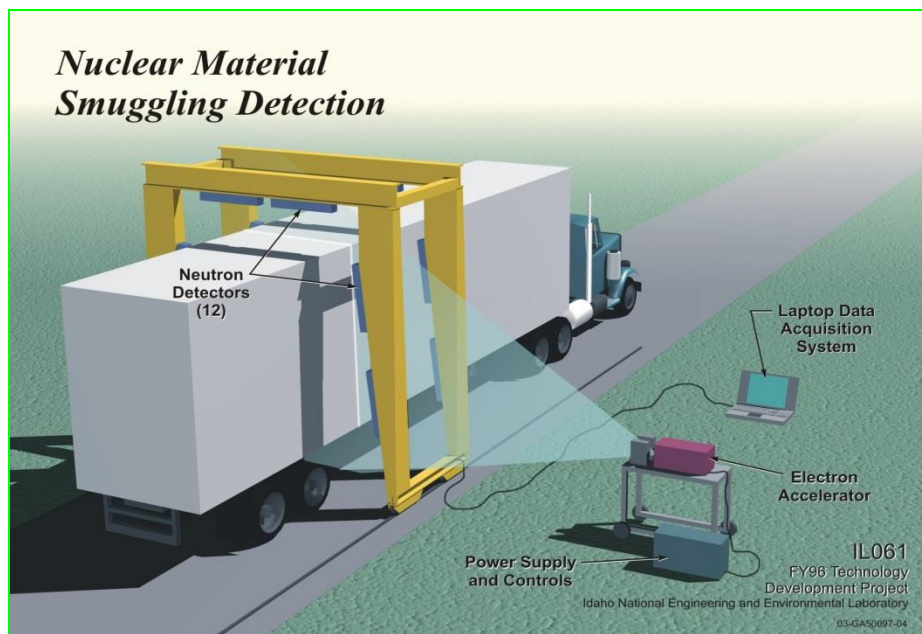
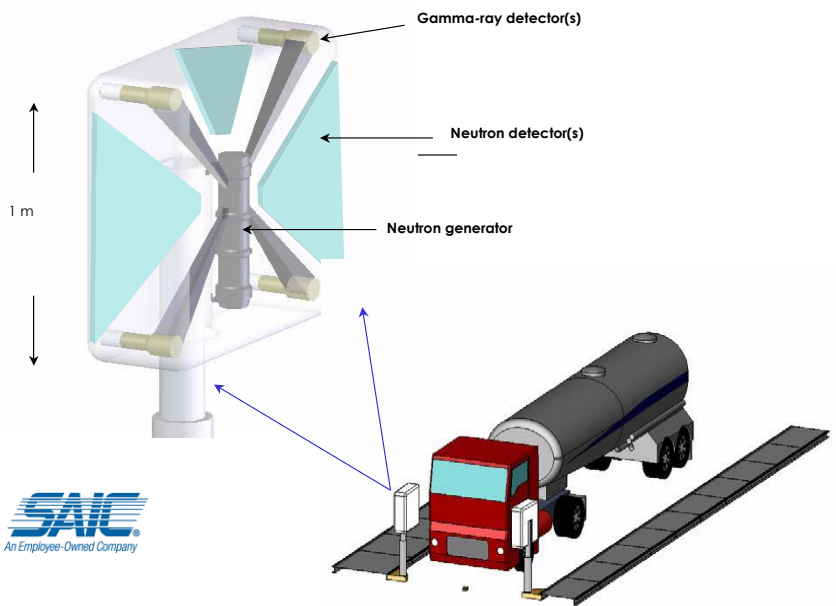
Canberra



Детекторные технологии, используемые для мониторинга ядерных материалов

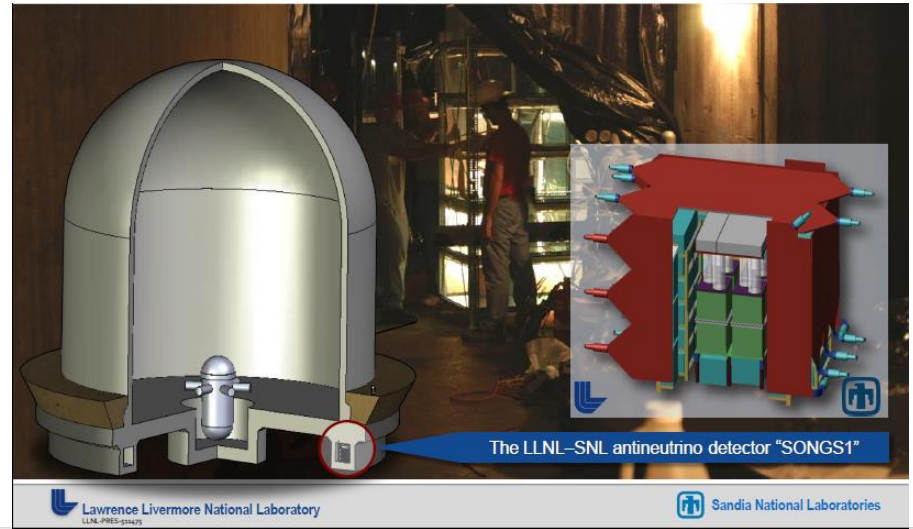


Нейтронно-активационные системы для идентификации химических взрывчатых веществ и ядерных материалов

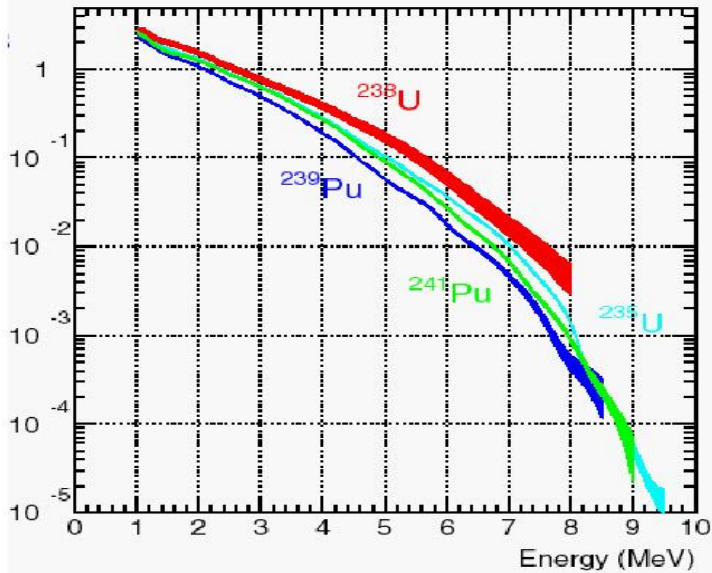


Neutron Activation Analyses

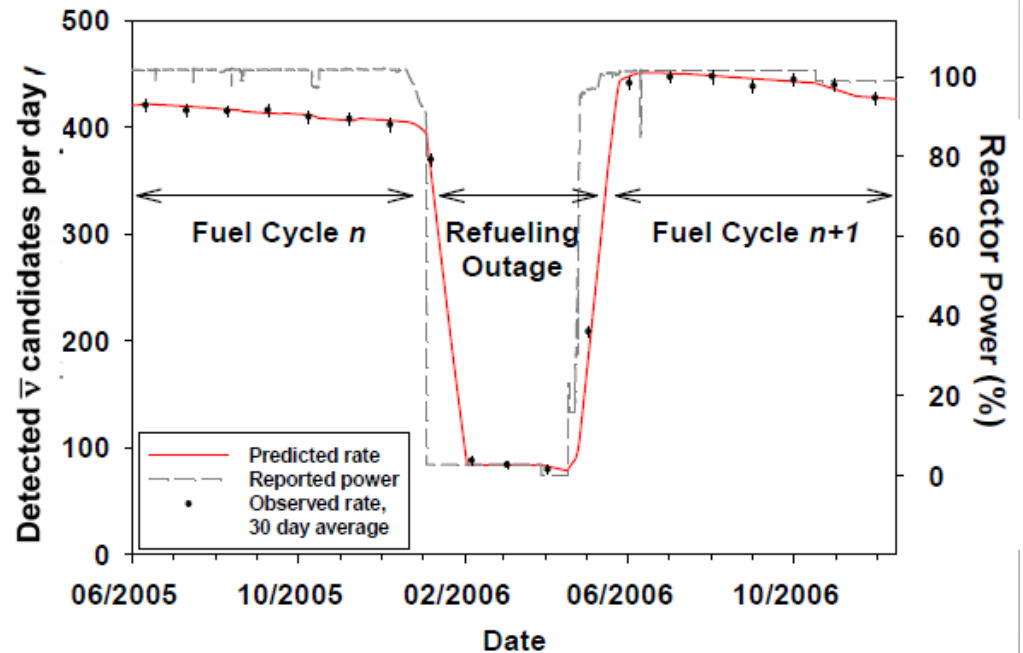
Мониторирование ядерных реакторов



neutrinos/MeV/fission



36 Neutrino Spectra from fusions



ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

Самое прекрасное, что может выпасть нам на долю, - это тайна. Стремление разгадать её стоит у колыбели подлинного искусства и подлинной науки. Тот, кто не знает этого чувства, утратил любопытство, неспособен больше удивляться, все равно что задутая свеча.

Альберт Эйнштейн

1931 г.

Источники информации

1. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 20; <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .
2. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава XIII. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>
3. Ядерная физика в Интернете: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>