



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

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

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

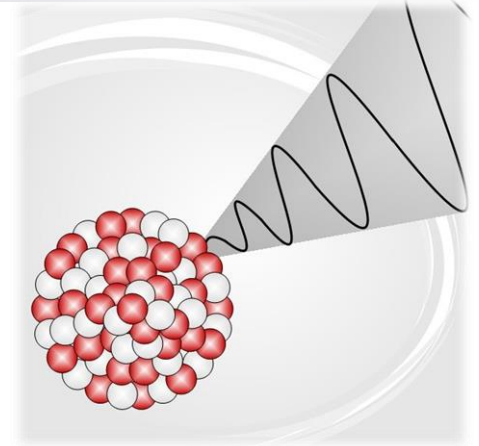
Лекция №10

Гамма-излучение ядер

2016

Лекция №10

Гамма-излучение ядер



- 1. Введение**
- 2. Законы сохранения при гамма-переходах**
- 3. Внутренняя конверсия**
- 4. Гамма-спектроскопия**
- 5. Гамма-спектрометры**
- 6. Эффект Мёссбауэра**
- 7. Использование ядерных гамма-излучений в прикладных исследованиях**

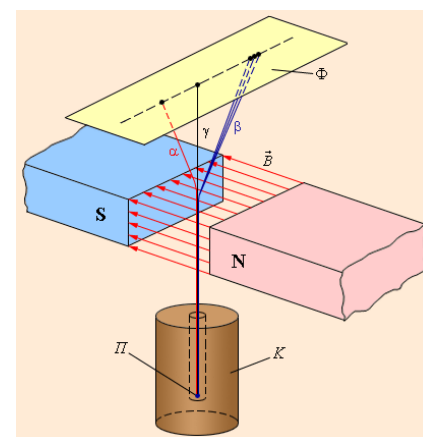
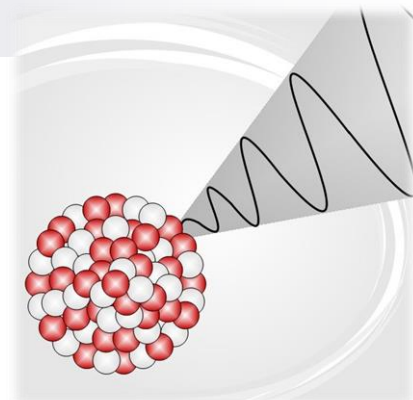
1. Введение

Гамма-излучение (γ -излучение) – электромагнитное излучение, принадлежащее наиболее высокочастотной (коротковолновой) части спектра электромагнитных волн.

<i>Название</i>	<i>Длина волны, м</i>	<i>Частота, Гц</i>
радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
микроволны	$3 - 3 \cdot 10^{-3}$	$10^8 - 10^{11}$
инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
гамма-излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

$$\nu \cdot \lambda = c$$

γ -излучение ядер: ядро (A, Z) испускает *гамма*-квант без изменения массового числа A и заряда Z . Испускание γ -излучения обычно происходит после α - или β -распадов атомных ядер, если образовавшееся ядро образуется в возбуждённом состоянии.



Гамма-излучение испускается при переходах между возбуждёнными состояниями атомных ядер (в диапазоне от ~ 1 кэВ до десятков МэВ), при ядерных реакциях (например, при аннигиляции электрона и позитрона), при электромагнитных взаимодействиях частиц

История открытия различных видов радиоактивности

Тип радиоактивности ядер	Вид обнаруженного излучения	Год открытия	Авторы открытия
Радиоактивность атомных ядер	Излучение	1896	А. Беккерель
Альфа-распад	${}^4\text{He}$	1898	Э. Резерфорд
Бета-распад	e^-	1898	Э. Резерфорд
Гамма-распад	γ -Квант	1900	П. Виллард
Спонтанное деление ядер	Два осколка	1940	Г.Н.Флеров, К.А.Петржак
Протонный распад	p	1982	З. Хофман и др.
Кластерный распад	${}^{14}\text{C}$	1984	Х. Роуз, Г. Джонс; Д.В.Александров и др.

Характеристики радиоактивного распада

Тип распада	Испускаемая частица	ΔZ	ΔN	ΔA	Типичные энергии испускаемых частиц, МэВ	Пример	Последствия
α	${}^4\text{He}^{2+}$	-2	-2	-4	$4 \leq E_\alpha \leq 10$	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$	$Z > 83$
β^-	$e^-, \bar{\nu}_e$	+1	-1	0	$0 \leq E_\beta \leq 2$	${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$	$N/Z > (N/Z)_{\text{стаб}}$
β^+	e^+, ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_\beta \leq 2$	${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{стаб}}$; лёгкое ядро
β^-	ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_\nu \leq 2$	$e^- + {}^{207}\text{Bi} \rightarrow {}^{207}\text{Pb} + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{стаб}}$; тяжёлое ядро
γ	Фотон	0	0	0	$0,1 \leq E_\gamma \leq 2$	${}^{60}\text{Ni} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \gamma$	Возбуждённое ядро
БК	Электрон	0	0	0	$0,1 \leq E_e \leq 2$	${}^{125}\text{Sb}^* \rightarrow {}^{125}\text{Sb} + e^-$	Случаи, где γ -эmission подавлена

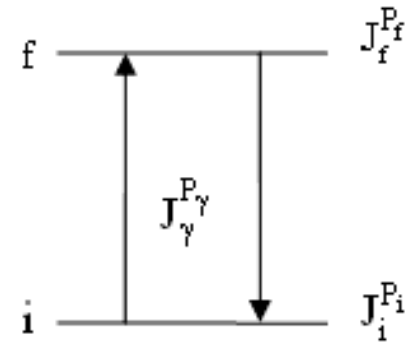
2. Законы сохранения при гамма-переходах

Гамма-переходы происходят между ядерными состояниями, характеризующимися определёнными значениями спина J_i , J_f и чётности P_i , P_f . Поэтому γ -кванты также имеют определённые значения спина J_γ и чётности P_γ .

Законы сохранения момента количества движения J и чётности P в электромагнитных переходах определяют спин J_γ и чётность P_γ , уносимую γ -квантом

$$\vec{J}_f = \vec{J}_i + \vec{J}_\gamma \quad \text{или} \quad |\vec{J}_f - \vec{J}_i| \leq \vec{J}_\gamma \leq \vec{J}_f + \vec{J}_i$$

$$P_f = P_i \cdot P_\gamma \quad \text{или} \quad P_\gamma = P_i \cdot P_f$$



Обычно используется классификация γ -квантов по полному моменту количества движения J и чётности P .

Полный момент количества движения γ -кванта принимает целочисленные значения, начиная с единицы: $J = 1, 2, 3, \dots$. Значение $J = 0$ для γ -кванта исключено, так как оно отвечает сферически симметричному состоянию, а электромагнитная волна поперечна.

Число J называется мультипольностью γ -кванта. В частности, низшие мультиполи имеют следующие названия: диполь ($J = 1$), квадруполь ($J = 2$), октуполь ($J = 3$). Спин γ -кванта $J = 1$

$$P = (-1)^{J+1} \text{ — магнитные } \gamma\text{-кванты (MJ);}$$

$$P = (-1)^J \text{ — электрические } \gamma\text{-кванты (EJ).}$$

Правила отбора по чётности

$$P_i \cdot P_f = (-1)^J \text{ для EJ } \gamma\text{-квантов;}$$

$$P_i \cdot P_f = (-1)^{J+1} \text{ для MJ } \gamma\text{-квантов.}$$

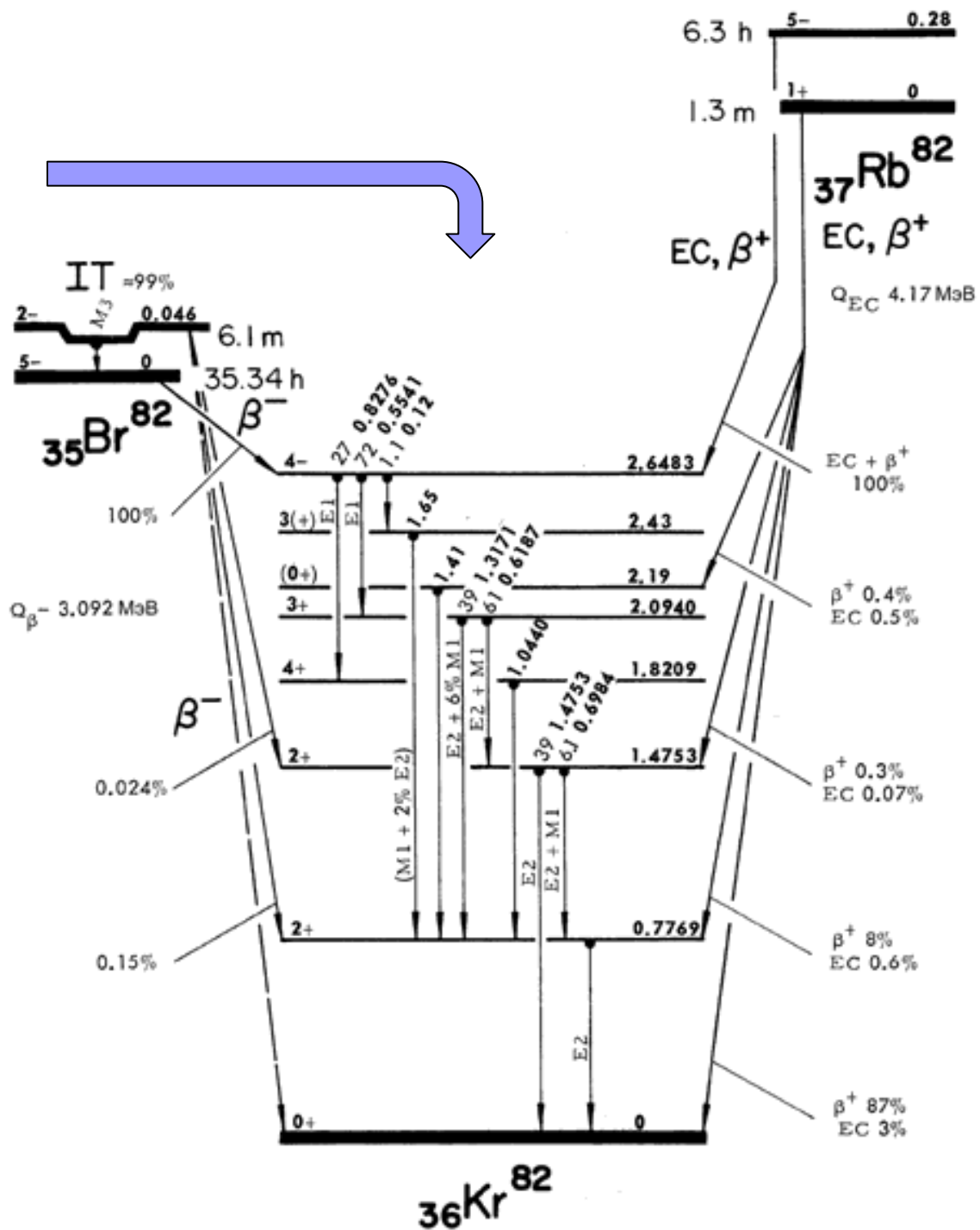
Возбужденные состояния ^{82}Kr

образуются в результате β^+ -распада и e -захвата основного $J^P = 1^+$ и изомерного $J^P = 5^-$ ($E^* = 0.28$ МэВ) состояний изотопа ^{82}Rb

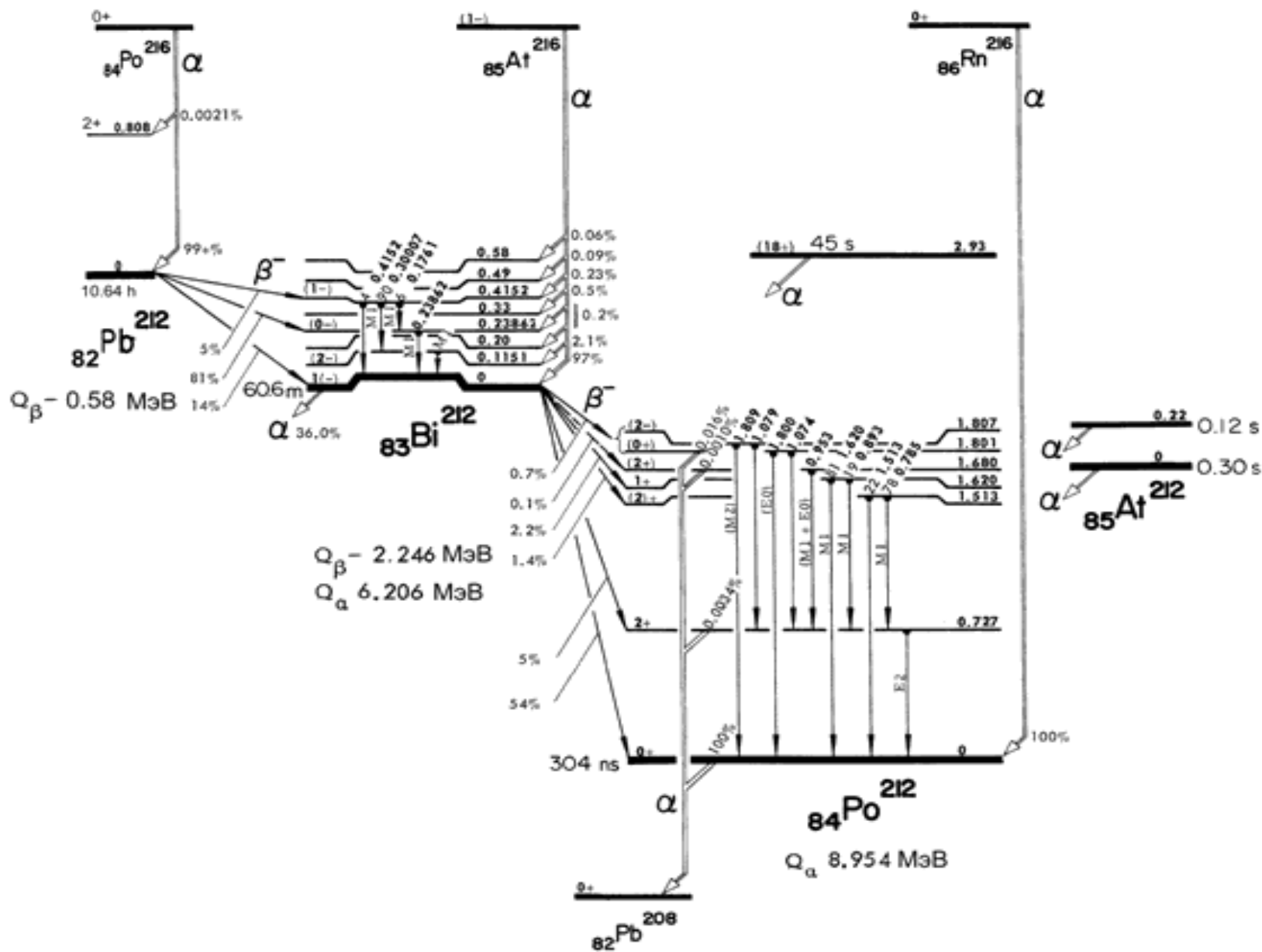
и

β^- -распада основного $J^P = 5^-$ и изомерного $J^P = 2^-$ ($E^* = 0.046$ МэВ) состояний изотопа ^{82}Br .

В изотопе ^{82}Kr возбуждаются состояния вплоть до энергии 2.6 МэВ, которые затем распадаются в основное состояние преимущественно в результате E1, E2 и M1 каскадных переходов.

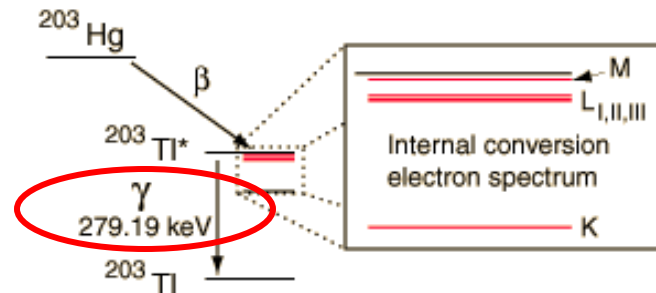
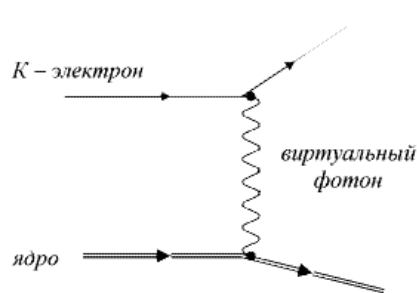
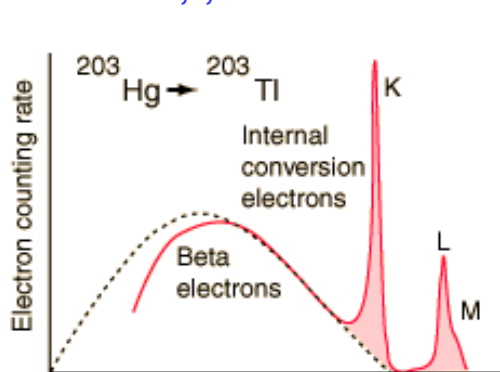


Сложные цепочки α -, β - и γ -переходов между ядрами-изобарами $A = 216$ и 212 .

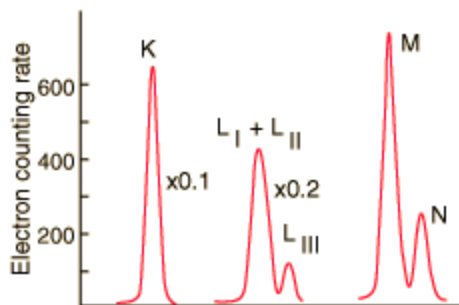


3. Внутренняя конверсия

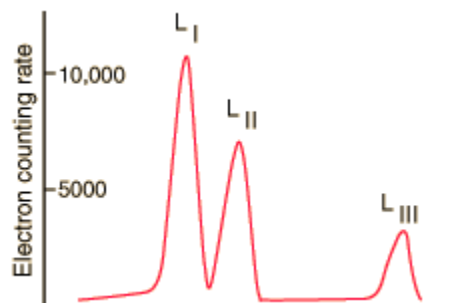
Внутренняя конверсия: атомное ядро, находящееся в возбуждённом состоянии с энергией E_i переходит в состояние с меньшей энергией E_f , передав энергию $W_{if} = E_i - E_f$ одному из электронов атомной оболочки, при этом испускается **электрон** с энергией $E_e = W_{if} - E_{K,L,M}$ и **гамма-кванты** при переходе электронов на более низкие оболочки атома



Электронная эмиссия из ядра ^{203}Hg при распаде в ^{203}Tl
A. H. Wapstra, et al., Physica 20, 169 (1954).



При более высоком энергетическом разрешении можно различить конверсию электронов из L, M и N оболочек
Z. Sujkowski, Ark. Fys. 20, 243 (1961).



При ещё более высоком разрешении можно разрешить три L подоболочки.
C. J. Herrlander and R. L. Graham, Nucl. Phys. 58, 544 (1964).

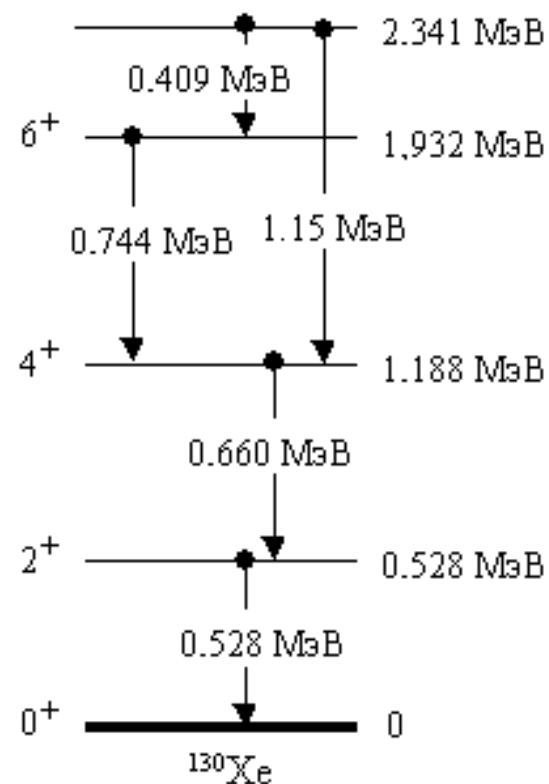
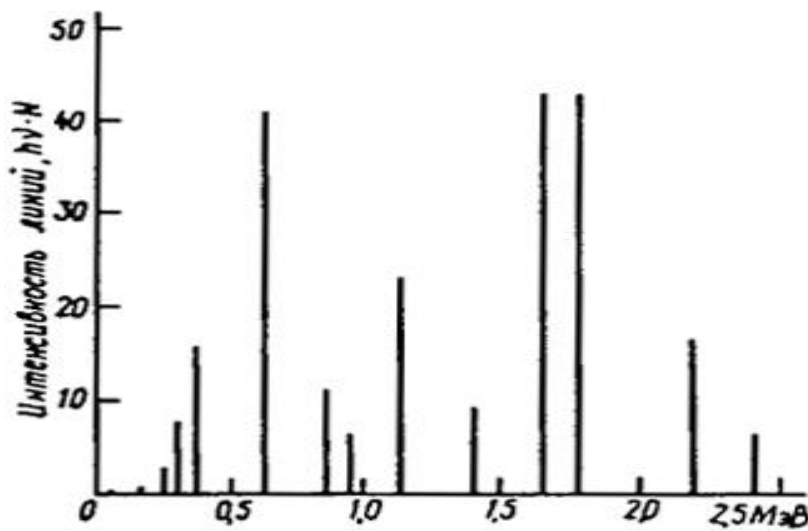
4. Гамма-спектроскопия

Гамма-спектроскопия – раздел физики атомного ядра, посвященный исследованию энергетических спектров гамма-излучения (зависимостей числа γ -квантов от их энергии), испускаемого атомными ядрами в распадах и реакциях.

В более широком смысле гамма-спектроскопия включает в себя исследование всех характеристик γ -излучения, испускаемого не только ядрами, но и атомами и элементарными частицами

К таким характеристикам испускаемых γ -квантов, помимо их энергии, относятся времена (или вероятности) их испускания, их моменты количества движения (мультипольности), тип (электрический или магнитный), поляризация (преимущественная направленность спина γ -кванта), зависимость вероятности испускания от угла вылета γ -кванта и др.

Энергетический спектр γ -излучения продуктов распада ^{226}Ra

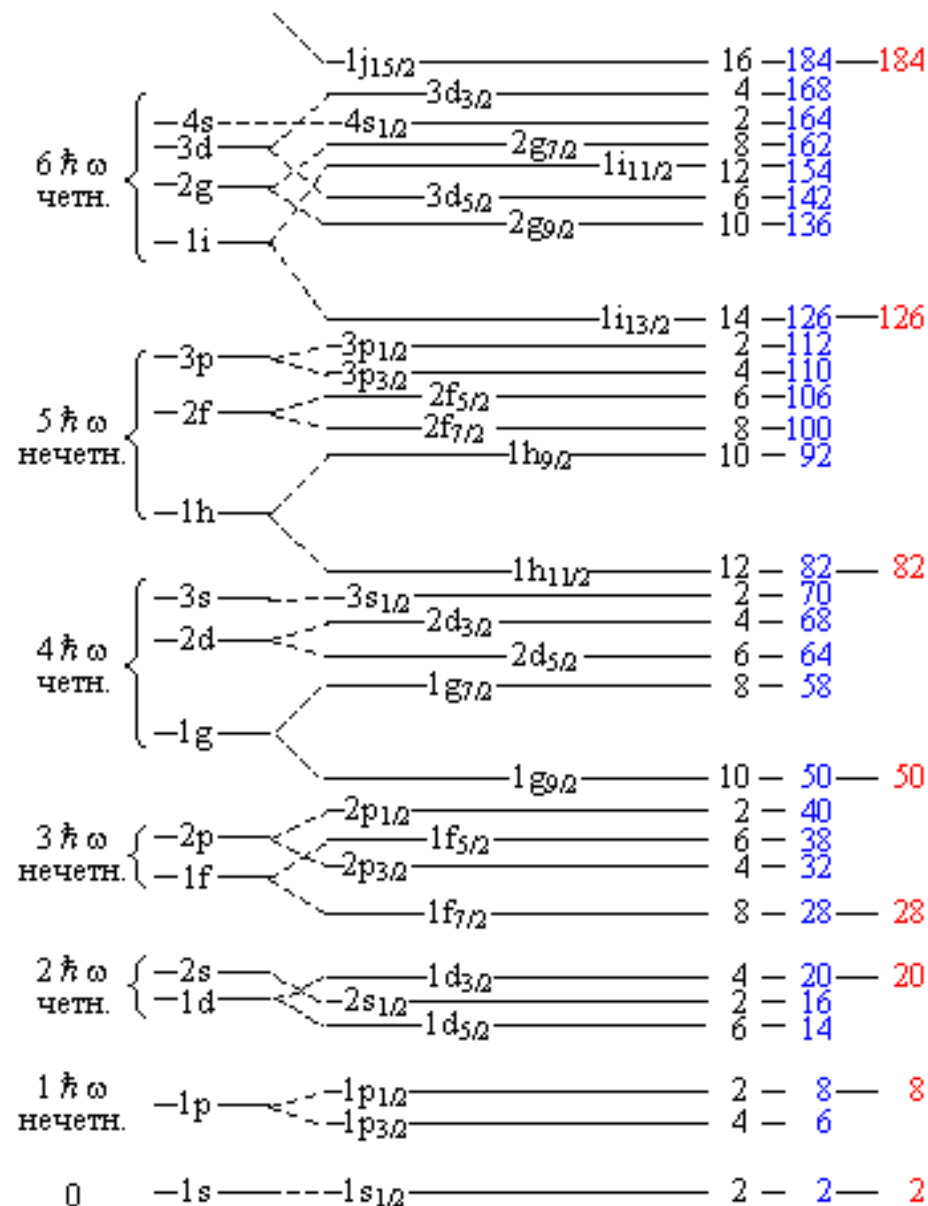


Изучение спектров γ -квантов

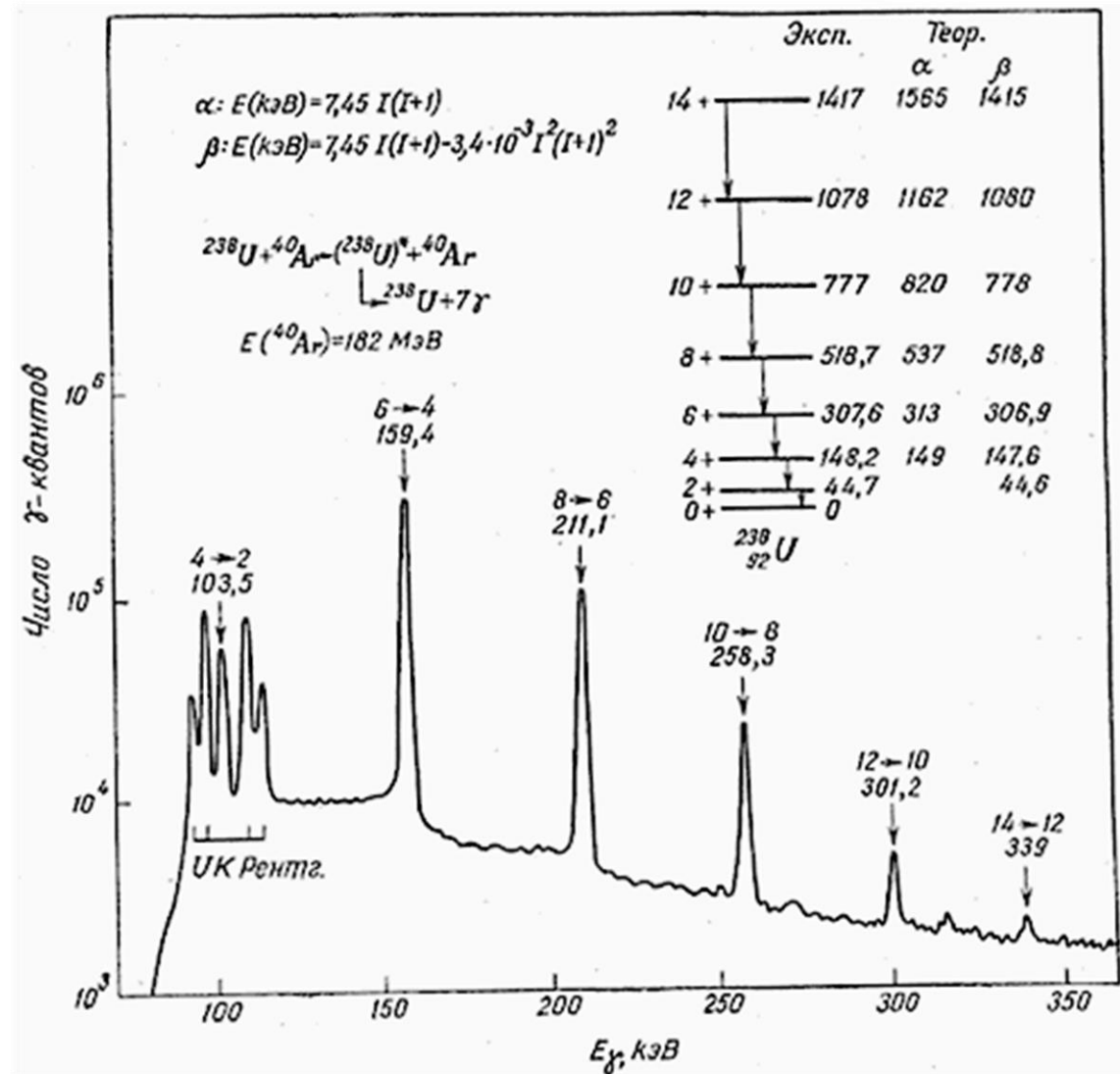
даёт богатую информацию о свойствах атомных ядер, позволяет исследовать изменение характеристик атомных ядер с изменением числа нейтронов и протонов в ядре, исследовать возбуждение коллективных движений ядерной материи, установить связь одночастичных движений с коллективными степенями свободы в ядре.

В частности, исследование вращательных спектров привело к созданию модели сфероидальных атомных ядер.

Однако, атомные ядра в основном состоянии могут иметь форму и отличную от сферически симметричной.



Кулоновское возбуждение вращательных состояний атомных ядер



Несферические ядра, обладающие осевой симметрией, имеют вращательную степень свободы, которой соответствует система вращательных уровней.

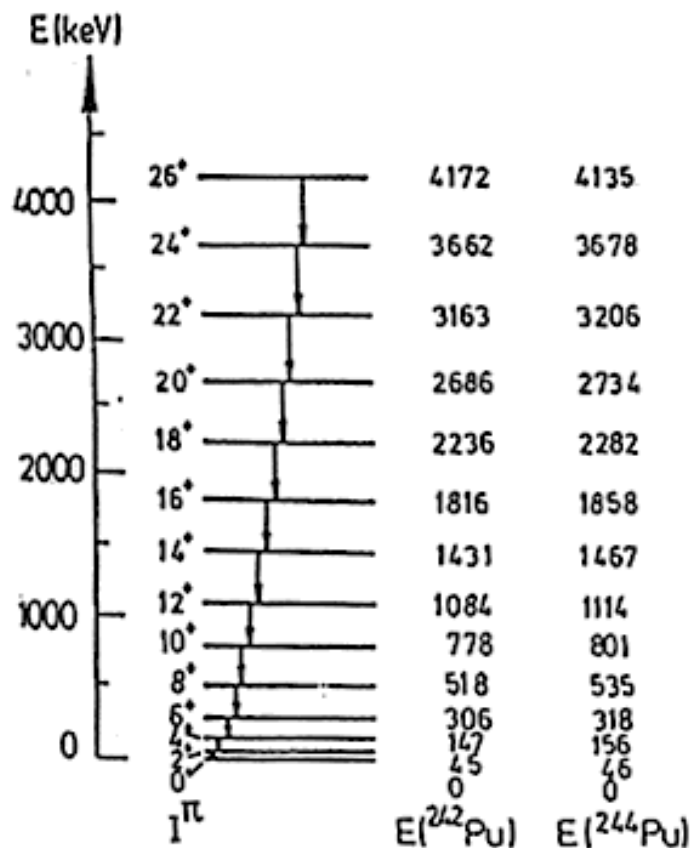
Поскольку в тяжелых ядрах масса и размер ядра велики, даже при небольших деформациях вращательный уровень обычно является наиболее низколежащим.

Энергии вращательных уровней $E_{вр}$ аппроксимируются соотношением

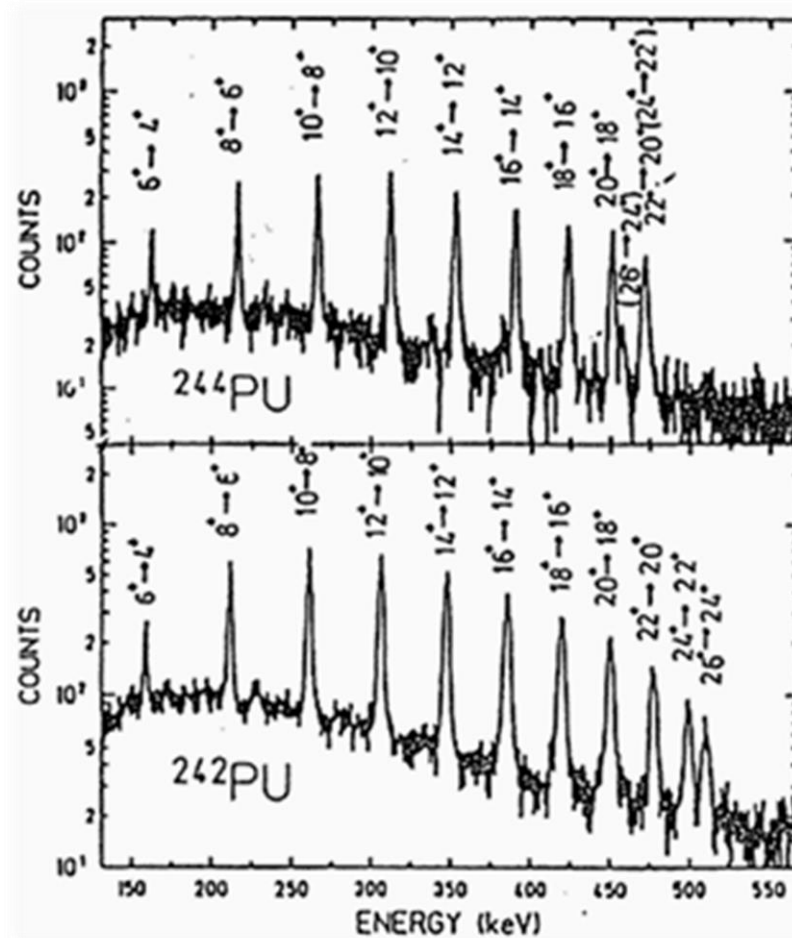
$$E_{вр} = \alpha J(J-1) + \beta J^2(J+1)^2.$$

Вращательные спектры бесспиновых ядер

$$E_J = \hbar^2 J(J+1)/2I.$$



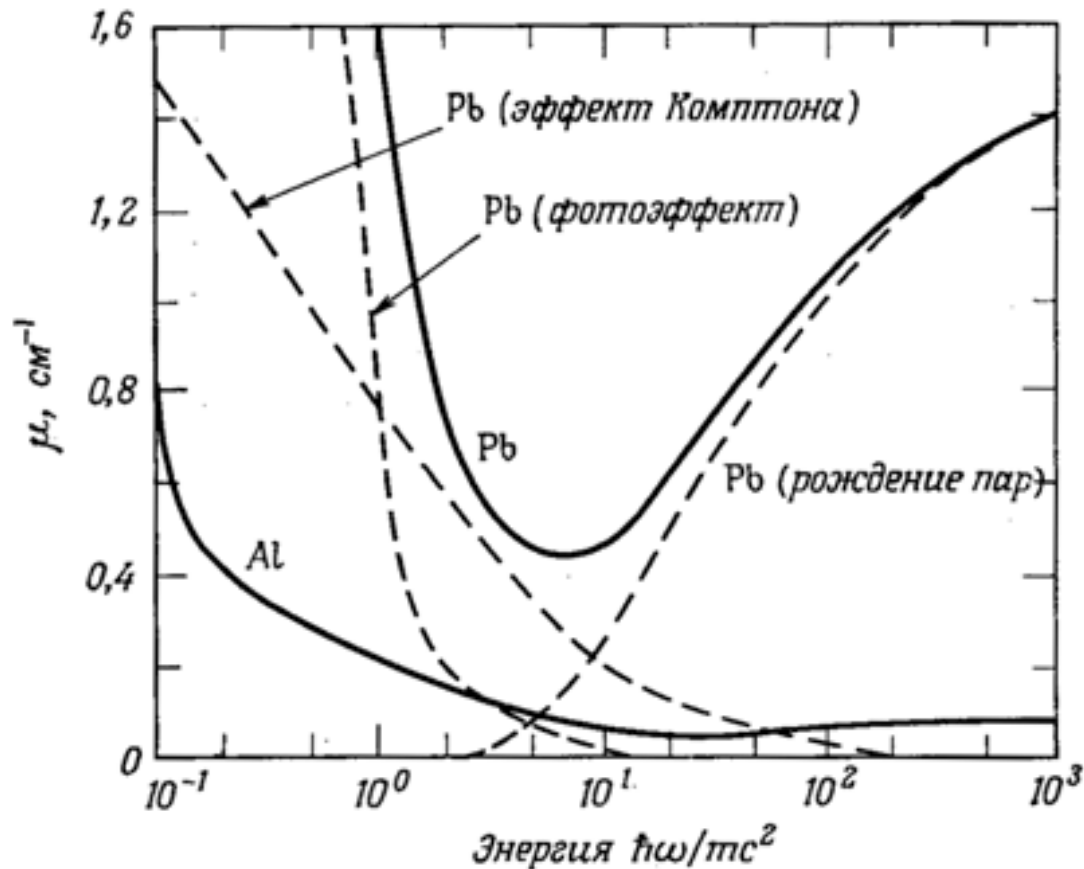
Энергии вращательных состояний изотопов $^{242,244}\text{Pu}$



Энергии γ -квантов, образующихся в результате каскадных переходов между вращательными состояниями изотопов $^{242,244}\text{Pu}$.

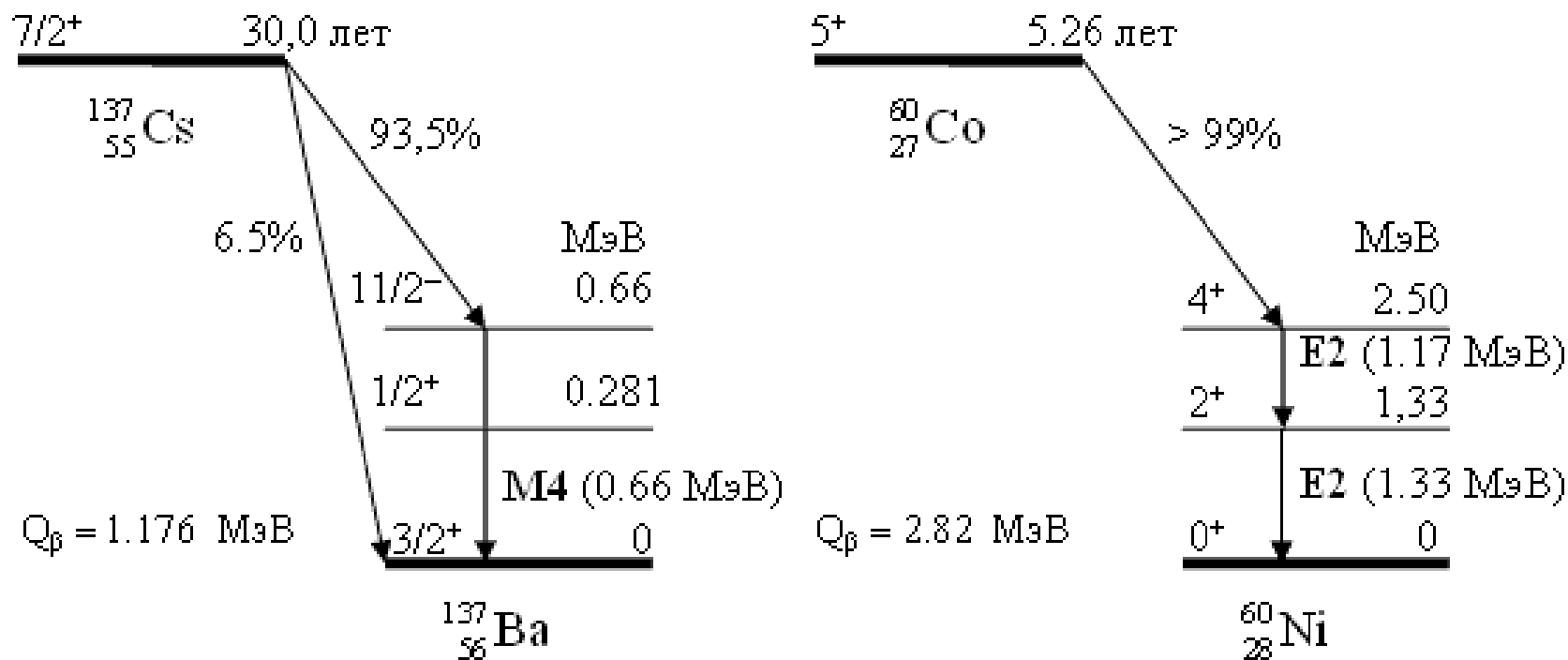
5. Гамма-спектрометры

Гамма-спектрометр – прибор для определения энергии γ -квантов. Регистрация γ -кванта в гамма-спектрометр как правило основана на трех основных процессах взаимодействия γ -кванта с веществом: фотоэффекте, Комптон-эффекте и рождении электрон-позитрон. пары



Зависимость полного коэффициента поглощения гамма-излучения в свинце и алюминии от энергии (сплошные линии).

Радиоактивные источники γ -излучения ^{137}Cs , ^{60}Co .



Для калибровки детекторов ядерного излучения часто используются стандартные источники γ -излучения с определённой энергией γ -квантов – ^{137}Cs и ^{60}Co . В этих источниках γ -кванты образуются в результате β -распадов изотопов ^{137}Cs и ^{60}Co на возбуждённые состояния изотопов ^{137}Ba и ^{60}Ni соответственно.

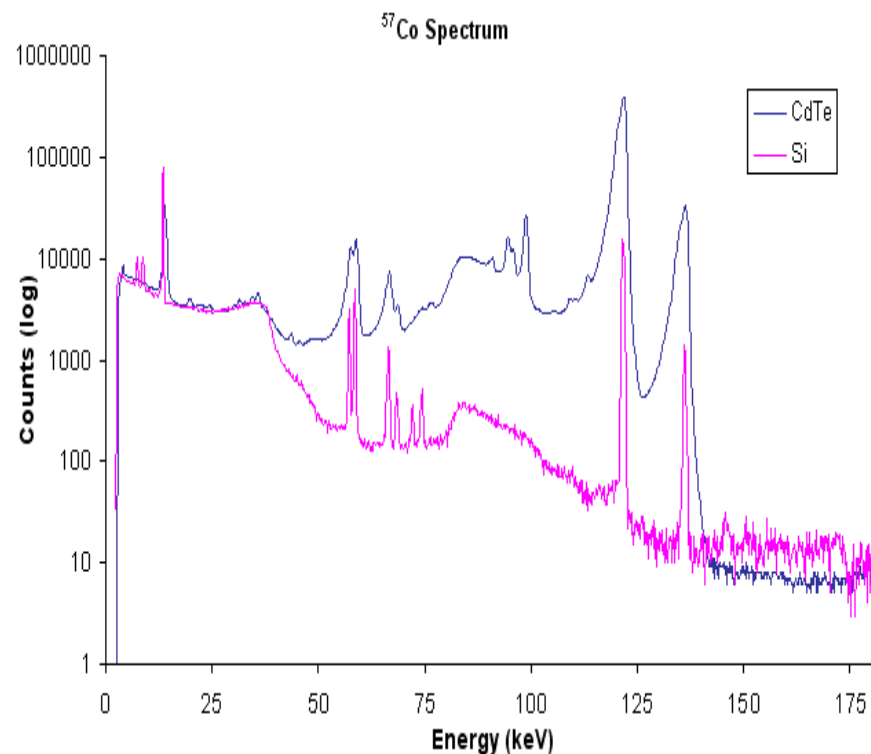
Основными характеристиками гамма-спектрометра

являются **разрешающая способность** (разрешение) и **эффективность**, обычно выраженные в %.

Разрешающая способность гамма-спектрометр характеризует возможность разделения двух линий γ -излучения, близких по энергии. Количественно она определяется отношением $\Delta E/E$, где ΔE – ширина линии (в единицах энергии) на половине ее высоты

Среди гамма-спектрометров лидирующее положение, безусловно, занимают полупроводниковые детекторы (ППД) - их энергетическое разрешение на гамма-линии 662 кэВ (^{137}Cs) составляет 1.5-2 кэВ, и сцинтилляционные детекторы, благодаря своей высокой чувствительности и достаточно хорошим эксплуатационным свойствам.

Основными недостатками этих детекторов являются: низкое энергетическое разрешение сцинтилляционных детекторов (8-10% для гамма-квантов с энергией 1 МэВ) и необходимость охлаждения до температуры жидкого азота при работе с ППД, а для Ge(Li) и при хранении, а также высокая стоимость ППД больших размеров.



НРХе – гамма-спектрометр на сжатом ксеноне

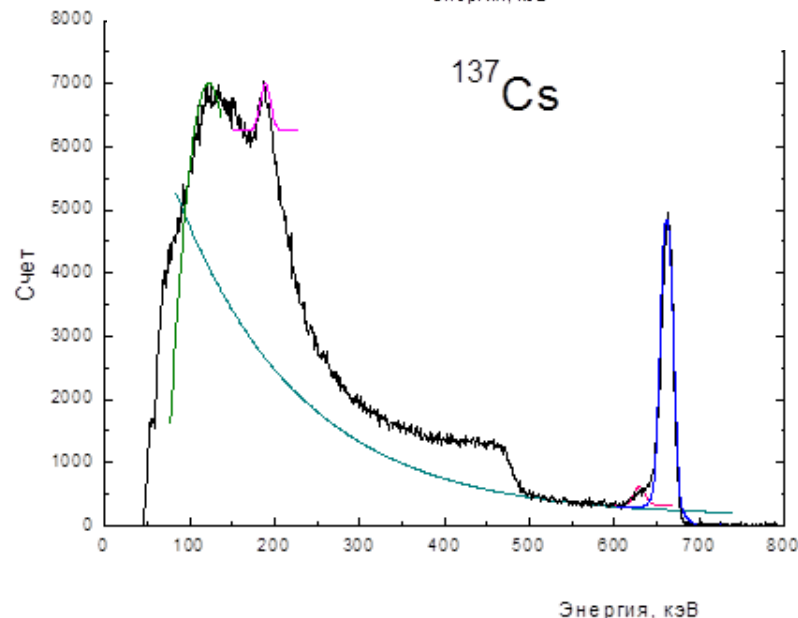
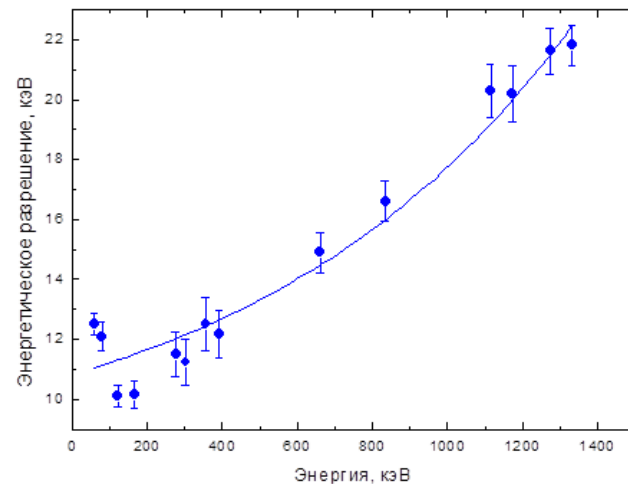
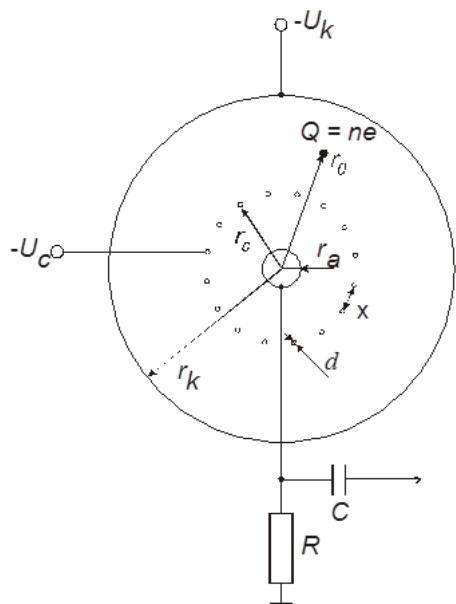
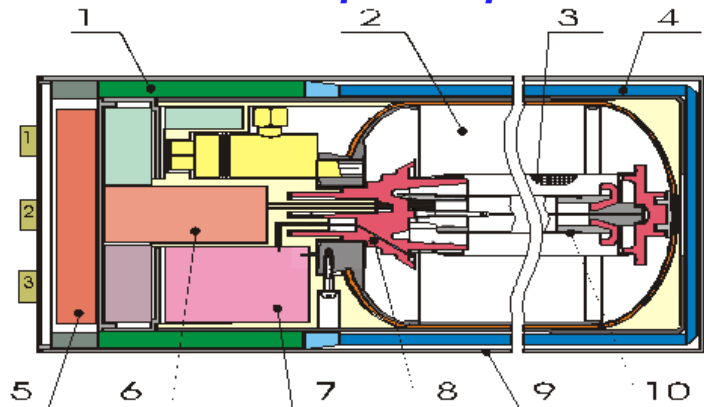


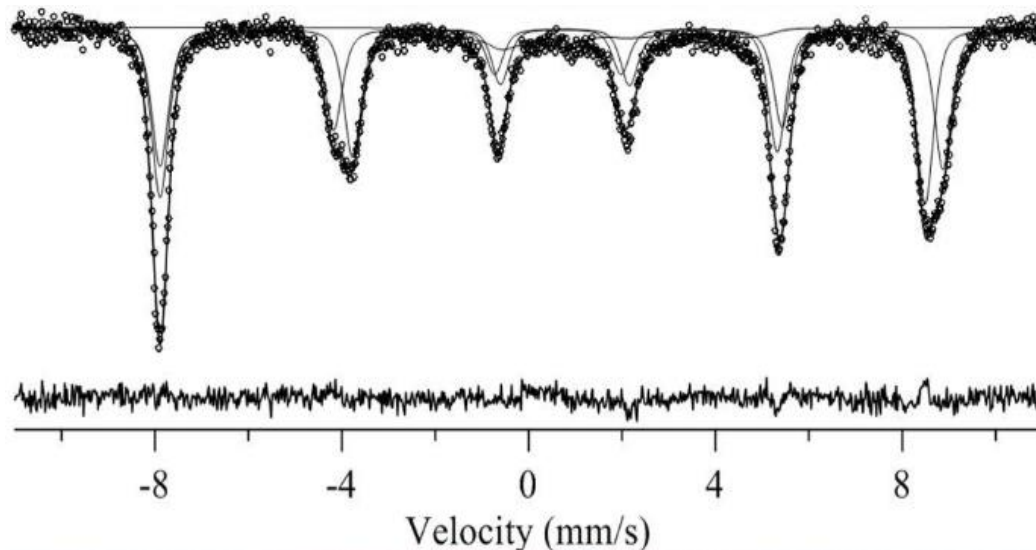
Схема *импульсной цилиндрической ионизационной камеры* с экранирующей сеткой на сжатом ксеноне

Синим цветом показан пик фотоэффекта, красным – пик характеристического излучения, розовым – пик обратного рассеяния, зеленым – экспоненциальный фон

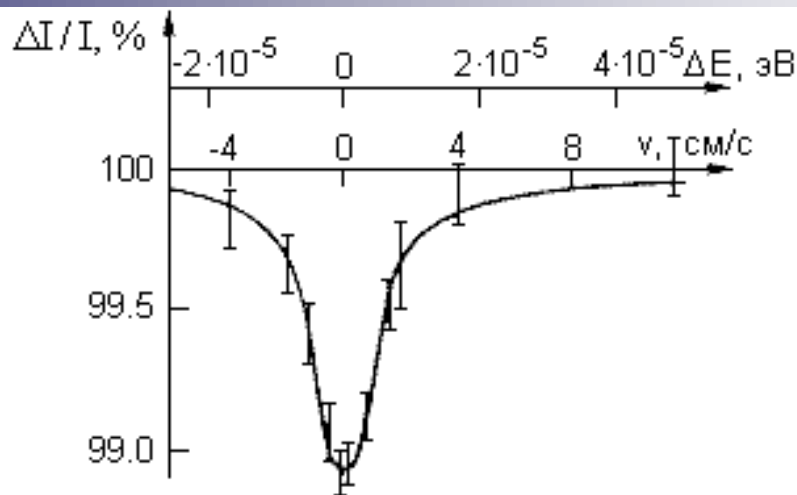
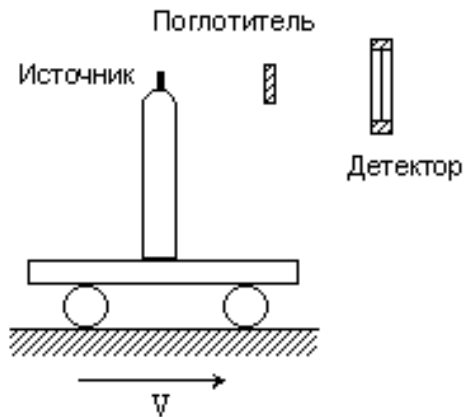
6. Эффект Мёссбауэра

Естественная ширина Γ ядерных уровней мала по сравнению с энергией отдачи ядра. Например, естественная ширина Γ первого возбуждённого уровня ядра ^{57}Fe , при энергии возбуждения $E = 14.4$ кэВ, равна $\hbar/\tau = 4.6 \cdot 10^{-9}$ эВ (среднее время жизни $\tau = 98$ нс), тогда как при испускании и при поглощении γ -квантов это ядро приобретает энергию отдачи $T_R \simeq E^2/2Mc^2 \simeq 0.02$ эВ (где M – масса атома ^{57}Fe).

В кристаллической решётке, ситуация качественно изменяется: импульс отдачи получает *не отдельное ядро, а весь кристалл, в котором находится ядро*, испускающее γ -квант. Чтобы наблюдать резонансное поглощение мишенью из ^{57}Fe γ -квантов, испускаемых источником из ^{57}Fe , можно просто перемещать источник со скоростью, составляющей десятые доли сантиметра в секунду. С помощью метода резонансной флюоресценции можно измерять энергию с относительной точностью $\Delta E/E \sim 10^{-15} - 10^{-17}$.



По смещению линий мессбауэровских спектров резонансного поглощения определяют молекулярную структуру химических соединений, изучают сверхтонкую структуру спектров, обусловленную электрическим квадрупольным и магнитным дипольным моментами ядер.



Рудольф Людвиг Мёссбауэр
(1929-2011), Н.п. 1961

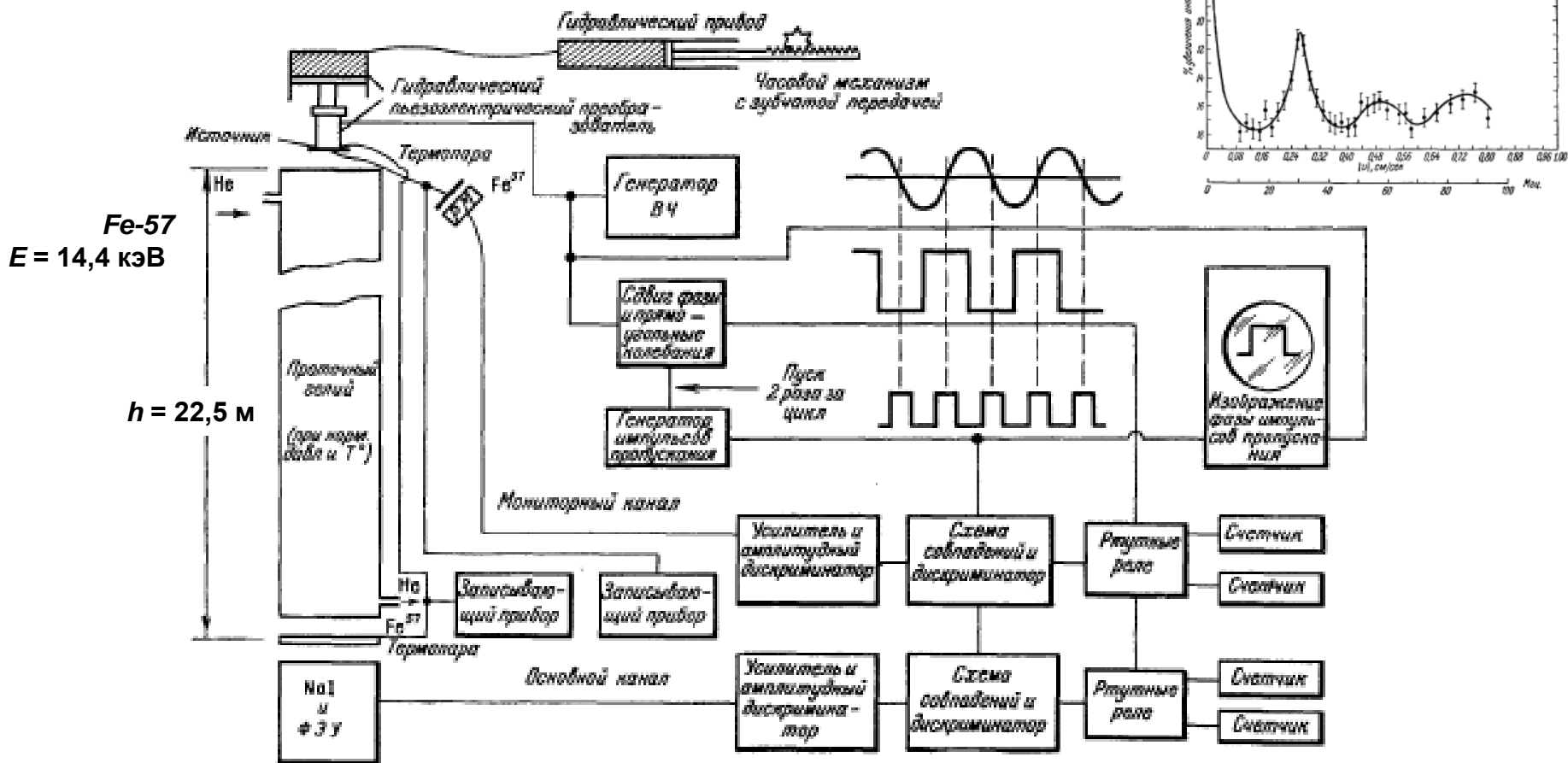
В 2000 в журнале *Hyperfine Interactions* Мёссбауэр дал наглядную интерпретацию эффекта:

«Ситуация ... напоминает человека, прицельно бросающего камень из лодки. Большую часть энергии согласно закону сохранения импульса получает лёгкий камень, но небольшая часть энергии броска переходит в кинетическую энергию получающей отдачу лодки. Летом лодка просто приобретёт некоторое количество движения, соответствующее отдаче, и отплывёт в направлении, противоположном направлению броска. Однако зимой, когда озеро замерзнет, лодку будет удерживать лёд, и практически вся энергия броска будет передана камню, лодке (вместе с замерзшим озером и его берегами) достанется ничтожная доля энергии броска. Таким образом, отдача будет передаваться не одной только лодке, а целому озеру, и бросок будет производиться «без отдачи»».

В 1961 году за открытие и теоретическое обоснование явления ядерного гамма-резонанса Р. Л. Мёссбауэр был присуждён Нобелевская премия по физике (совместно с Р. Хофштадтером, получившим премию за исследования рассеяния электронов на ядрах).

Одним из впечатляющих применений эффекта Мёссбауэра стал эксперимент Паунда и Ребки, которые в 1960 г. измерили в лабораторных условиях гравитационное красное смещение спектра гамма-квантов, предсказываемое общей теорией относительности.

Эксперимент Р.Паунда и Г.Ребки

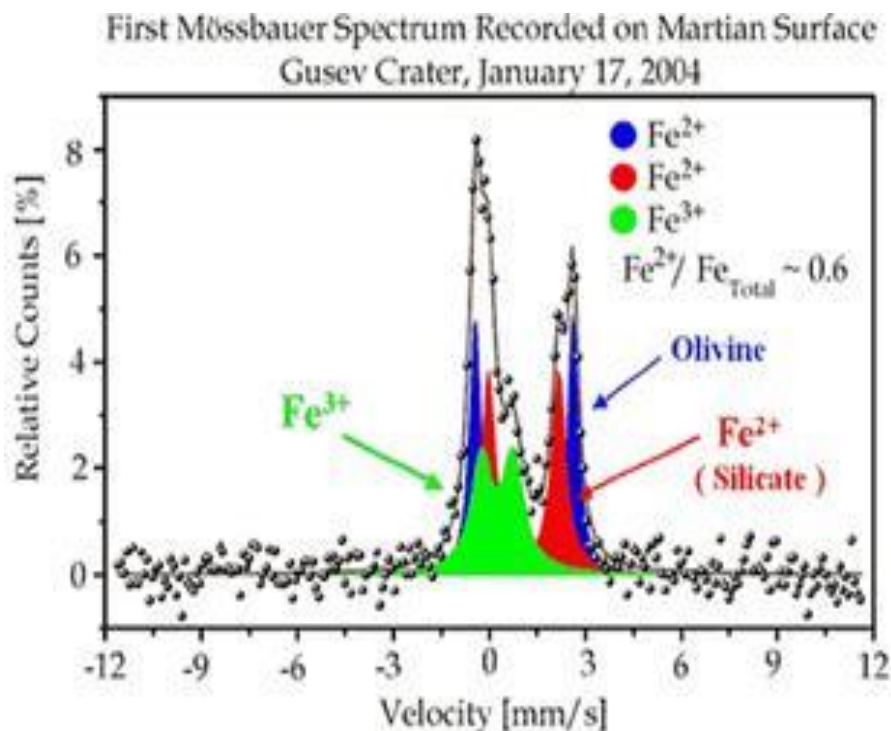


Блок-схема установки для измерения гравитационного красного смещения, собранной в банке Гарвардского университета. РМ—сцинтилляционный детектор (перед РМ—поглотитель, Fe^{57}).

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -(2,57 \pm 0,26) \times 10^{-15}$$

В пределах ошибки гравитационное красное смещение частоты кванта совпало с предсказанием ОТО

Мессбауэровский спектр *грунта Марса*, измеренный на *Mars Exploration Rover Spirit* в кратере Гусева, демонстрирует наличие трёх различных железосодержащих пород. Один из них, оливин – ярко-зеленый минерал часто встречающийся в лавах на Земле. Сохранность этого минерала говорит о том, что он не подвергался эрозии и химическому воздействию воды.



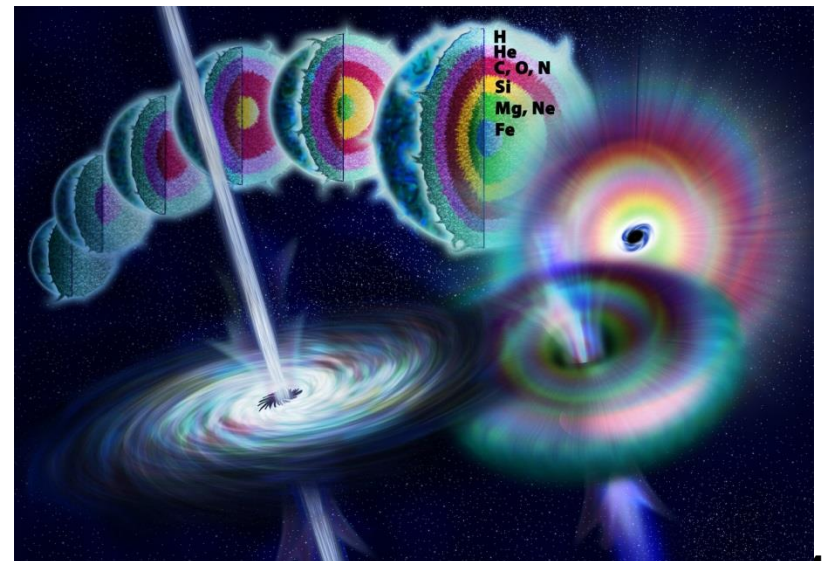
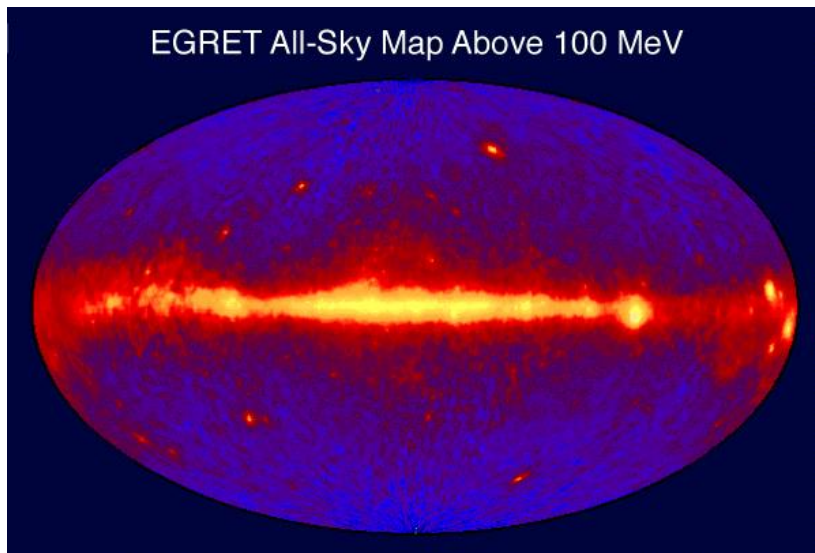
Science, 305, 6 August, 2004

Разработанный по инициативе специалистов ИКИ РАН в 1990г для космической миссии Марс-96 Мэссбауэровский спектрометр был установлен на марсоходах *Spirit* и *Opportunity* американской миссии *Mars Exploration Rover*. Эксперимент был успешно осуществлен в 2003 – 2004гг. Впервые в космических исследованиях получены мессбауэровские спектры состава грунта одной из планет Солнечной системы. По этим спектрам определён состав соединений железа на поверхности Марса.

7. Использование ядерных гамма-излучений в прикладных исследованиях

Ядерные гамма-излучения широко используются в современных прикладных исследованиях, включая

- ядерную медицину
- анализ состава вещества
- системы безопасности и контроля за нераспространением ядерных материалов
- геологоразведку
- исследования Вселенной

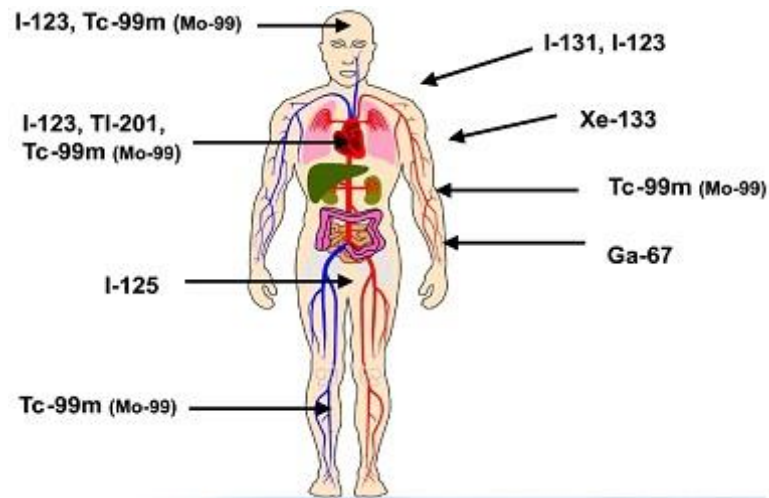


Радиоизотопная диагностика в ядерной медицине

Использования радионуклидов для диагностики *in vivo*

Что такое ядерная медицина?

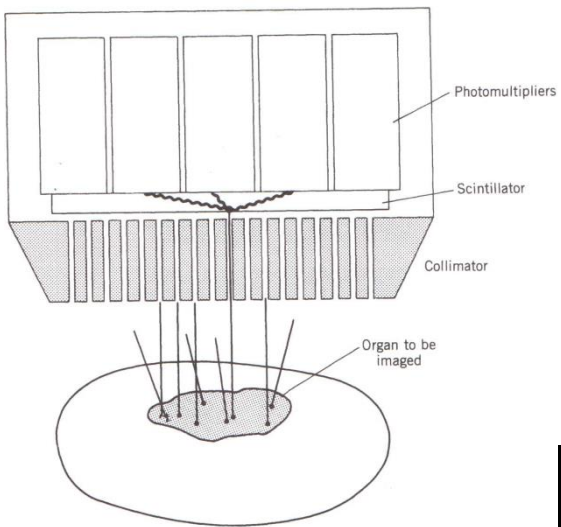
- Ядерная медицина - это медицина, которая использует радиоактивные изотопы для постановки диагноза и лечения болезней (терапия).
- Ядерная медицина позволяет получать данные о функционировании органа и его структуре на молекулярном уровне.
- Ядерная медицина использует относительно небольшие количества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



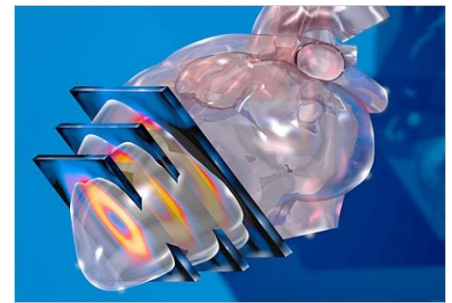
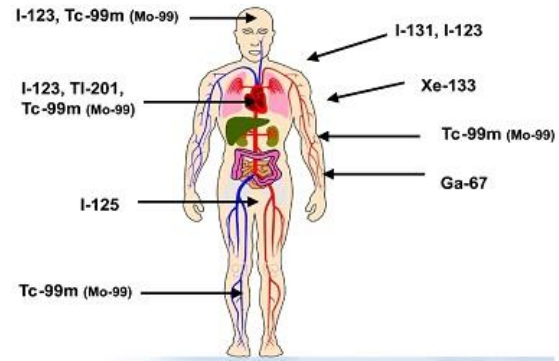
Основные методы получения изображений в ядерной медицине:

- 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

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

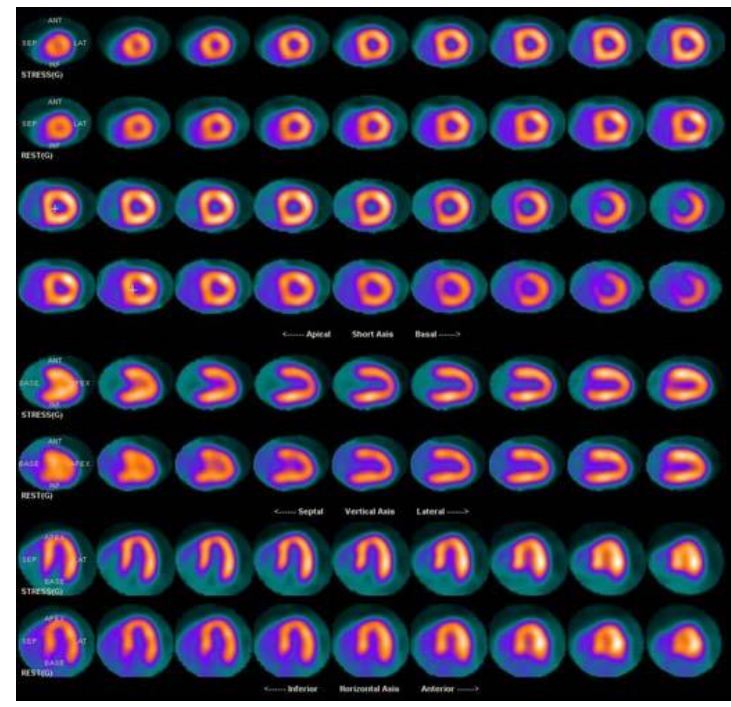
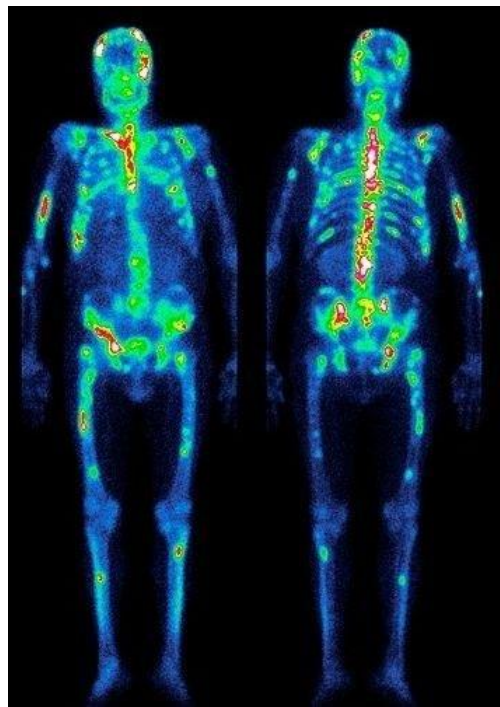


Гамма-камера



Кардиология

Онкология



Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ)

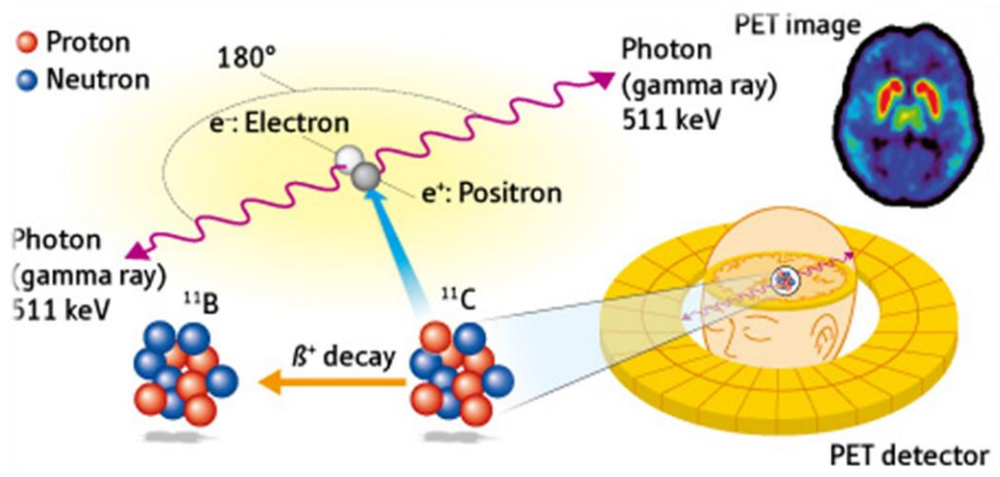
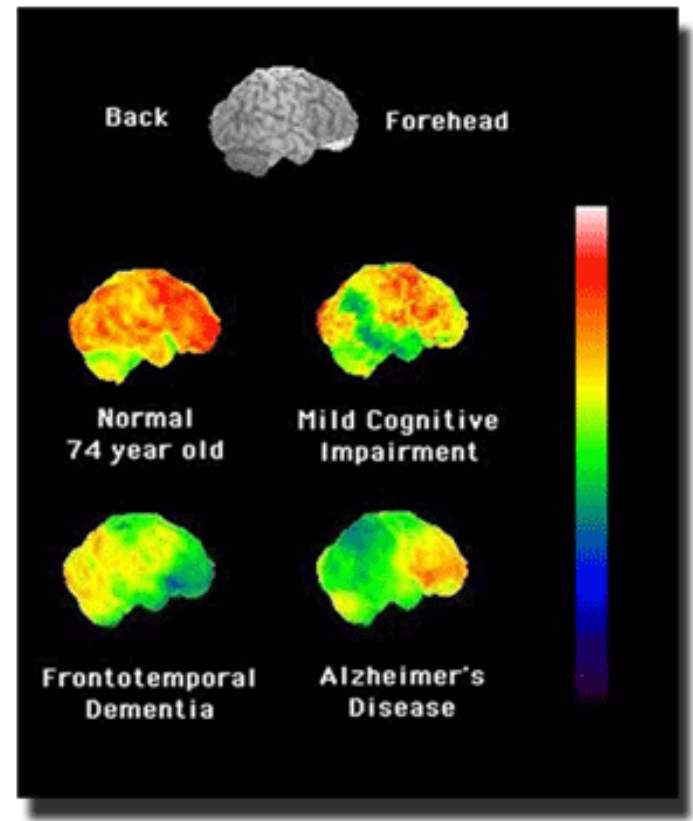
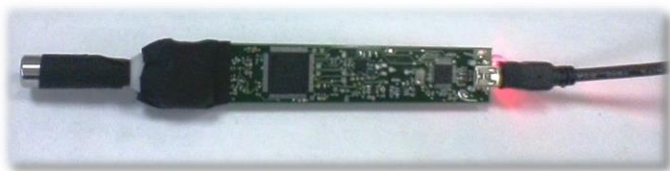


Table 2. Radio-isotopes used in PET

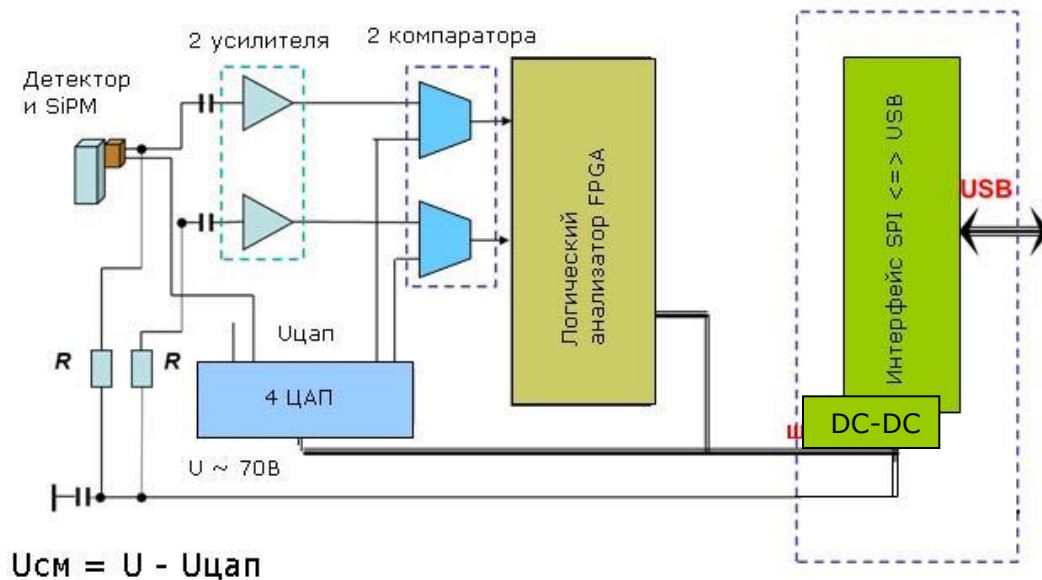
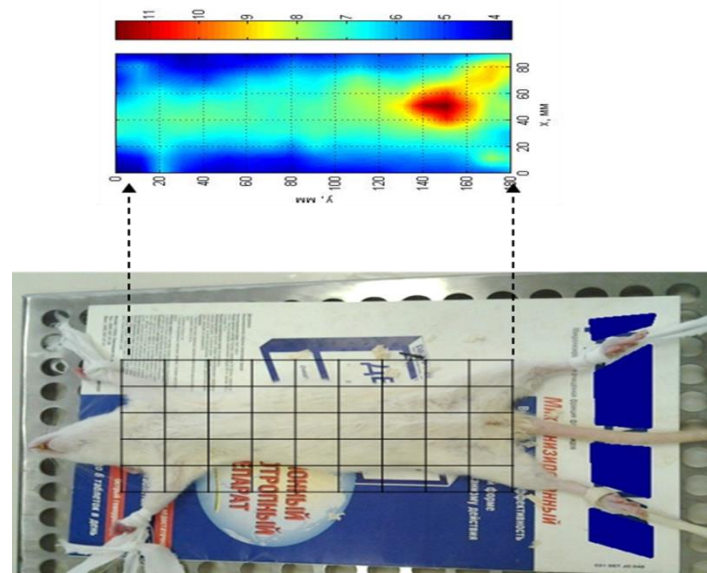
Isotope	Half life	Decay	Proton energy range [MeV]	Utilization
^{11}C	20.4 min	β^+	6-25	Indicator of cellular activity
^{15}O	2.1 min	β^+	5-21	Indicator of tumour necrosis
^{18}F	109 min	β^+	3-20	Metabolism of the glucose
^{81}Rb	4.6 hours	β^+	>20	Myocardium and brain



Гамма-локатор, разработанный в МИФИ



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



Активационный анализ состава вещества

АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ - метод определения состава вещества, основанный на активации атомных ядер и исследовании радиоактивного излучения, возникающего вследствие изменения нуклонного состава или энергетического состояния ядер.

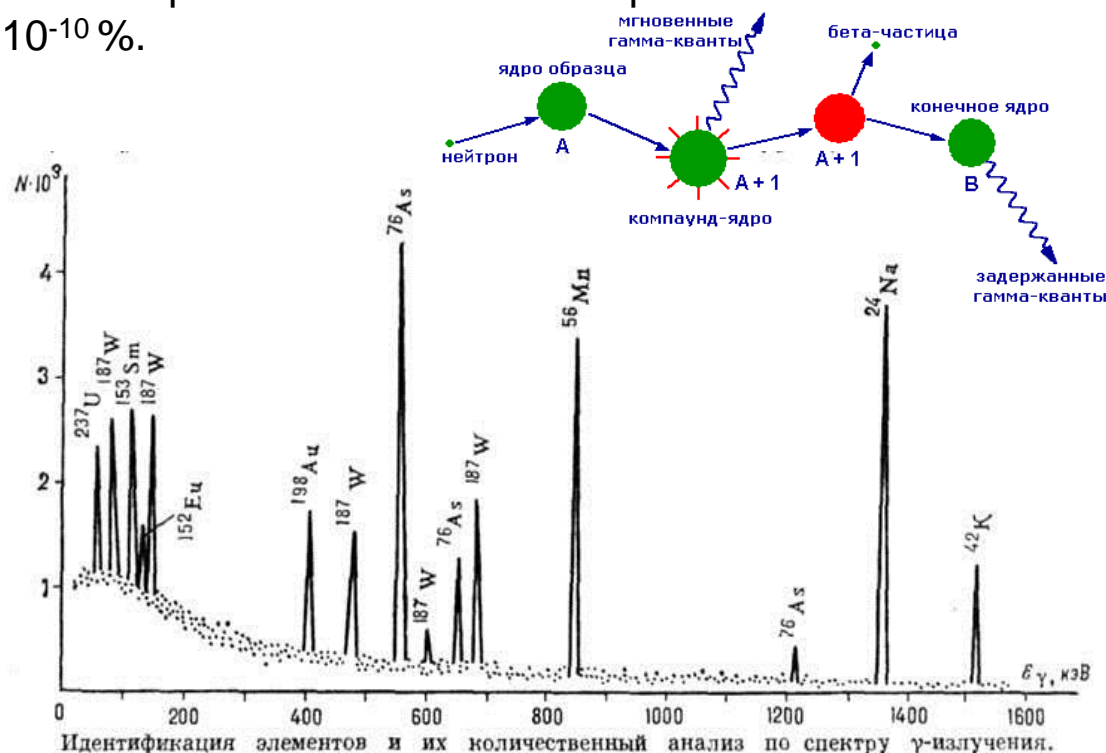
Впервые предложен Д. Хевеши (G. Hevesy) и Г. Леви (Levi) в 1936 году.

Для активации вещества чаще всего используются нейтроны (нейтронно-активационный анализ) или гамма-кванты (гамма-активационный анализ) и анализируется гамма-спектр.

Предел обнаружения большинства элементов при использовании нейтронных потоков от реактора ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) составляет 10^{-5} - $10^{-10} \%$.

Для гамма-активационного анализа используется *тормозное излучение* высокой интенсивности (10^{14} - 10^{15} квант/с), получаемое на электронных ускорителях.

Фотоядерные реакции позволяют активировать практически все элементы периодической системы элементов с пределом обнаружения 10^{-4} - $10^{-7} \%$.



Портальные мониторы ядерно-активных материалов (гамма-спектрометрия)

TSA/LAURUS Systems



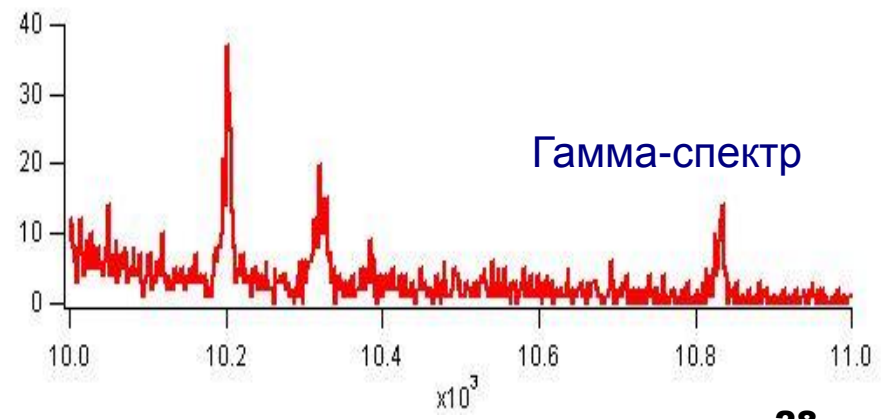
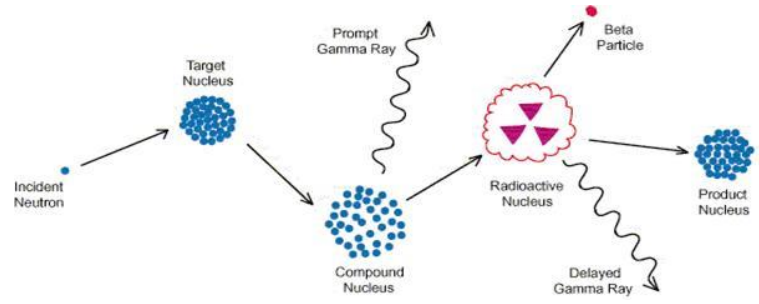
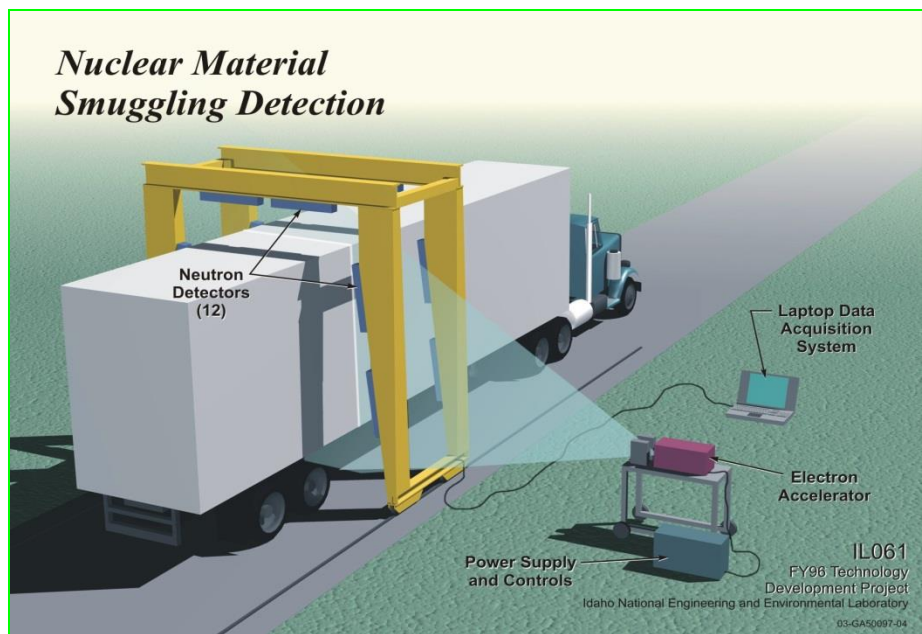
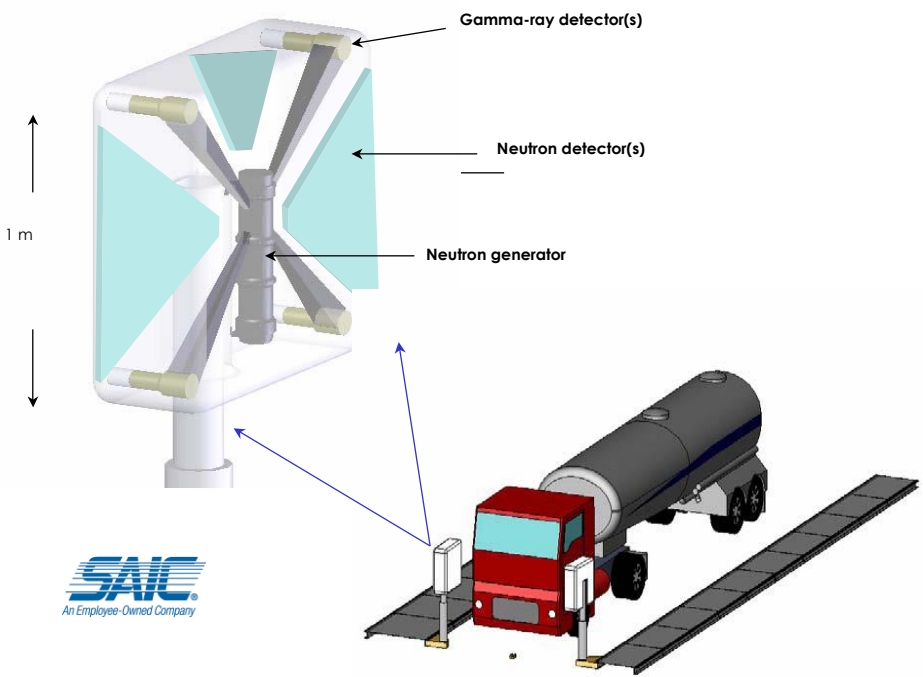
LUNDLUM



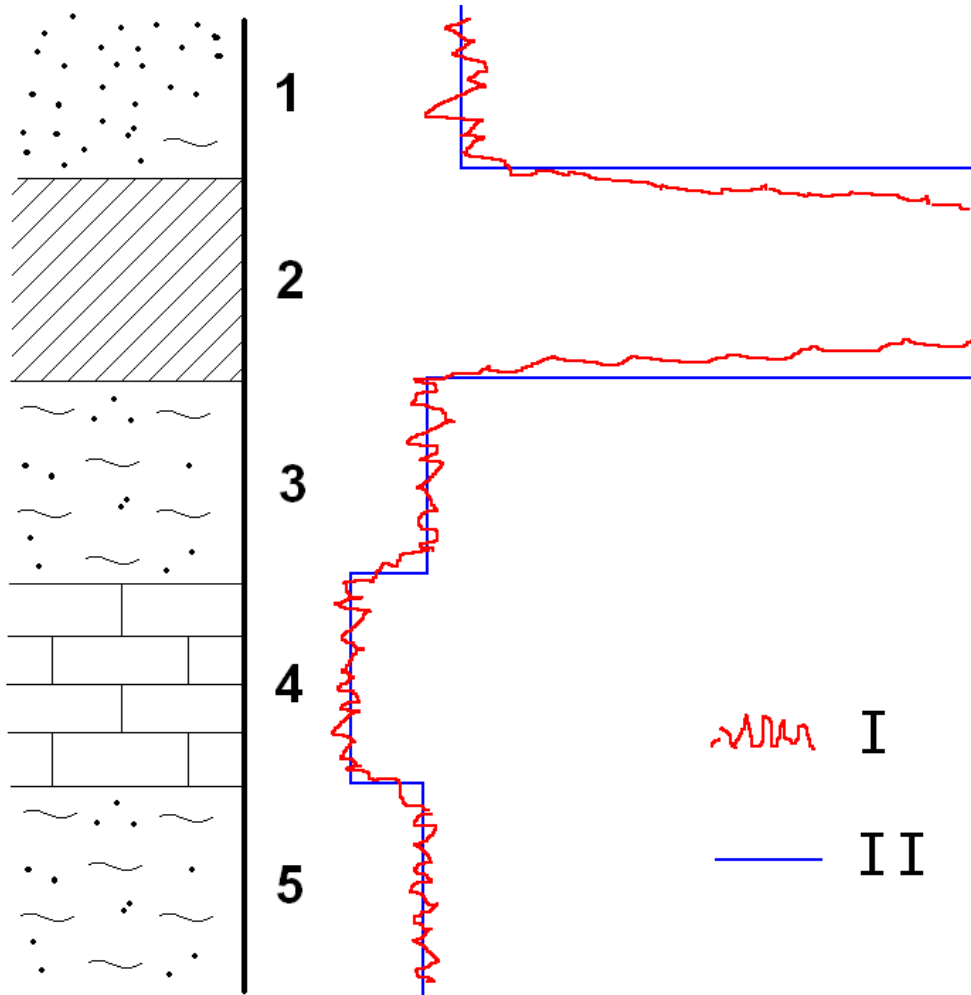
Canberra



Active Interrogation Systems для идентификации химических взрывчатых веществ и ядерно-активных материалов с помощью нейтронно-активационного анализа



Нейтронно-активационный анализ



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

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

*«Чем труднее работа, тем меньше времени
остается на неприятности»*

Из письма Э. Резерфорда П. Капице

15 мая 1936 г.

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, §18, стр.200-249
2. Б.С. Ишханов. Радиоактивность. 5. Гамма-излучение ядер.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract05.htm>
3. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 9;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .
4. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава VI, §4. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>