

Методы регистрации ионизирующих излучений

Лекция 4

План

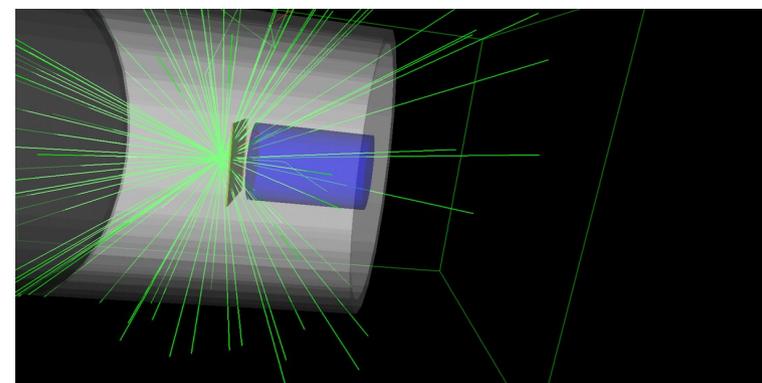
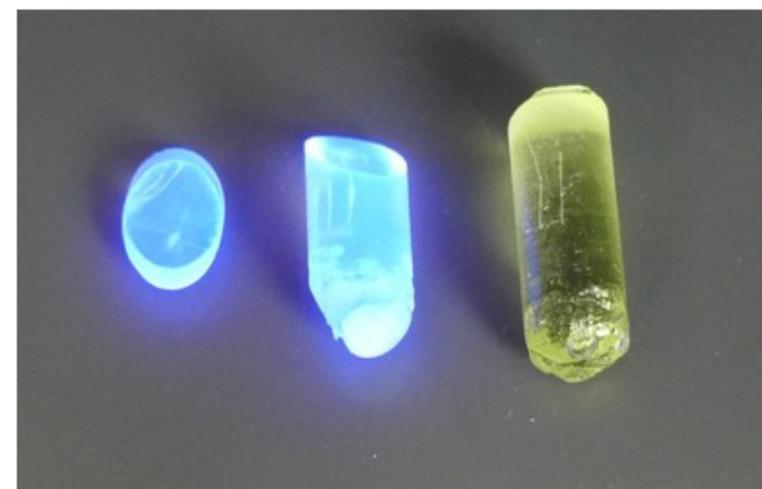
- Сцинтилляционные методы. Открытие ионизирующего излучения. Развитие физики сцинтилляторов. Применение сцинтилляционных детекторов
- Полупроводниковые детекторы. Сравнение со сцинтилляторами.

Сцинтиллятор

Сцинтиллятор является детектором ионизирующего излучения

При поглощении ионизирующего излучения сцинтиллятор испускает вспышку света

Интенсивность вспышки пропорциональна поглощенной энергии



С чего все начиналось?

- 1895 г. - У. К. Рентген, открытие X-лучей

Первый сцинтиллятор – платиноцианистый барий
 $\text{BaPt}(\text{CN})_4$

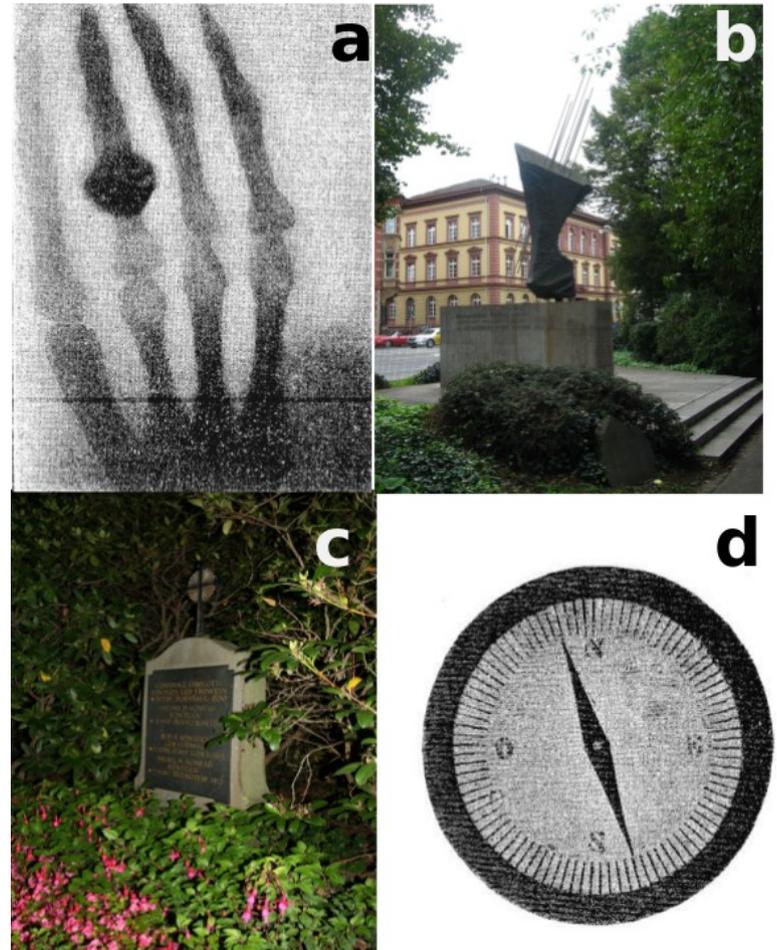
Первый прибор для регистрации
ионизирующего излучения –

Флюорископ (прибор для регистрации
рентгеновского излучения, экран из
кристаллов CaWO_4) –

Т. Эдисон — 1896 г.



Свечение шеелита



С чего все начиналось?

- 1895 г. - У. К. Рентген, открытие X-лучей

Флюорископ

90% излучения попадало на лицо доктора

«С меня хватит рентгена, радия и всего такого. Мало того, что мой левый глаз сильно пострадал от лучей Рентгена, так и с животом у меня разнообразные проблемы. Я думаю, это от того, что я облакачивался на рентгеновский аппарат во время экспериментов» **Т. Эдисон**



Свечение шеелита



Nature, 1896

1896 год

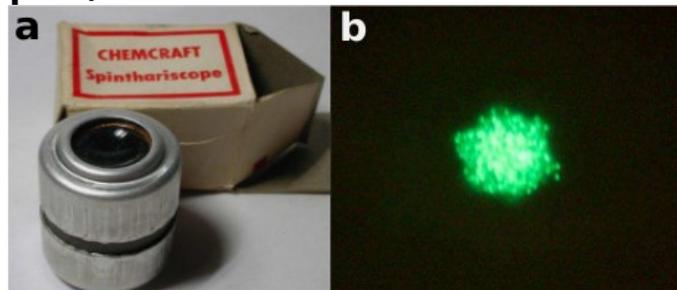
- **Открытие радиоактивности А. Беккерель**

Открытие радиоактивности у урана, тория

Закон радиоактивного распада (1903 г.) –

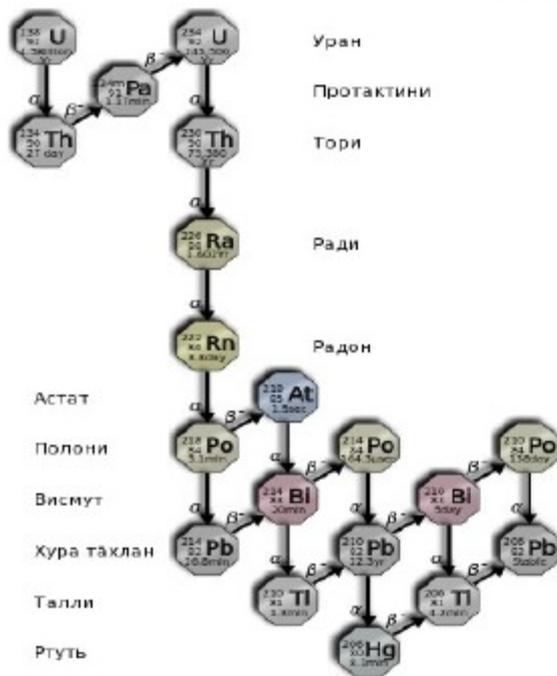
Э. Резерфорд $\frac{dN}{dt} = -\lambda N,$

- **Открытие альфа, бета и гамма-излучения**



Сцинтилляционный метод, применявшийся в начале нашего столетия: визуальный счет вспышек от α -частиц в спинтарископе со сцинтилляционным экраном на основе ZnS, был одним из первых методов регистрации радиоактивного излучения.

Закон радиоактивного распада



$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

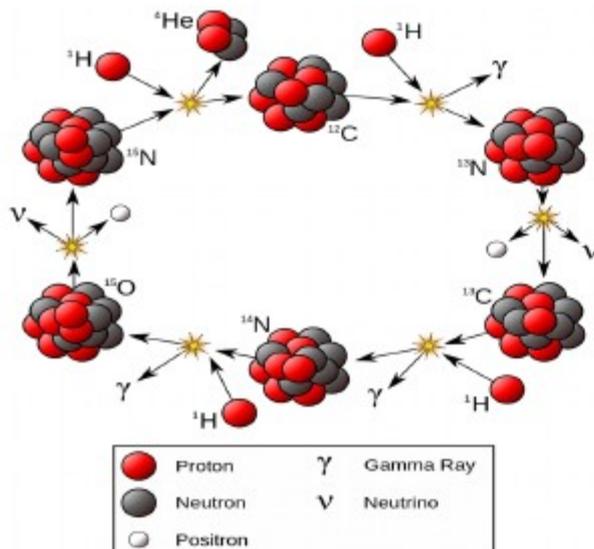
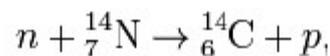
$$t = -T_{1/2} \log_2 \frac{N(t)}{N_0}$$

где N - число радиоактивных ядер,
 а λ - постоянная распада, которая
 характеризует вероятность радиоактивного
 распада.

Радиоактивные изотопы в природе:

- 1) $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ 4,47 млрд лет (ряд радия)
- 2) $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ 704 млн лет
- 3) $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ 14,01 млрд лет

- 4) $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ 1,97 млрд лет
 (бета-минус распад 89%)
- $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ 11,93 млрд лет
 (электронный захват 11%)
- 5) $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ 5730±30 лет



Закон радиоактивного распада

Исторически единицей измерения радиоактивности являлась 1 Кюри (обозначается как Ки или Ci), значение которой составляло $3,8 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду и соответствует активности 1 г ^{226}Ra . В 1975 г. на Генеральной Конференции по мерам и весам была утверждена новая единица измерения радиоактивности – 1 Беккерель (обозначение: Бк, Bq), значение которой определено как один распад в секунду:

$$1 \text{ Бк} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки.}$$

В системе единиц СИ основной единицей измерения энергии является джоуль (Дж). Энергия частиц ионизирующего излучения не превышает нескольких фемтоджоулей:

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Длина волны:
$$\lambda = \frac{1240}{E},$$

Виды излучения

- Альфа-частицы – ядро атома гелия ${}^4\text{He}$
- Бета-частицы – заряженные частицы, испускаемые при бета-распаде (заряд равен заряду электрона)
- Гамма-частицы – фотоны с высокой энергией
- Нейтроны – тяжелая электрически нейтральная частица

Виды излучения

Поскольку действие γ -излучения и нейтронов скорее результат воздействия вторичного излучения, т.е. электронов и протонов отдачи, чем результат их первичных взаимодействий, данные, полученные при изучении взаимодействия заряженных частиц с веществом, можно использовать не только для описания действия быстрых электронов или ионов, но также и для описания воздействия γ -излучения и нейтронов.

Можно выделить несколько основных механизмов взаимодействия заряженных частиц с веществом:

- *неупругие процессы* взаимодействия, которые подразделяются на:
 - *ионизационные потери*
 - *радиационные потери*
 - *упругие процессы* взаимодействия
 - *переходное свечение*
 - *свечение Вавилова-Черенкова*

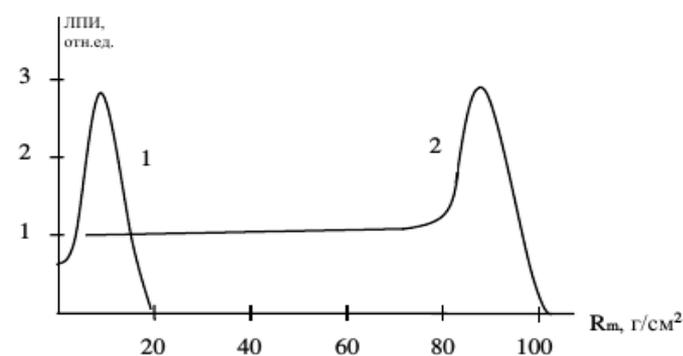
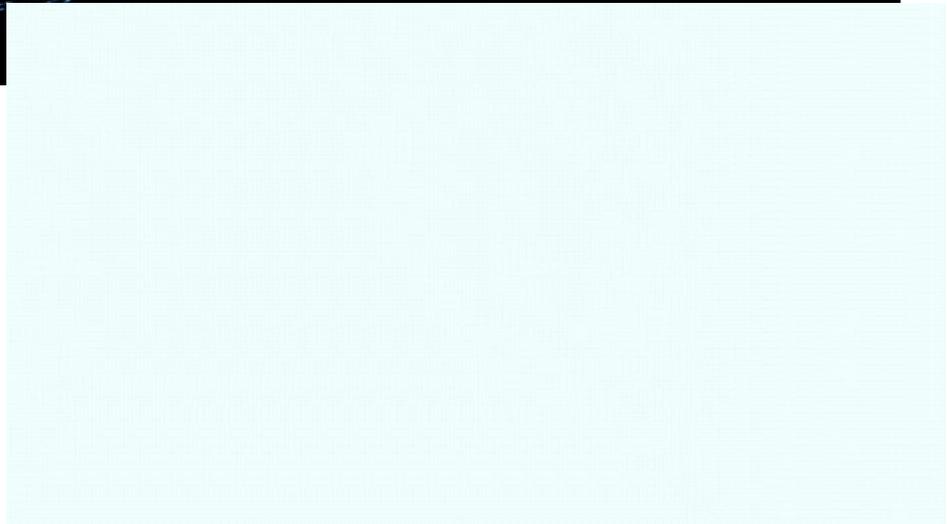
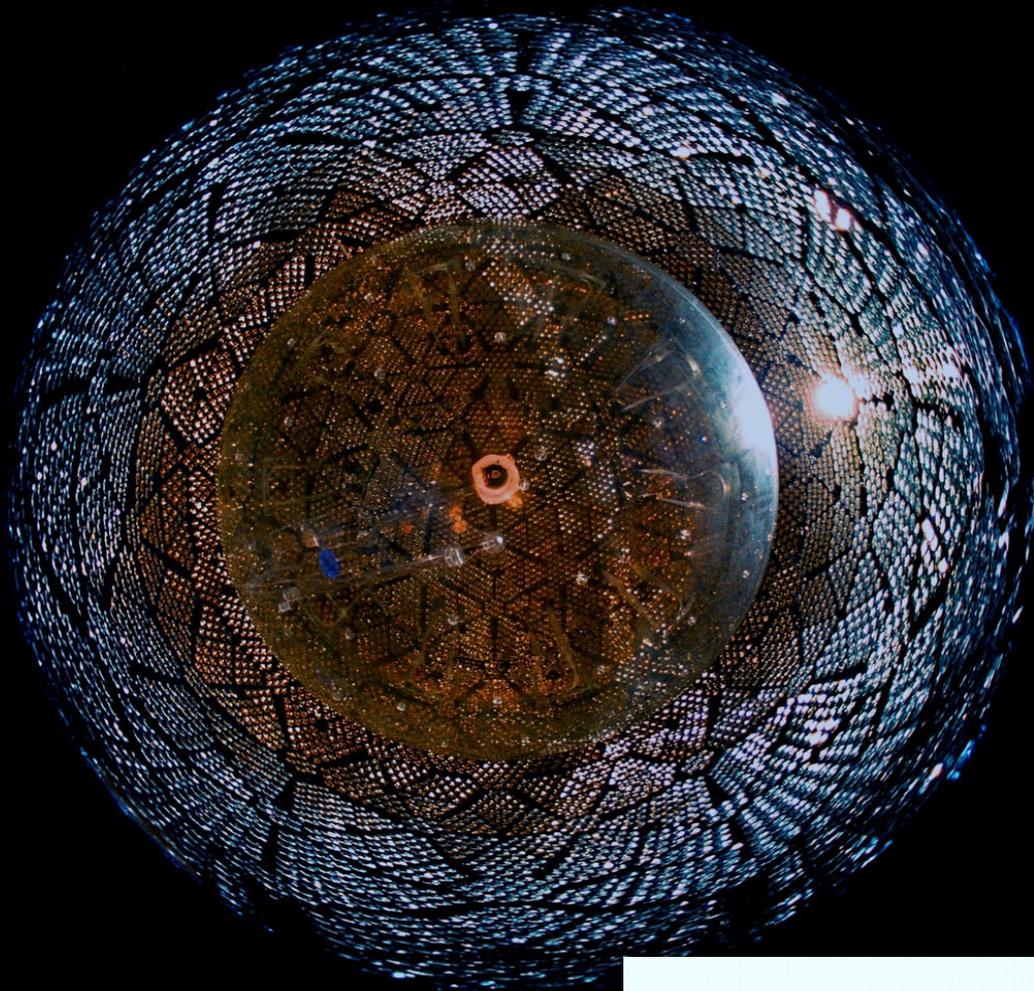
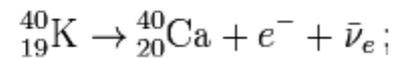
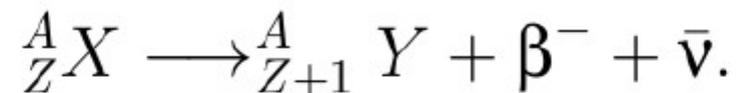


Рис. 3.23 Линейная плотность ионизации для протонов (140 МэВ, биологическая ткань) – 1; дейтронов (190 МэВ, H₂O) – 2



Источники быстрых электронов. Бета распад



В этом выражении X и Y – начальный и конечный продукты реакции, β^- отрицательно заряженная бета-частица (электрон).

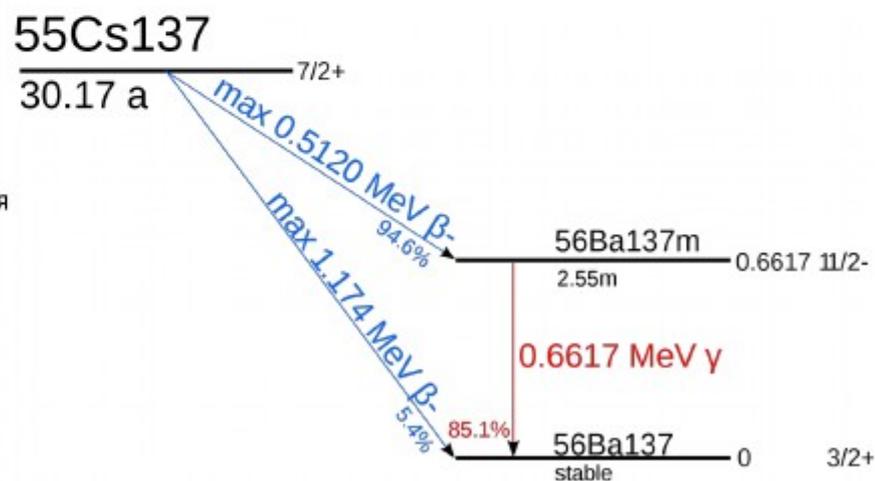
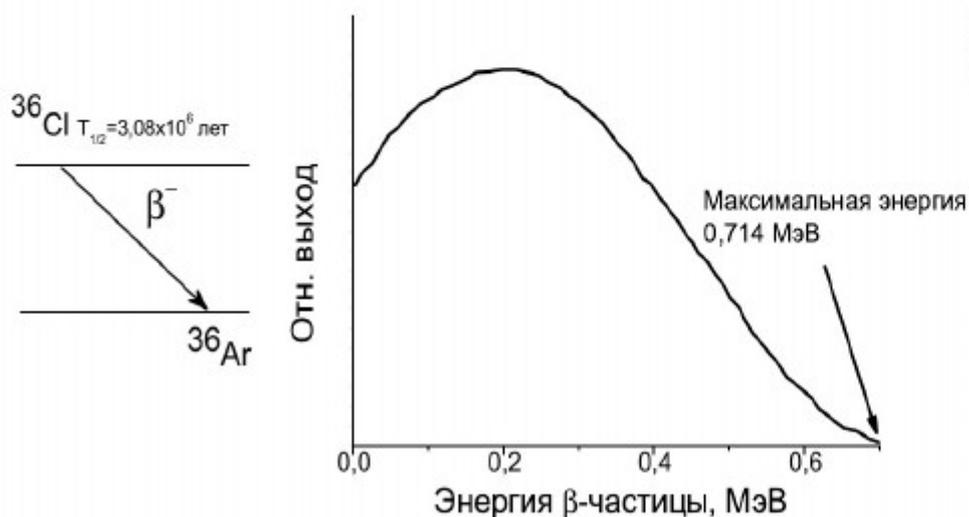
Вероятность взаимодействия антинейтрино с окружением крайне мала, поэтому эти частицы не обнаруживаются в большинстве обычных экспериментов. Бета-распад не меняет число нуклонов в ядре A , но меняет только его заряд Z .

Большинство природных изотопов бета-стабильны, но существуют источники с большим периодом полураспада, которые еще можно встретить в природе, например изотоп ${}^{40}\text{K}$, в котором происходит бета-минус, бета-плюс распады и электронный захват.

Источники быстрых электронов. Бета распад

Энергия ядра отдачи практически равна нулю, то энергия распределяется между бета-частицами и «невидимыми» нейтрино. Поэтому бета-частицы обладают энергией, которая варьируется от распада к распаду.

Энергетический спектр бета распада непрерывный и находится в интервале от нуля до «максимальной энергии бета-распада»



Источники быстрых электронов. Бета распад

Широко используемые β^- изотопы [2]

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия распада, МэВ
^3H	12,26 лет	0,0186
^{14}C	5730 лет	0,156
^{32}P	14,28 дн.	1,710
^{33}P	24,4 дн.	0,248
^{35}S	87,9 дн.	0,167
^{36}Cl	$3,08 \cdot 10^5$ лет	0,714
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ лет	1,311
^{45}Ca	165 дн.	0,252
^{65}Ni	92 г.	0,067
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27,7 лет/64 ч.	0,546/2,270
^{147}Pm	2,62 г.	0,224
^{204}Tm	3,81 г.	0,766

Источники быстрых электронов. Конверсионные электроны

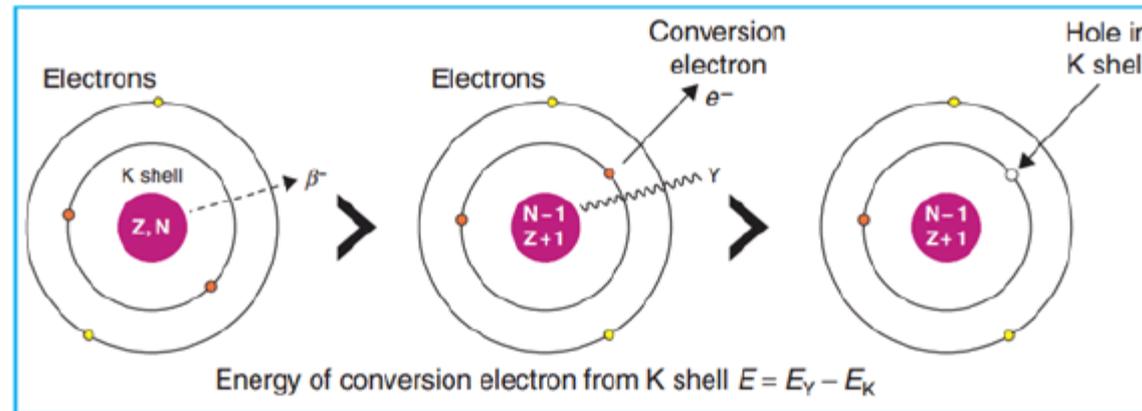


Figure 2.8. Schematic illustration of internal conversion. Left to right: The nucleus undergoes β^- decay and creates a daughter nucleus, which is still in the excited state and decays by γ emission. The γ ray could be absorbed by the atom, ejecting a K-shell electron of energy $(E_{\gamma} - E_K)$, thereby creating a vacancy in the K-shell orbit.

Эффект внутренней конверсии (IC) заключается в следующем. Переход атомного ядра из возбужденного состояния в основное состояние происходит не посредством излучения гамма-кванта, а путем передачи высвобождаемой энергии непосредственно одному из электронов этого атома. Таким образом, происходит испускание конверсионного электрона, энергия которого определяется разностью между энергией ядерного изомерного перехода и энергией связи определенной оболочки, с которой электрон был испущен (соответственно различают K-, L-, M - и др. электроны).

$$E_{e^-} = E_{ex} - E_b,$$

Источники быстрых электронов. Конверсионные электроны

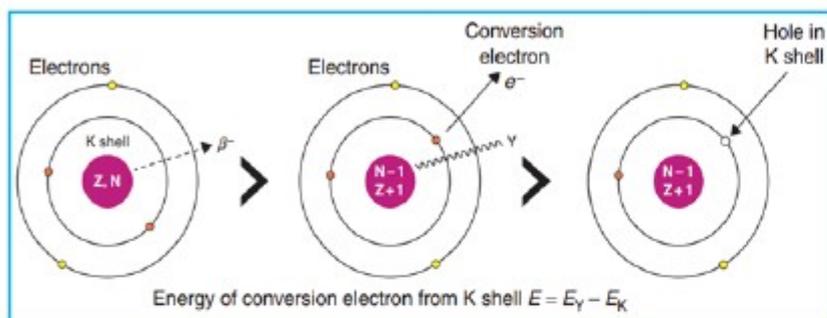


Figure 2.8. Schematic illustration of internal conversion. Left to right: The nucleus undergoes β^- decay and creates a daughter nucleus, which is still in the excited state and decays by γ emission. The γ ray could be absorbed by the atom, ejecting a K-shell electron of energy $(E_\gamma - E_K)$, thereby creating a vacancy in the K-shell orbit.

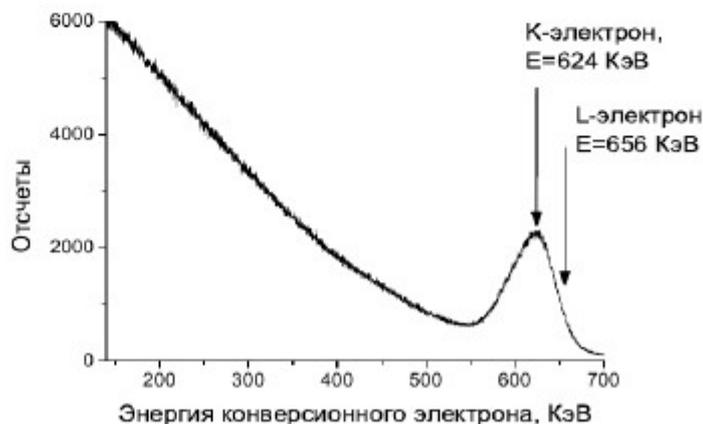
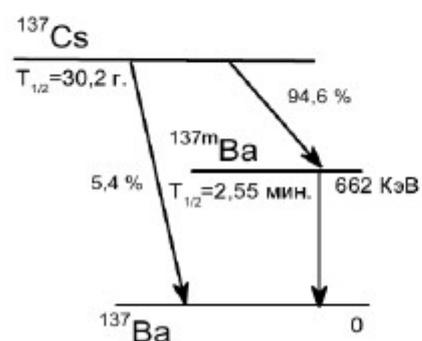
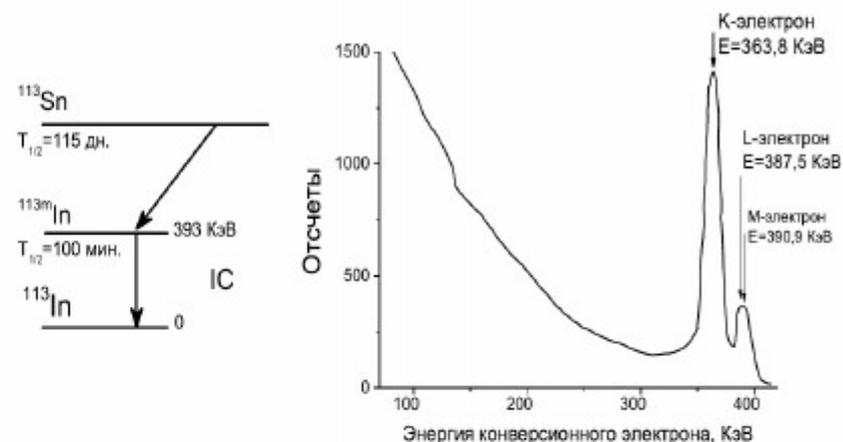
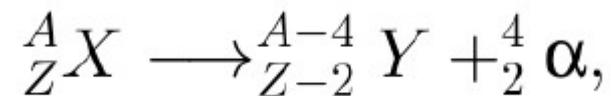


Рис. 2.3. Схема распада ^{137}Cs и энергетический спектр конверсионных электронов и бета-излучения, измеренный сцинтилляционным детектором $\text{CaF}_2\text{-Eu}$

Альфа-частицы



Альфа-частицы, образованные при распаде ядра, моноэнергетичны и имеют начальную кинетическую энергию в диапазоне 1,8–15 МэВ. При движении альфа-частицы в веществе она очень быстро теряет энергию, поэтому поглощается обычным листом бумаги или даже слоем воздуха.

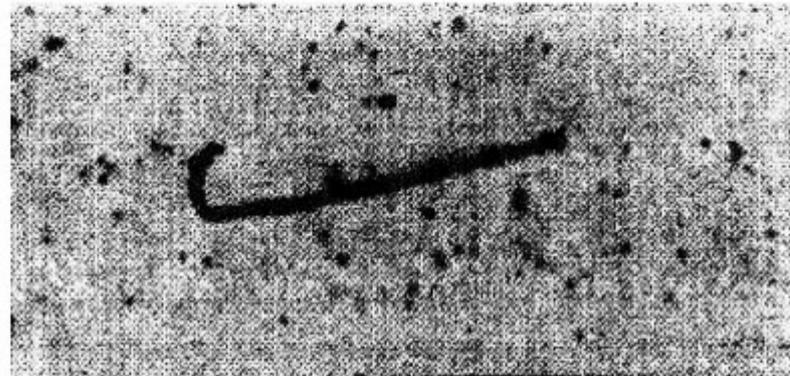
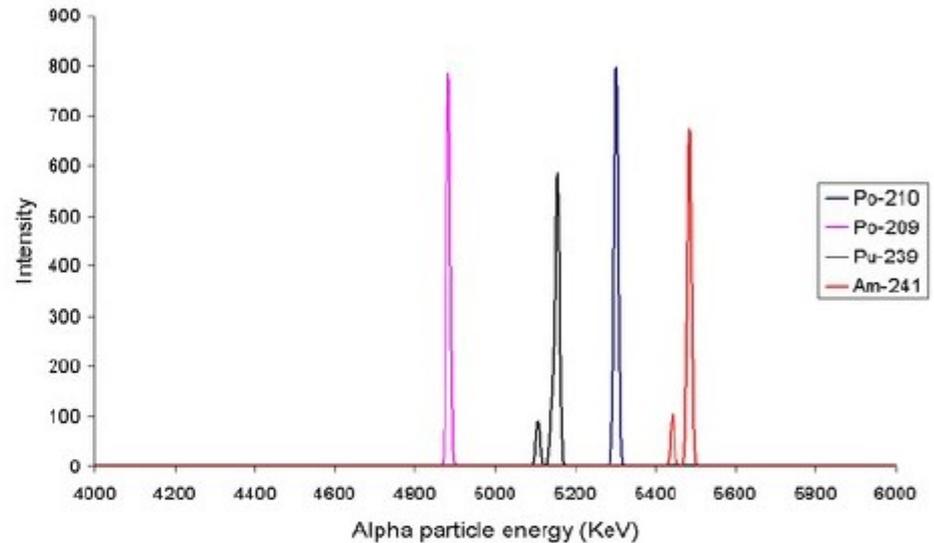


Рис. 3.2. Микрофотография треков альфа-частиц, вылетающих из урана (увеличение $\times 2000$)
[5]

Альфа-частицы

Основные источники альфа-частиц □

Изотоп	Период полураспада	Кинетическая энергия альфа-частиц, МэВ	Доля в процентах
^{148}Gd	93 г.	3,18	100
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	4,012 3,953	77 23
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ лет	4,196 4,149	77 23
^{235}U	$7,1 \cdot 10^8$ лет	4,598 4,401 4,374 4,365 4,219	4,6 56 6 12 6
^{236}U	$2,4 \cdot 10^9$ лет	4,494 4,445	74 26
^{230}Th	$7,7 \cdot 10^4$ лет	4,688 4,62	76,3 23,4
^{234}U	$2,5 \cdot 10^5$ лет	4,77 4,72	72 28
^{239}U	$2,4 \cdot 10^4$ лет	5,155 5,143 5,105	73,3 15,1 11,5
^{240}U	$6,5 \cdot 10^3$ лет	5,168 5,124	76 24
^{210}Po	133 дн.	5,305	99+
^{241}Am	433 г.	5,486 5,443	85,2 12,8
^{238}Pu	88 лет	5,499 5,457	71,1 28,8
^{242}Cm	163 дн.	6,113 6,07	74 26
^{253}Es	20,5 дн.	6,633 6,592	90 6,6



Гамма-излучение, сопутствующее бета-распаду

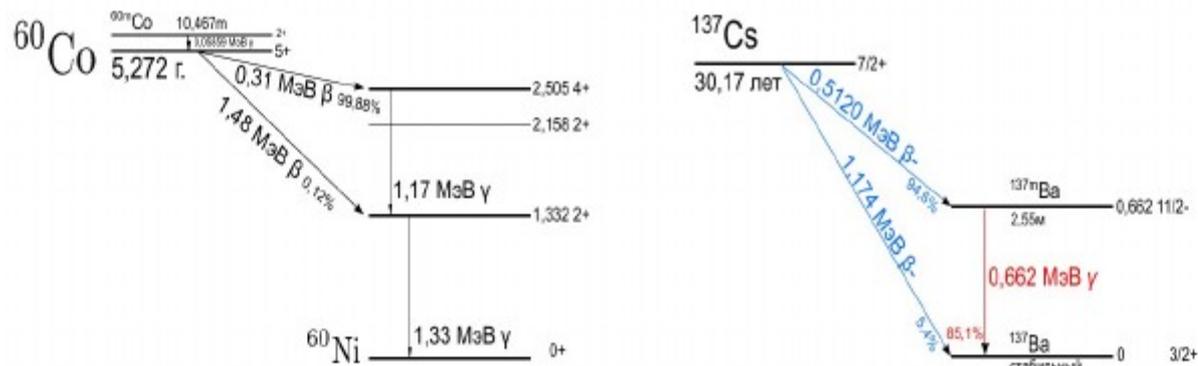


Рис. 2.4. Схемы распада калибровочных гамма-источников ^{137}Cs и ^{60}Co

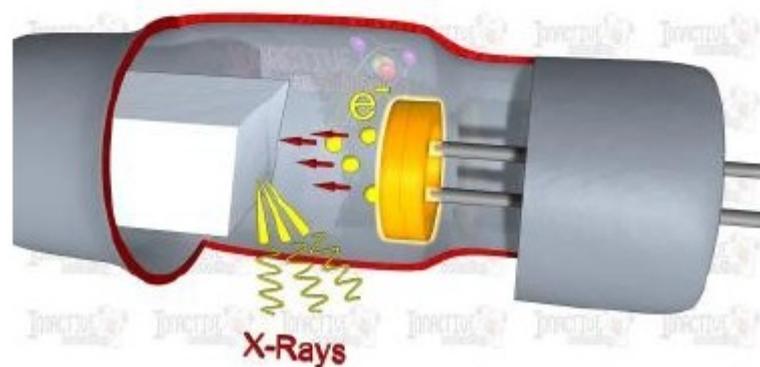
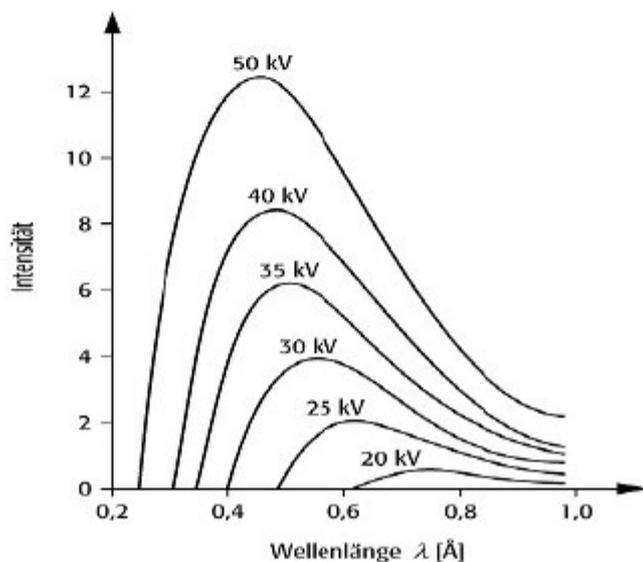
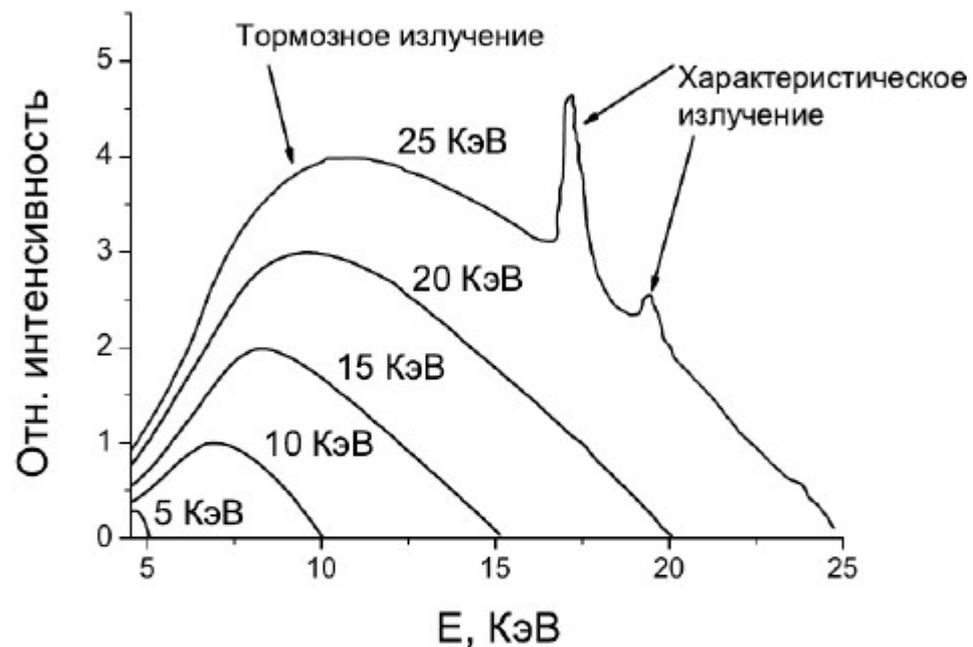
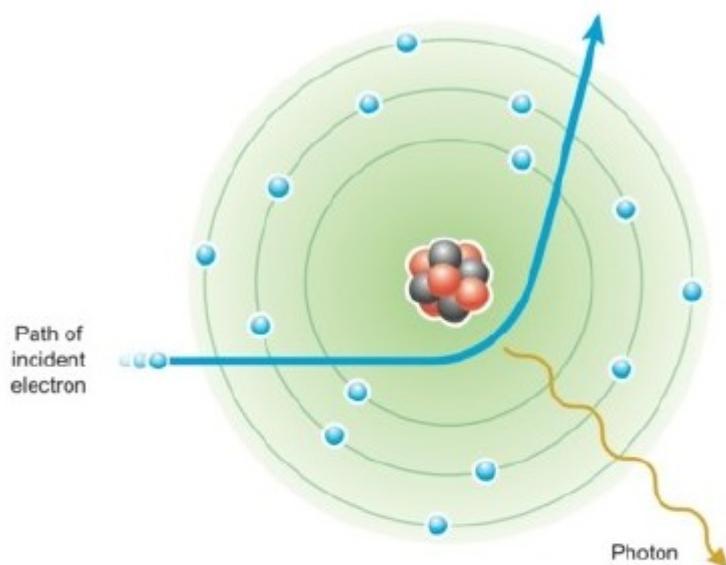
Гамма-излучение испускается из возбужденного ядра при его переходе в состояния с более низкой энергией или в основное состояние. В большинстве применяемых лабораторных источниках возбужденные состояния образуются при распаде исходного изотопа.

Время жизни ядра в возбужденном состоянии значительно меньше времени жизни исходного изотопа.

Процесс девозбуждения происходит с испусканием гамма-кванта с энергией равной разнице между энергиями основного и возбужденного состояний дочернего ядра.

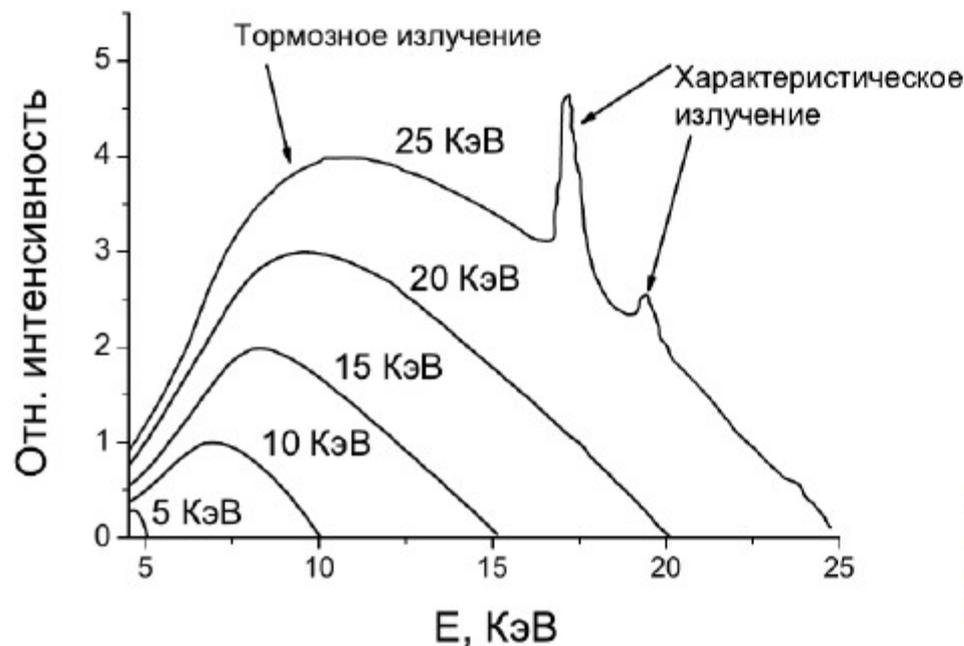
Энергетический спектр (полосы 1,33 МэВ и 1,17 МэВ) характеризует структуру ядра ^{60}Ni .

Рентгеновское излучение. Тормозное излучение и характеристическое излучение



Рентгеновская трубка

Рентгеновское излучение. Тормозное излучение и характеристическое излучение



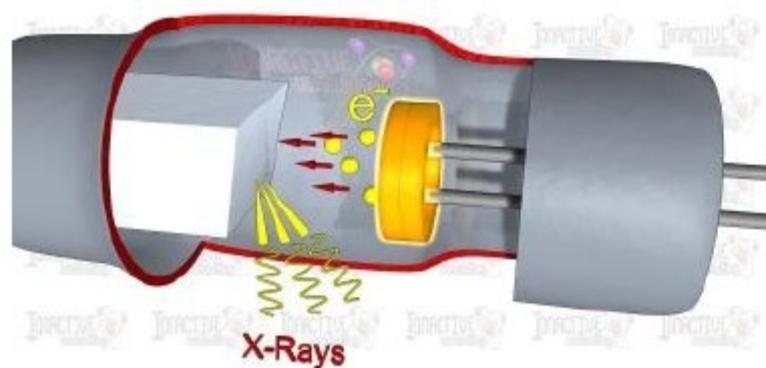
Если вакансия образуется в K-оболочке атома, то испускается характеристическое K-излучение, когда вакансия в этой оболочке будет заполнена электроном. Энергия испускаемого $K\alpha$ -фотона равна разнице в энергиях связи между K- и L-оболочками, в случае если вакансия заполняется электроном с L оболочки. Если заполнение происходит с M-оболочки, то испускается $K\beta$ -фотон с чуть большей энергией.

Закон Мозли, связывающий частоты линий рентгеновского спектра ν с атомным номером Z испускающего их элемента:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$R = \frac{me^4}{4\pi c \hbar^3} \quad R = 10973731,568539 \text{ м}^{-1}$$

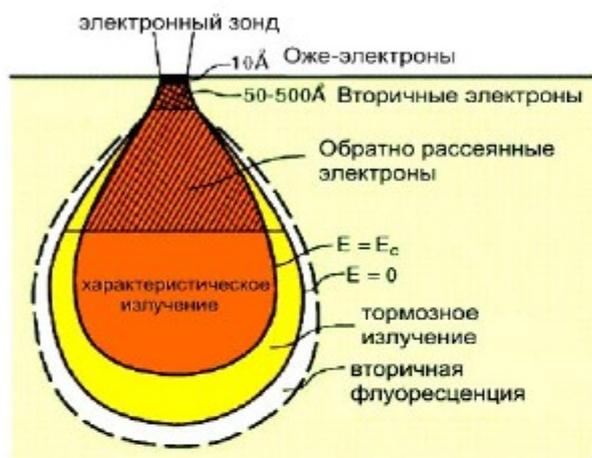
σ — постоянная, учитывающая экранирующую роль окружающих ядро электронов. Чем дальше электрон от ядра, тем σ больше. Главные квантовые числа уровней n и k, между которыми осуществляется переход, при этом $n=1, 2, 3 \dots, k = n + 1$. Для линии $K\alpha$ — $n = 1, k = 2$.



Рентгеновская трубка

Рентгеновское излучение. Тормозное излучение и характеристическое излучение

Микрозонд



Вторичные электроны;

Обратно рассеянные (отраженные) электроны;

Поглощенные электроны;

Оже-электроны;

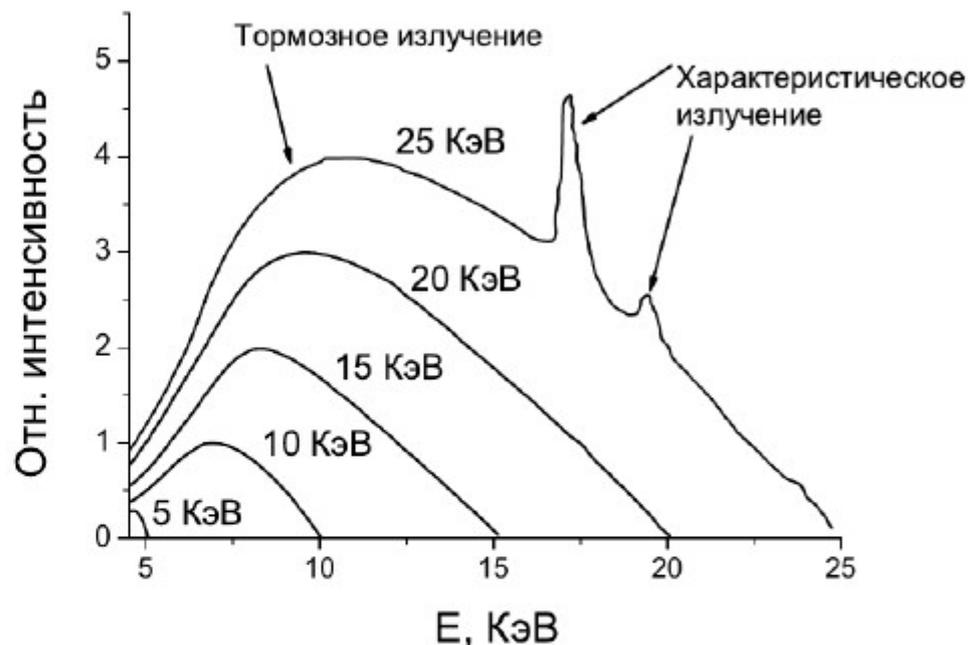
Характеристическое рентгеновское излучение (первичное);

Тормозное рентгеновское излучение;

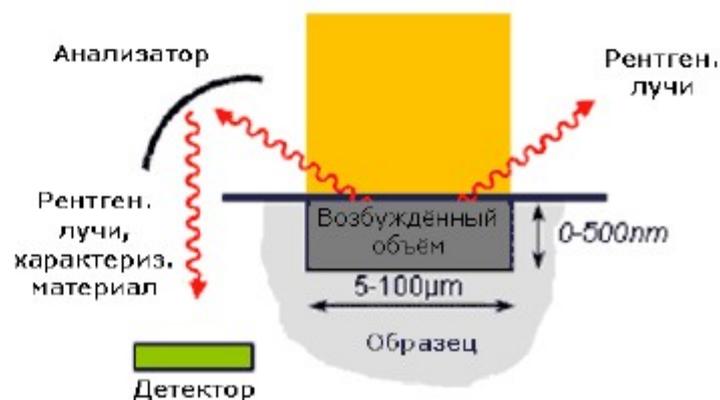
Рентгеновское излучение вторичной флуоресценции;

Катодолюминесценция (видимый свет);

Нагрев в зоне взаимодействия.



Низкоэнергетический поток электронов



История сцинтилляторов

Ce³⁺ doped

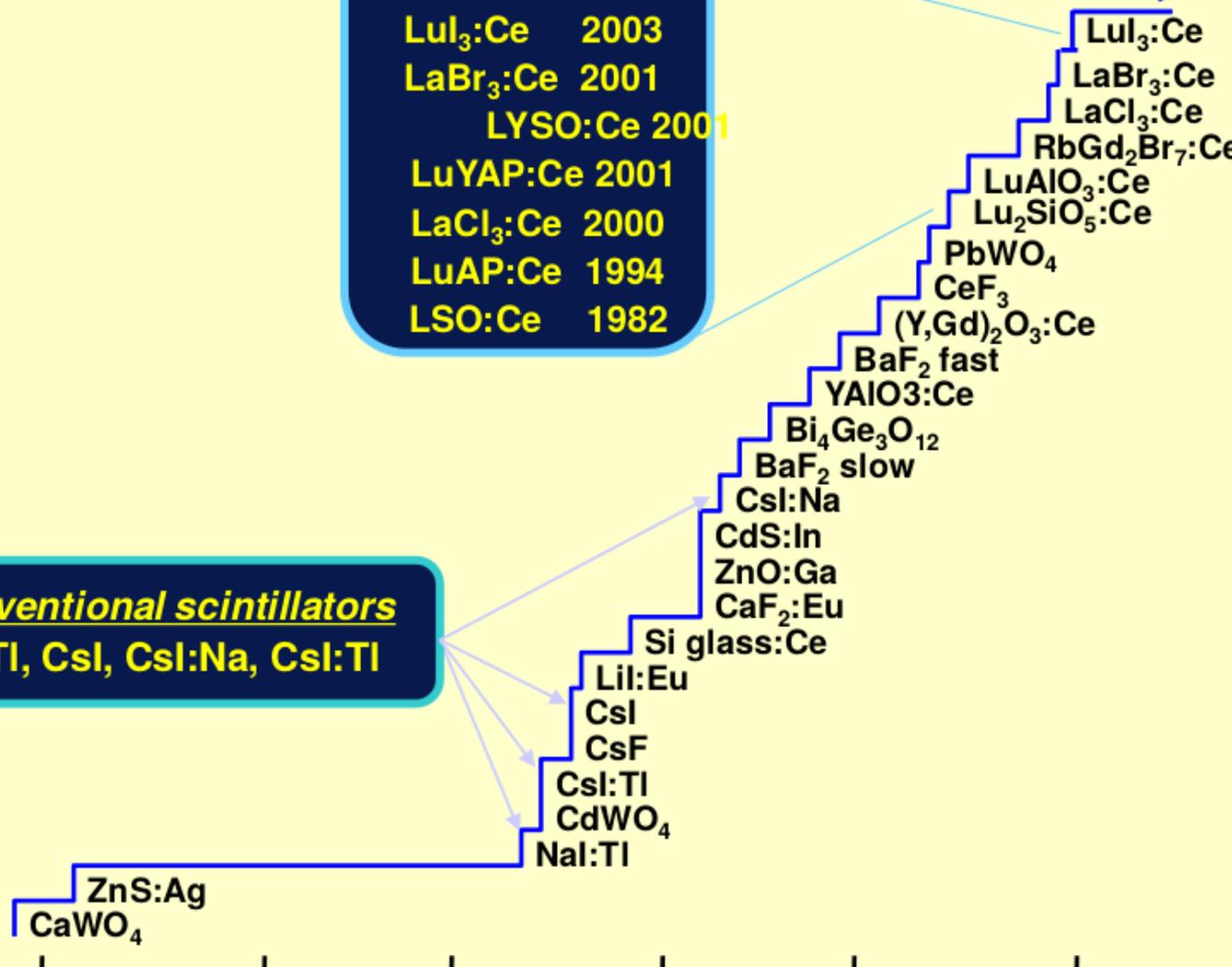
LuI₃:Ce 2003
 LaBr₃:Ce 2001
 LYSO:Ce 2001
 LuYAP:Ce 2001
 LaCl₃:Ce 2000
 LuAP:Ce 1994
 LSO:Ce 1982

Eu²⁺ doped

SrCsI₃:Eu 2012
 BaBrI:Eu 2011
 Ba₂CsI₅:Eu 2009
 Srl₂:Eu 2007

Conventional scintillators

Nal:TI, CsI, CsI:Na, CsI:TI



1900

1920

1940

1960

1980

2000

2020

Gektin, 2014

Сцинтилляторы II поколения



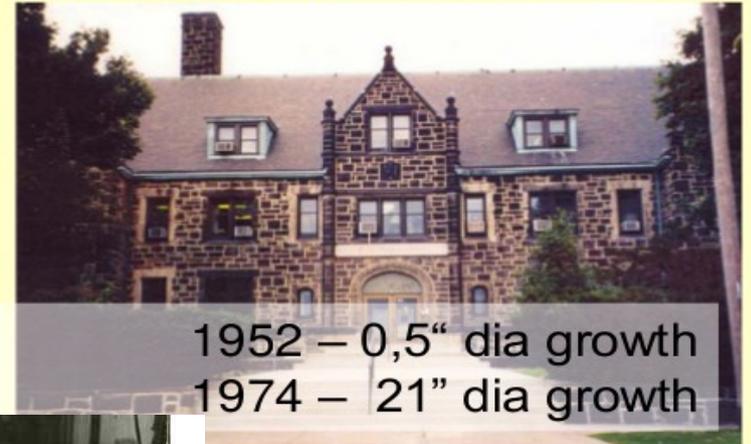
Разработка новых моделей фотоэлектронных умножителей – преобразует свет в электронный импульс (усиление в 10^4 - 10^5 раз).

Роберт Хофштадтер
(нобелевский лауреат 1961)

Изобретение сцинтиллятора
 NaI-Tl , CsI-Tl , CsI-Na

Предсказал перспективы
 $\text{LaBr}_3\text{-Ce}$, $\text{SrI}_2\text{-Eu}$

Harshaw Chemical Company
(founded 1890, Cleveland, Ohio)

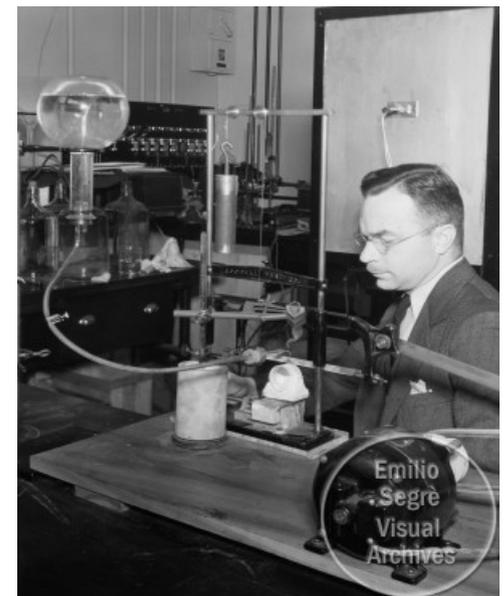


1952 – 0,5" dia growth
1974 – 21" dia growth



The first 32 inch diameter NaI(Tl) crystal. Pictured from left to right are Dr. Swinehart, Ed Jablon, Joe Knaus and Marko Silgoi.

Дональд Стокбаргер,
Рост кристаллов

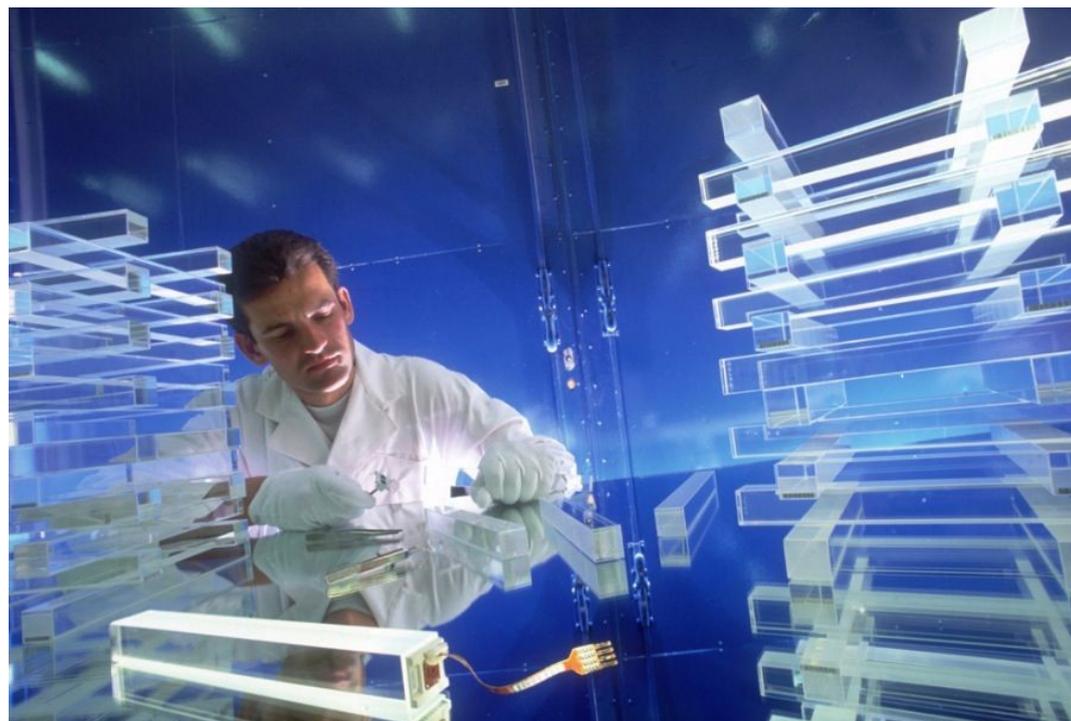


Сцинтилляторы III поколения

- Физика высоких энергий. Быстрые сцинтилляторы, большие потоки частиц.

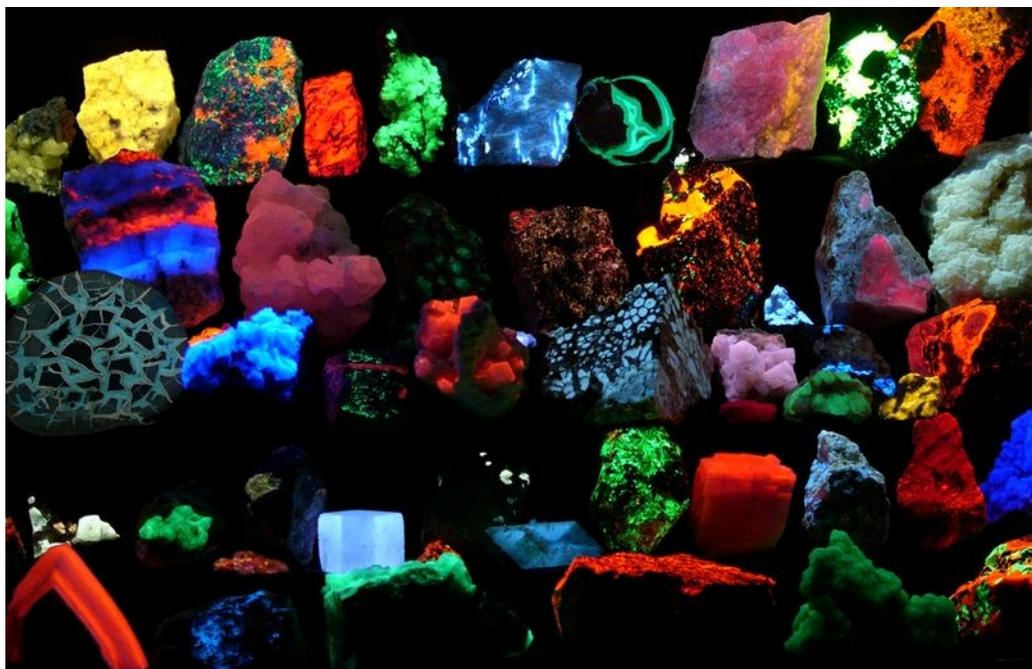


BaF_2 (открытие в 1982 г.) – 0,8 нс
В 300 раз быстрее NaI-Tl



$PbWO_4$ – самый плотный сцинтиллятор
(плотность 8,3 г/см³)
Более чем в 8 раз плотнее воды, 2 раза
плотнее NaI-Tl, 1,5 раза плотнее BaF_2

Современные сцинтилляторы



Современные сцинтилляторы делаются из монокристаллов, активированных различными примесями, с которыми связана их люминесценция.

Современные активаторы:
редкоземельные ионы Ce^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{2+} ;
Ионы индия и таллия

Самый лучший коммерческий сцинтиллятор – $\text{LaBr}_3\text{-Ce}$



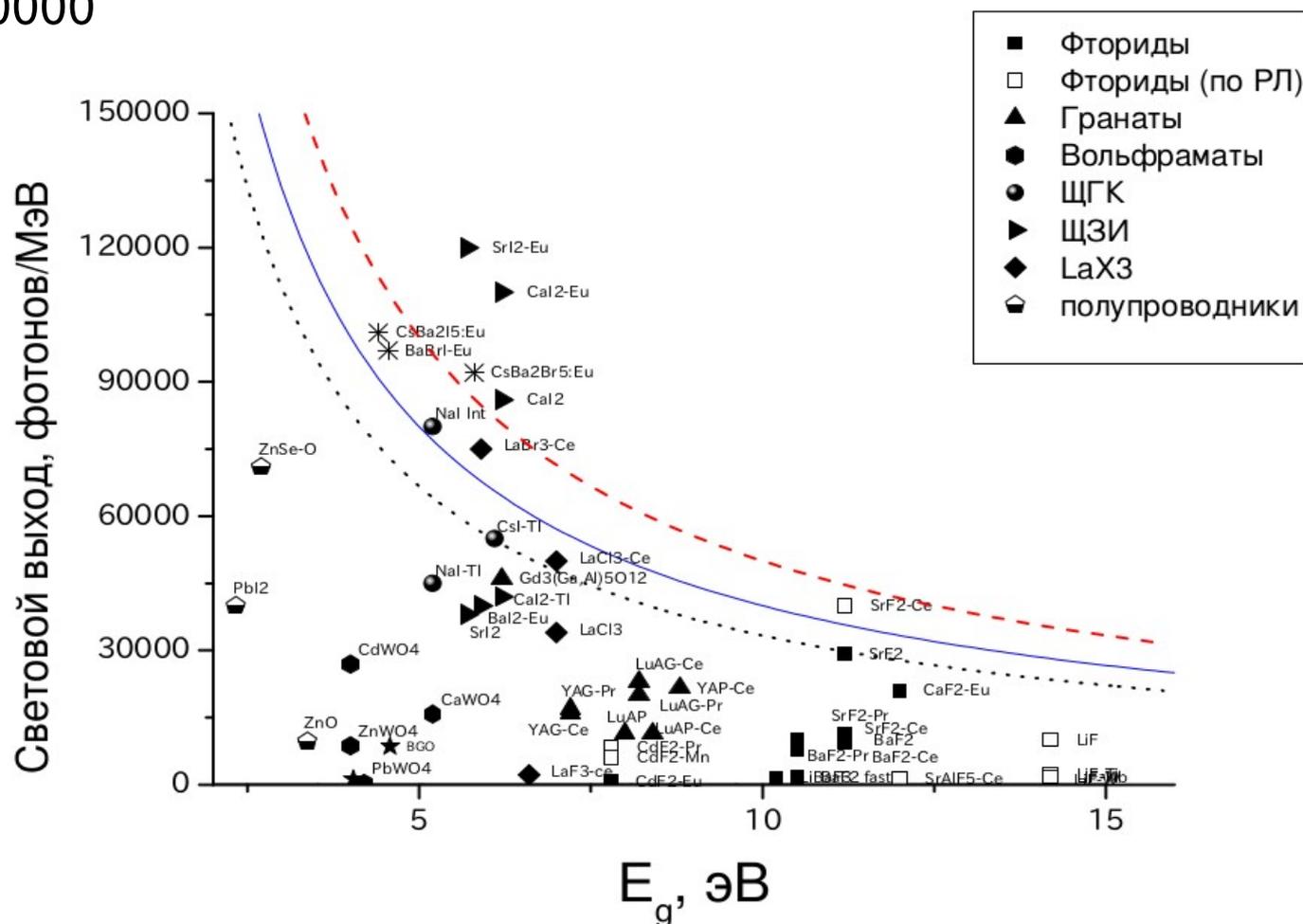
Самый яркий – $\text{SrI}_2\text{-Eu}$



Характеристики сцинтилляторов

- Световой выход – сколько фотонов испускает кристалл при поглощении единицы энергии (яркость вспышки), чем выше, тем лучше.

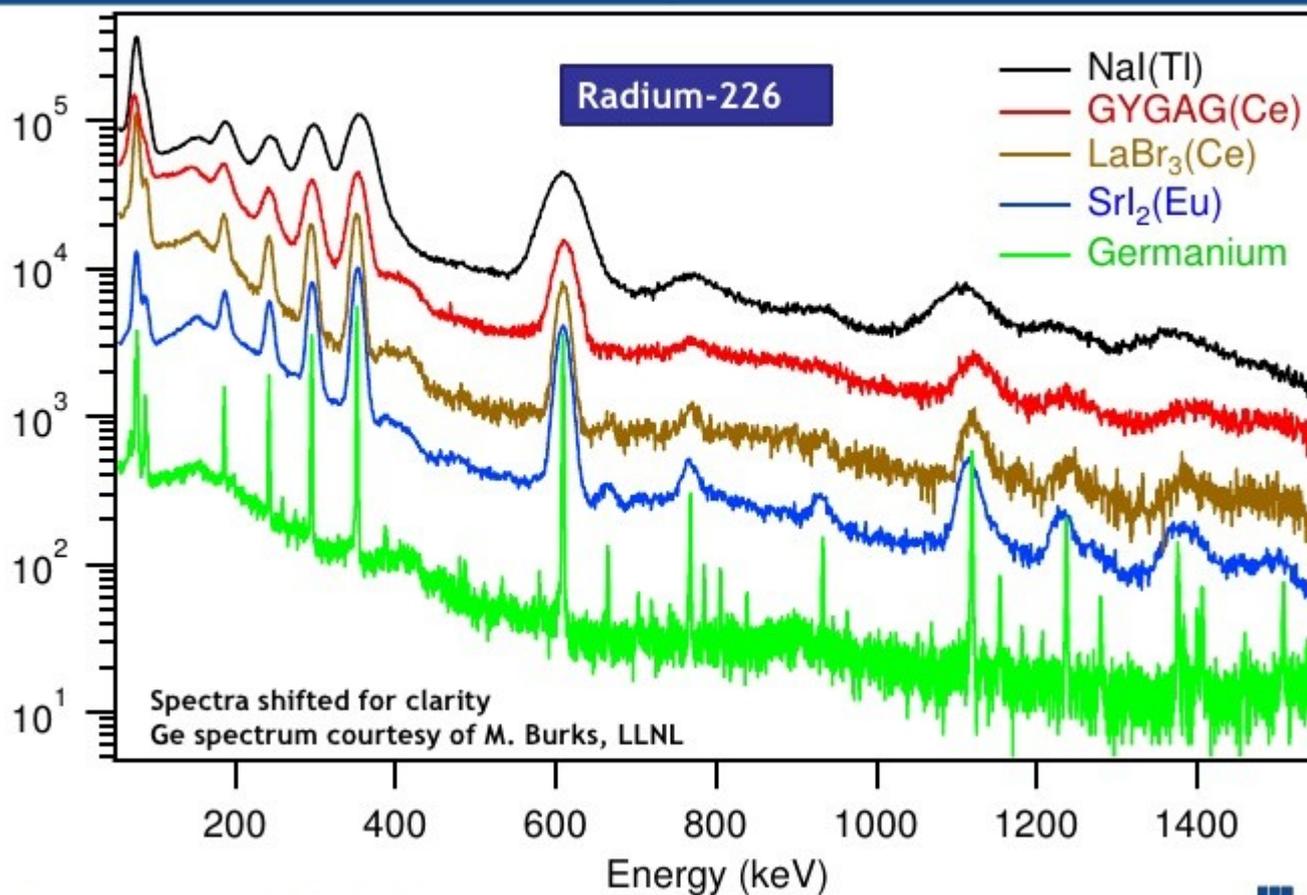
Лидеры (в фотонах/МэВ) – $\text{SrI}_2\text{-Eu}$ 120000; $\text{LaBr}_3\text{-Ce}$ – 70000; CsI-Tl – 55000; NaI-Tl – 40000



Характеристики сцинтилляторов

- Энергетическое разрешение – показывает насколько близкие энергии можно измерить. Чем ярче сцинтиллятор, тем лучше его разрешающая способность.

Comparison of gamma spectroscopy performance



Характеристики сцинтилляторов

- Постоянная времени затухания – показывает насколько быстр детектор, длительность вспышки.
- Быстрейший – $\text{BaF}_2\text{-La}$, $\text{BaF}_2\text{-Cd}$ (0,8 нс)
- Сцинтилляторы с ионами Pr^{3+} (от 10 до 30 нс)
- Сцинтилляторы с ионами Ce^{3+} (от 20 до 40 нс)
- Сцинтилляторы с ионами Tl^+ и Eu^{2+} более 250 мкс

Характеристики сцинтилляторов

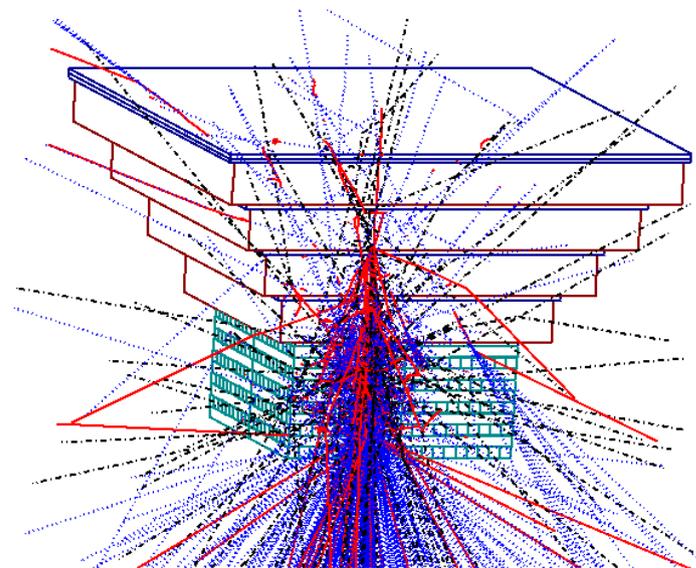
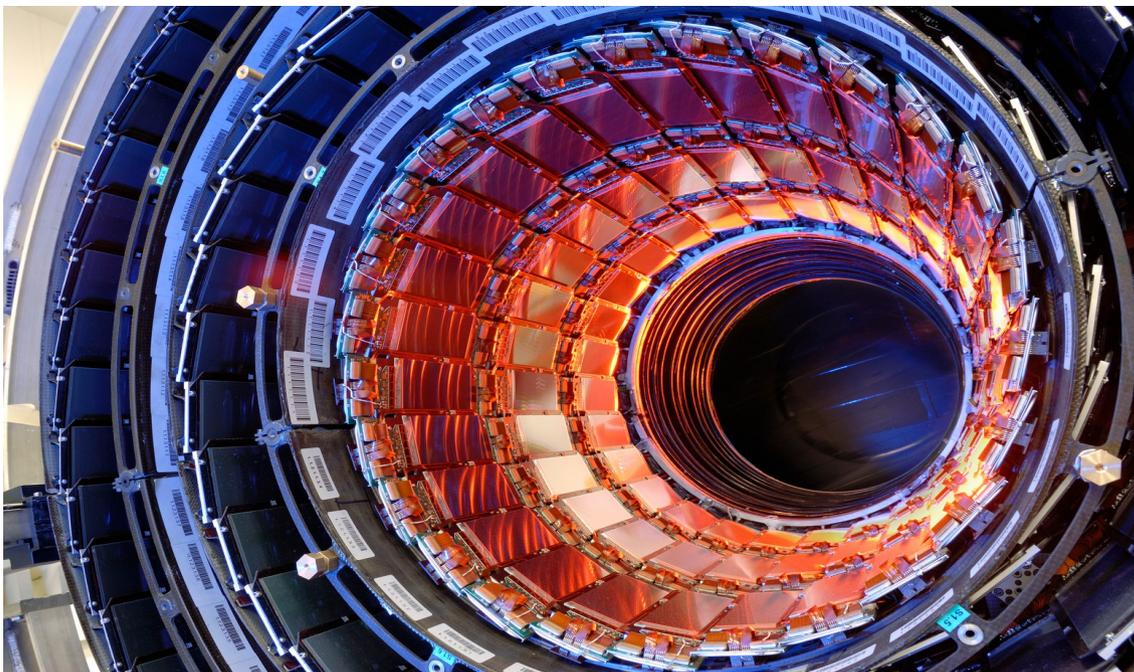
- Плотность – чем плотнее сцинтиллятор, тем лучше он поглощает частицы большей энергии (верно для гамма-излучения). Можно изготовить более плотный детектор меньшего размера.
- Самые плотные кристаллы:
- PbWO_4 8,3 г/см³
- CdWO_4 7,9 г/см³
- $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 7,1 г/см³
- Lu_2SiO_5 7,4 г/см³
- $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 12,7 г/см³
- LaBr_3 5,1 г/см³



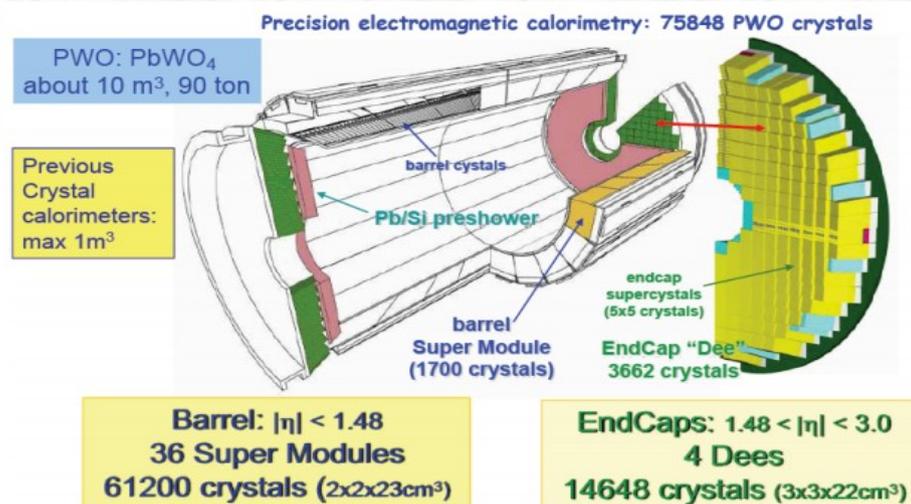
Применение сцинтилляторов

- В медицине (PET и SPECT томография) и физике высоких энергий – быстродействие и плотность
- В дозиметрии и геофизике – высокий световой выход и разрешение

Применение сцинтилляторов. Физика высоких энергий

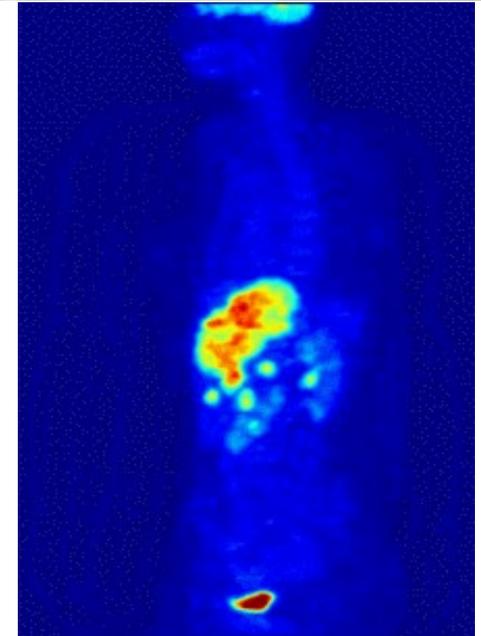
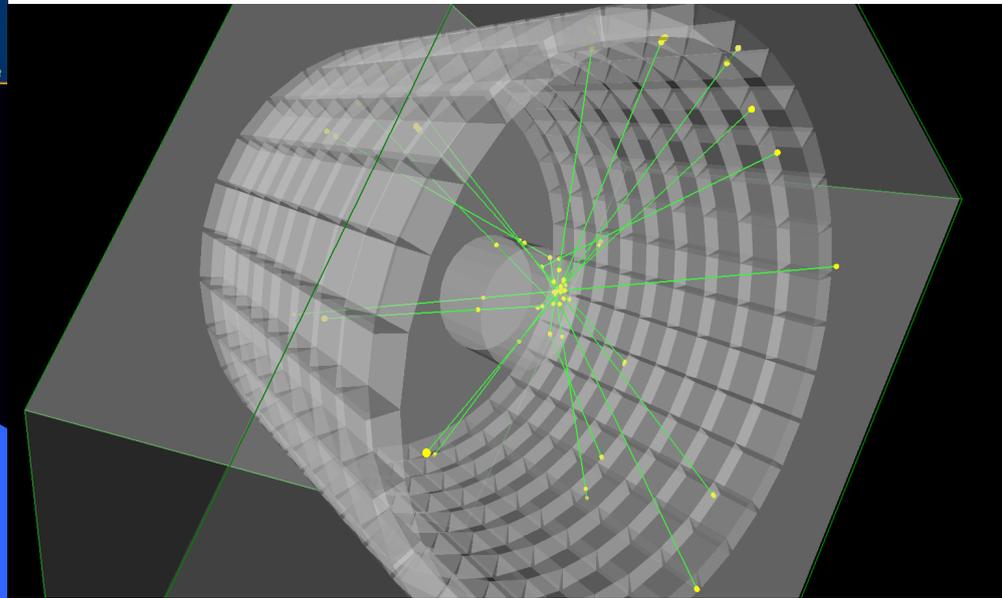
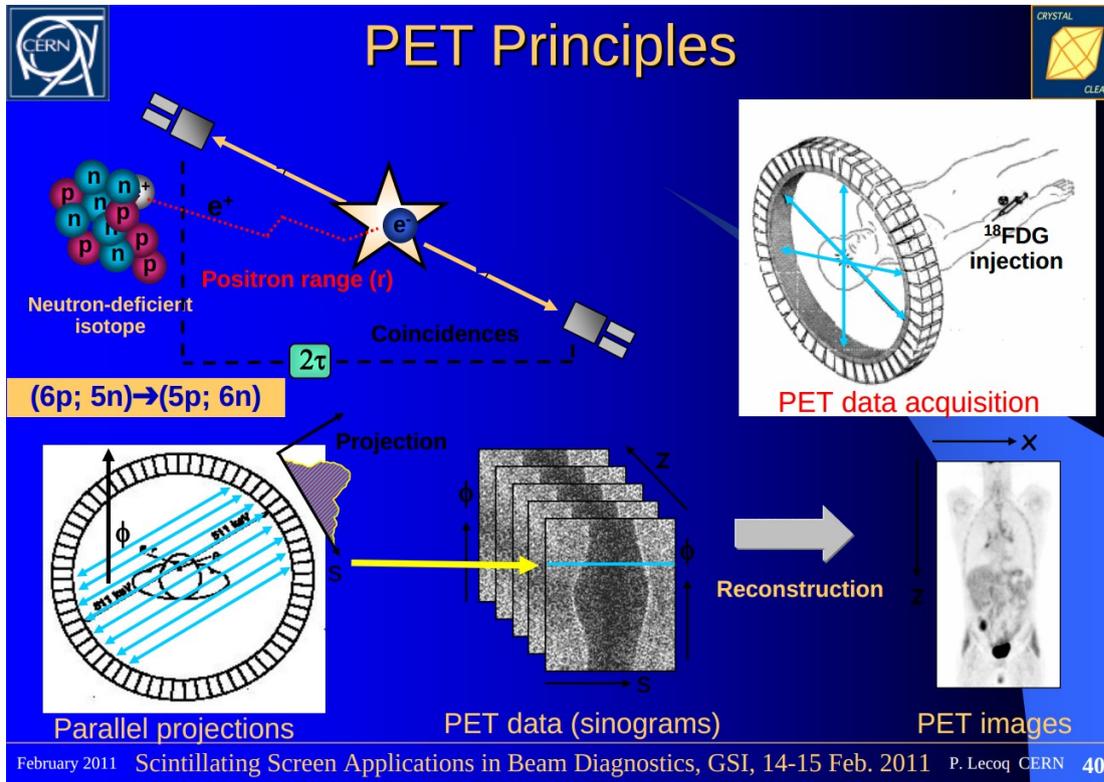


Калориметры предназначены главным образом для измерения полной энергии высокоэнергичных (в том числе и нейтральных) частиц. Попав в вещество калориметра частица рождает ливень вторичных частиц, передавая им свою энергию. Ливень поглощается в объеме калориметра и его энергия измеряется



Применение сцинтилляторов

PET томография

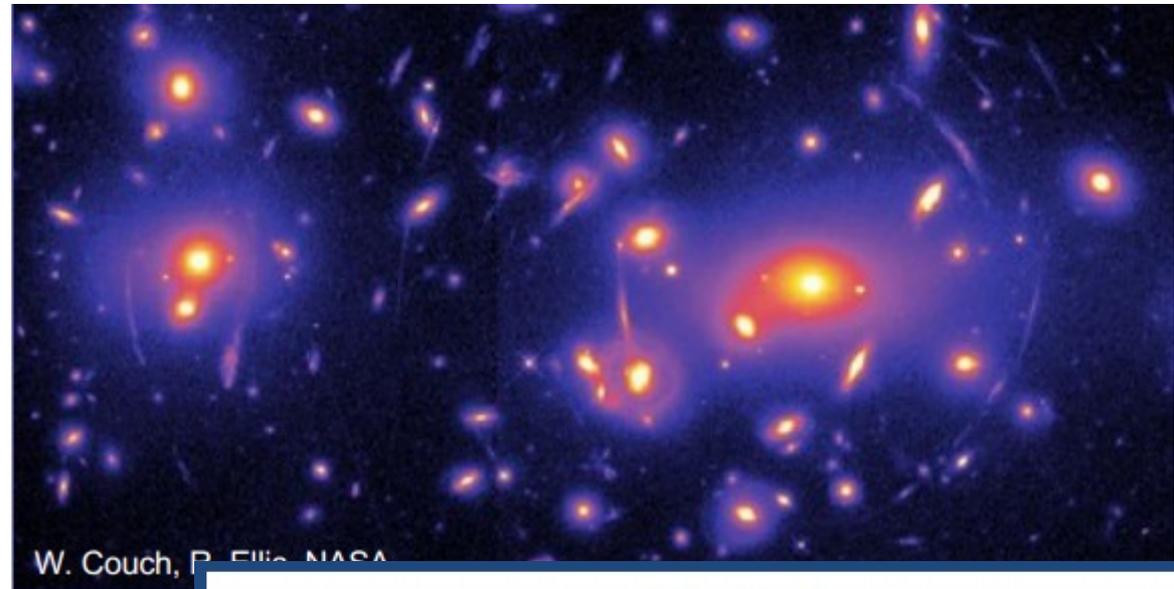


Двухфотонная эмиссионная томография — радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием (на прав. верхнем рисунке из 20 распадов зарегистрировано 3 пары).

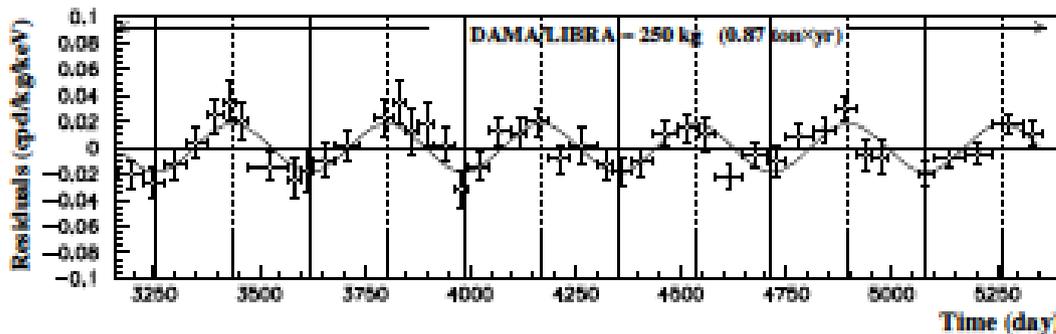
Применение сцинтилляторов

Поиск темной материи (dark matter)

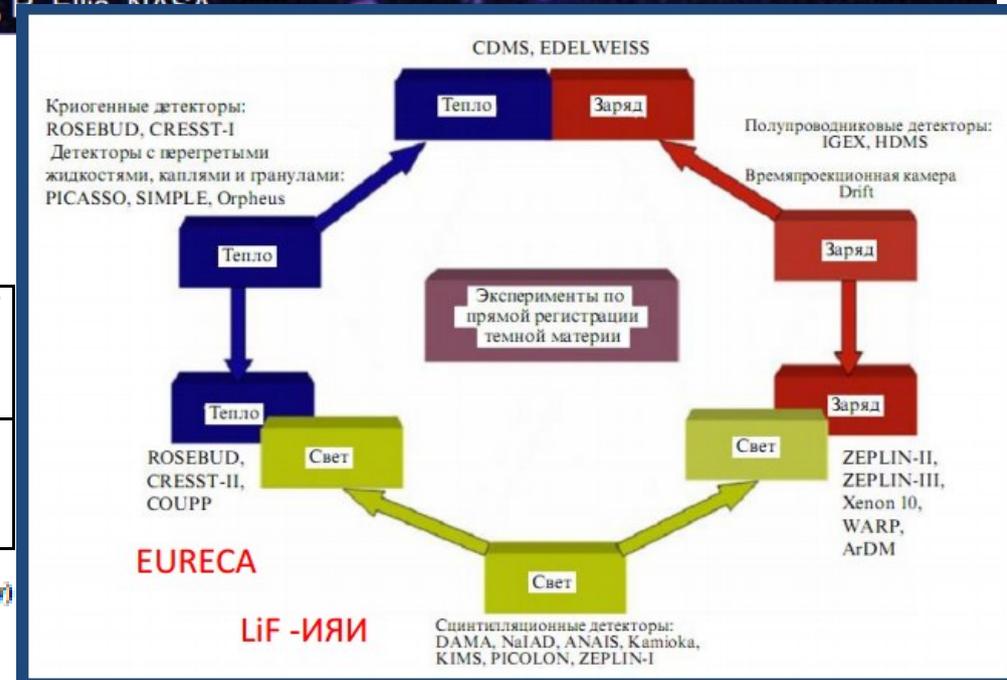
CaF₂(Eu)



DAMA LIBRA – 250kg of NaI(Tl)
2-4 keV

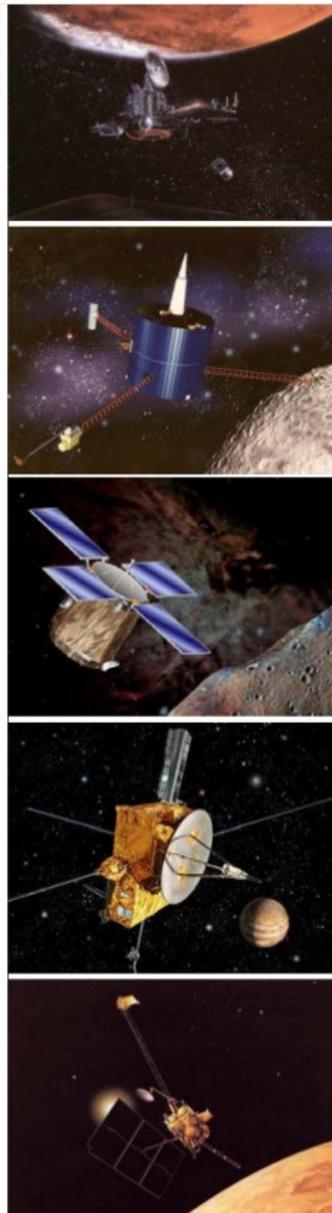


8.9 σ measured over 13 annual cycles



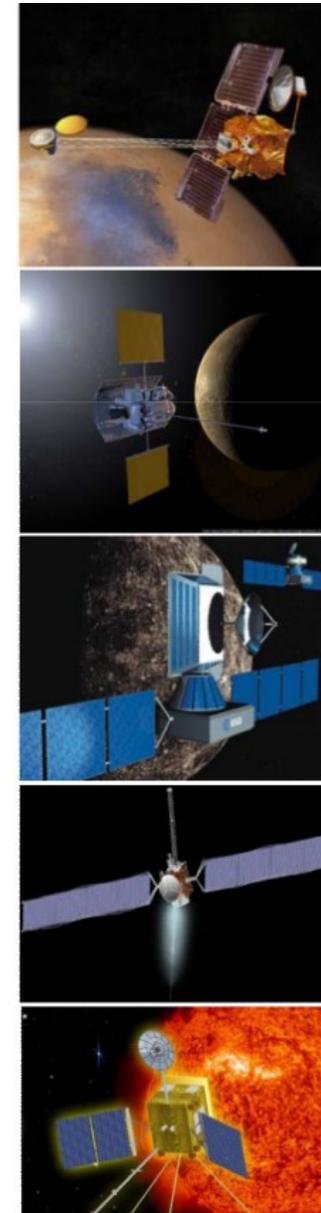
Применение сцинтилляторов

Космос



Past missions	GRS	NS	PS
- Phobos	CsI	Stilben,plastic	yes
- Lunar Prospector	BGO/BC454	BC454	
- Near	Nal/BGO		
- Mars Observer	HPGe/BC454	BC454	
- Mars Odyssey	HPGe	BC454,Stilben,plastic	CsI
Current missions			
- Ulysses	CsI/GRB		Plastic
- Messenger	HPGe/BGO	GS20,BC454	
Missions in implementation			
- Dawn	CZT/BGO	BGO,BC454, G20	
- Phobos Grunt	LaBr ₃	BC454,Stilben,plastic	
- Solar Orbiter	LaBr ₃	plastic	
- BepiColombo	LaBr ₃		CsI

GRS=gamma-ray spectrometer
NS=neutron spectrometer
PS=particle spectrometer

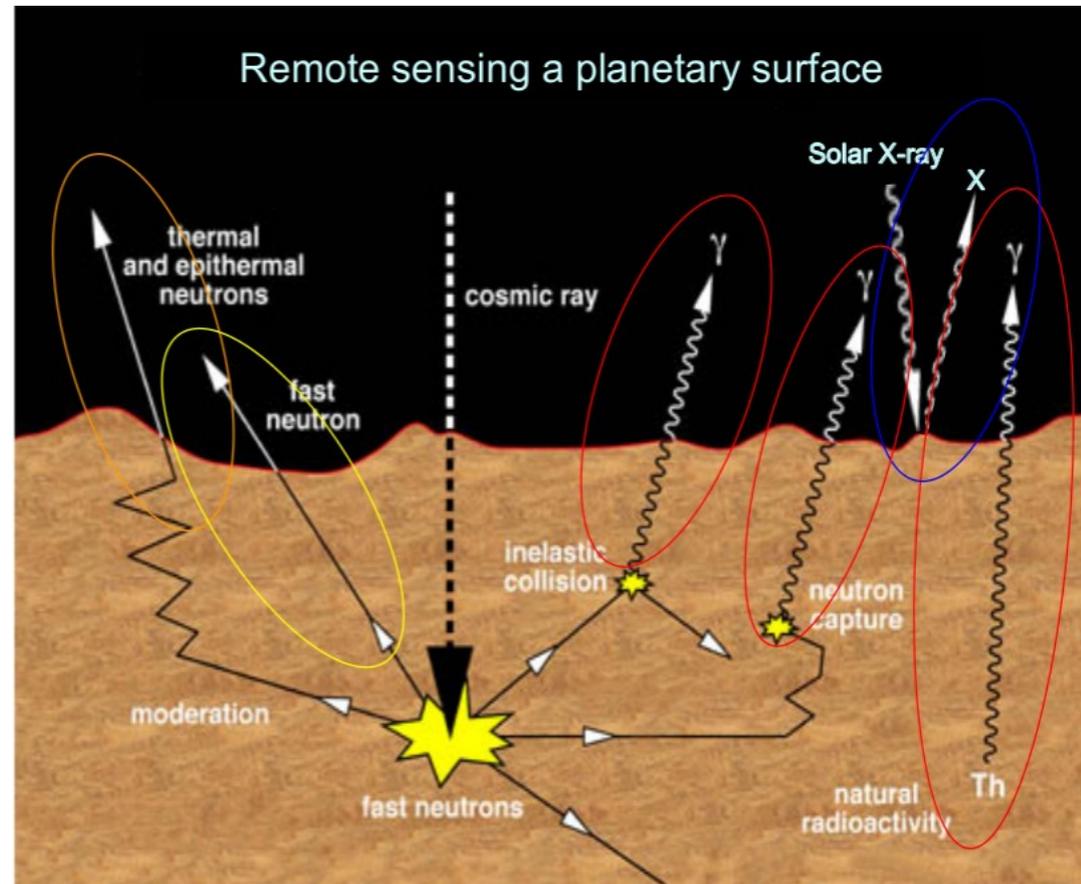


Применение сцинтилляторов

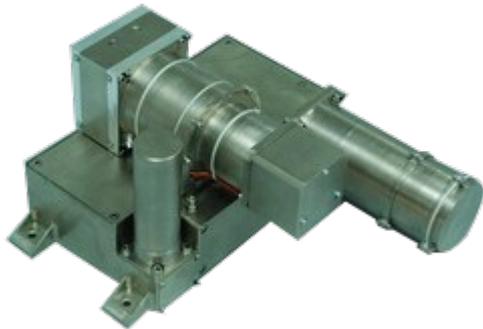
Космос

В основе лежит принцип регистрации вторичных нейтронов и гамма-квантов, которые рождаются в 1–2 метровом приповерхностном слое грунта, свободно облучаемого заряженными частицами космических лучей.

Родившиеся в грунте нейтроны высоких энергий замедляются и поглощаются ядрами основных породообразующих элементов через ядерные реакции неупругого рассеяния (в основном для быстрых нейтронов) и захвата (в основном для медленных и тепловых нейтронов), порождая "лес" ядерных линий гамма-излучения с характерными энергиями, соответствующими определенным химическим элементам. Линейчатый спектр гамма-излучения является уникальным "отпечатком пальцев" содержащим информацию об элементном составе поверхности.

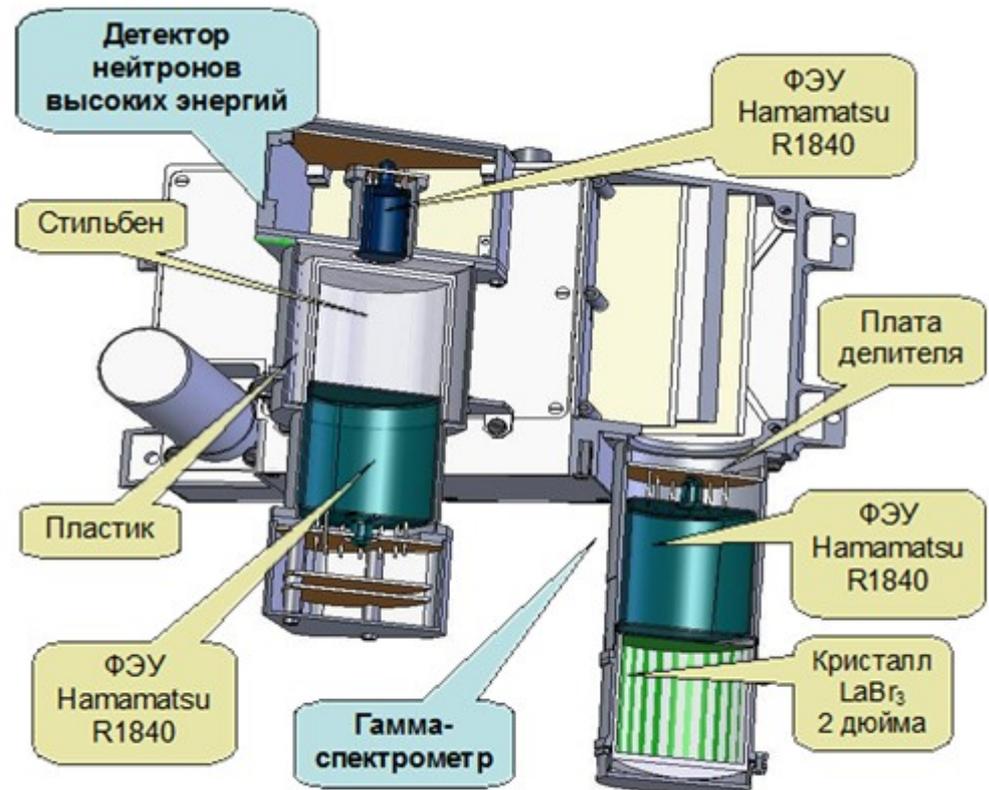


Применение сцинтилляторов Космос. Фобос грунт

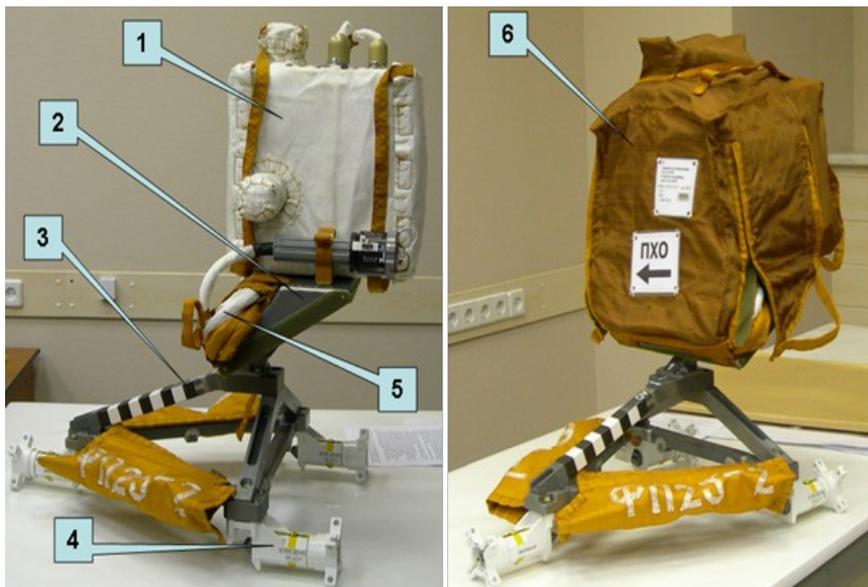
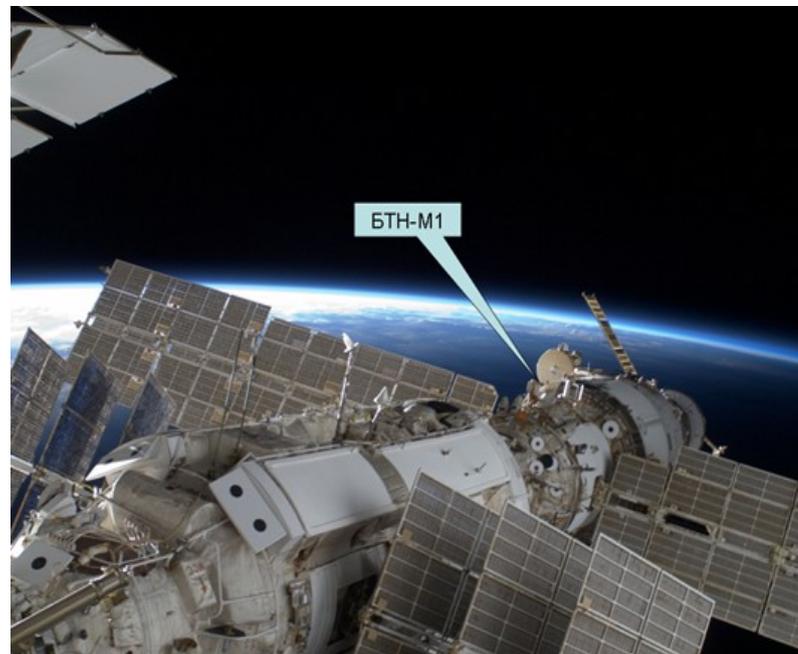
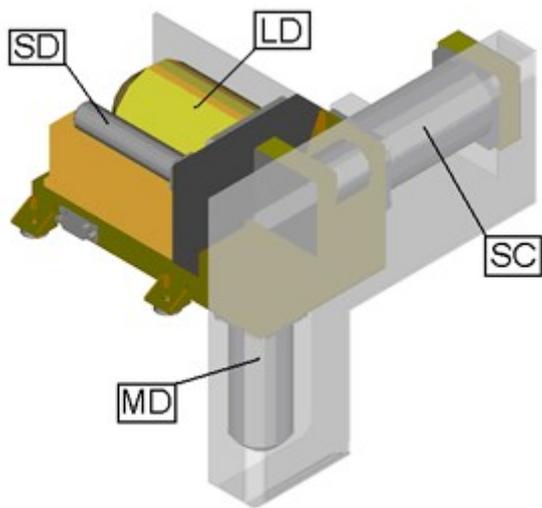


Исследование элементного состава поверхности Фобоса методами нейтронной и гамма спектроскопии. Полученные данные распределения основных породообразующих элементов и возможных ледяных отложений на Фобосе позволит выяснить условия его образования и характер эволюции. Кроме того, прибор может использоваться для выбора наиболее перспективного и интересного места для посадки КА «Фобос-грунт» на спутник Марса и забора грунта для возврата на Землю.

Назначение НС ХЕНД состоит в обеспечении физических измерений потоков нейтронов высоких энергий и гамма квантов во время межпланетного перелета, на орбите вокруг Марса, на этапе работы около Фобоса и при посадке на его поверхность.

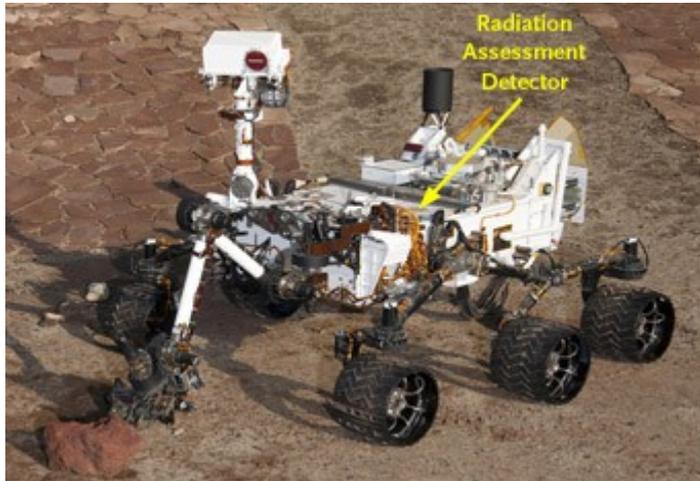


Применение сцинтилляторов Космос. МКС

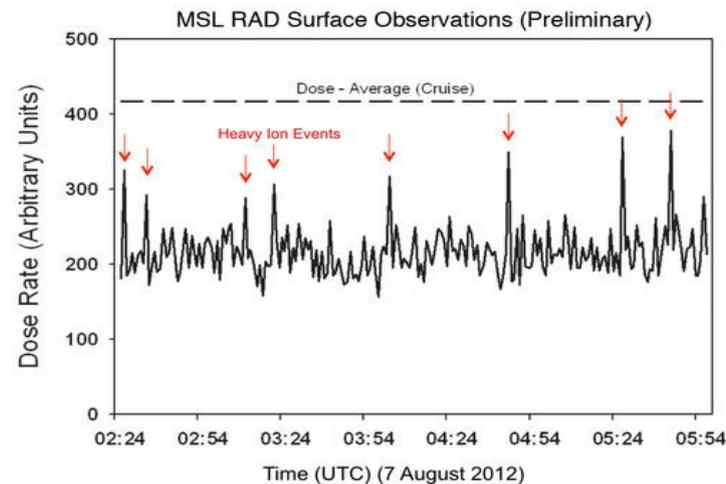
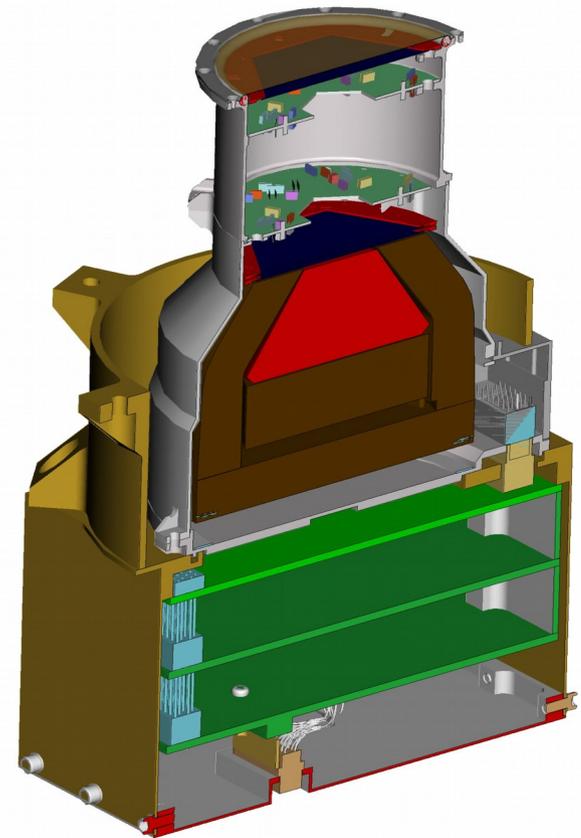


Целью космического эксперимента (КЭ) является изучение энергетического спектра нейтронов и их временного и пространственного распределений снаружи и внутри МКС для выделения потоков солнечных нейтронов, нейтронов альbedo атмосферы Земли и нейтронов, рожденных в материалах МКС, а также исследование радиационно-защитных свойств различных материалов для разработки предложений по созданию радиационных убежищ при межпланетных перелетах и в периоды пилотируемых экспедиций на Луну и Марс.

Применение сцинтилляторов Космос. Curiosity



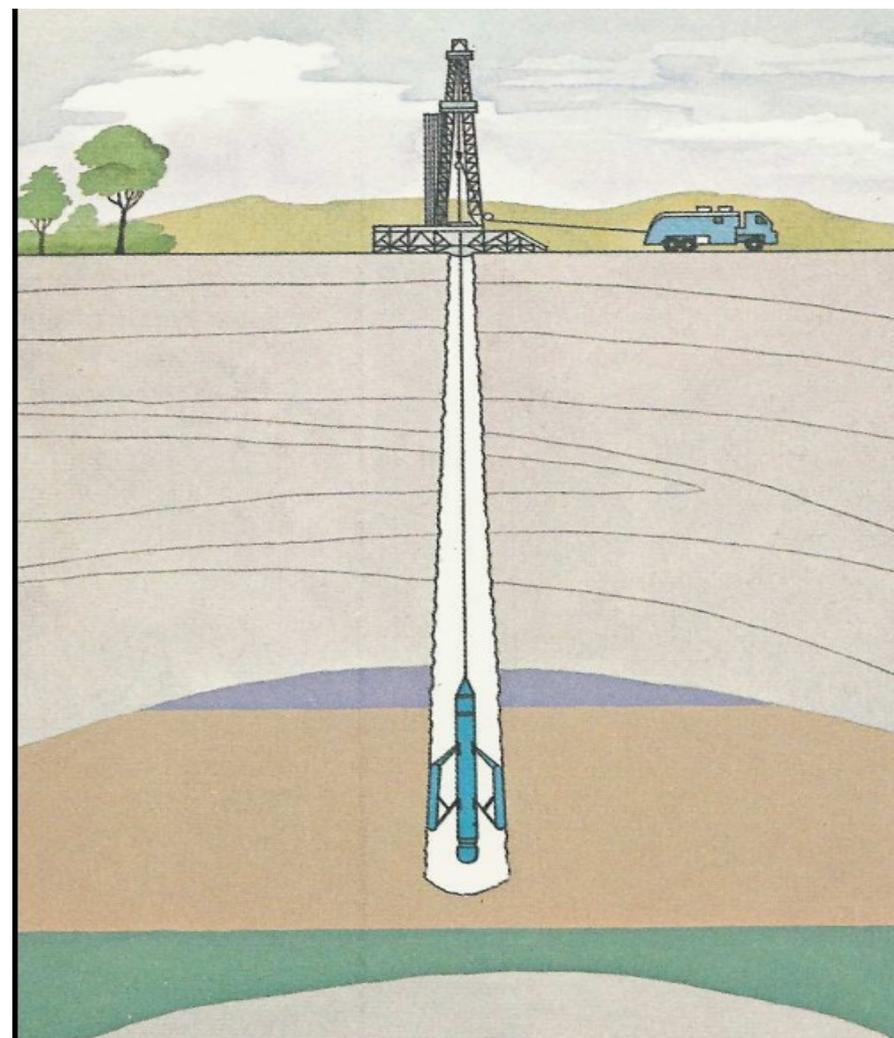
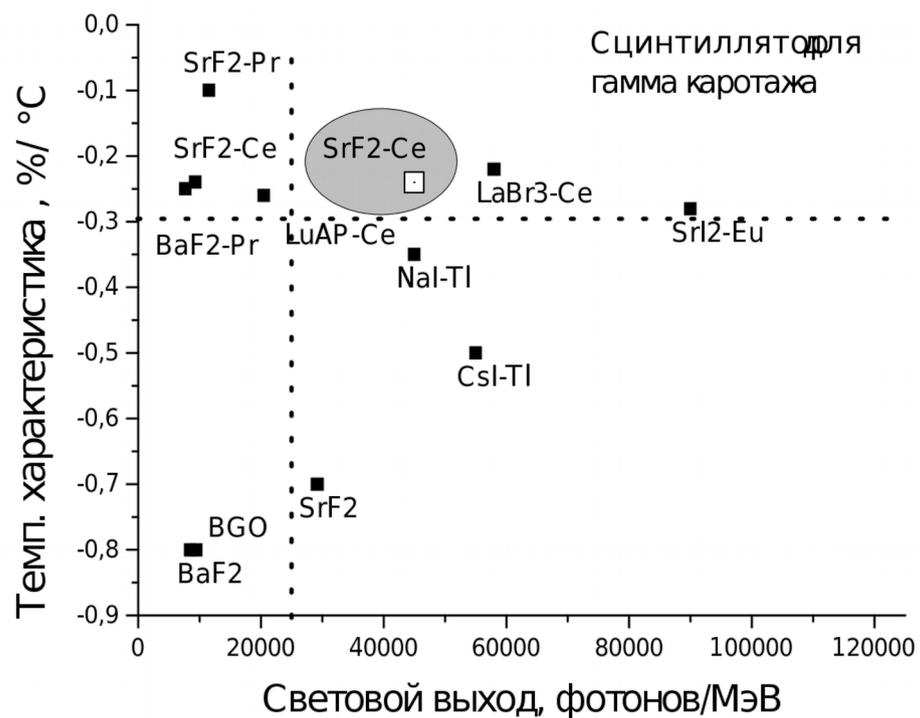
Прибор RAD – телескоп заряженных частиц, состоящий из трех твердотельных детекторов и йодида цезия (CsI). Дополнительный BC-432 частый пластиковый канал используется вместе с калориметром CsI.



Применение сцинтилляторов.

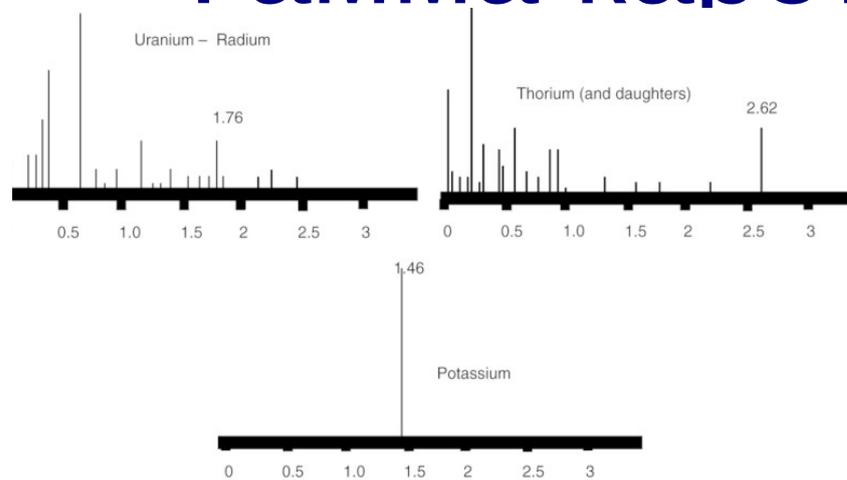
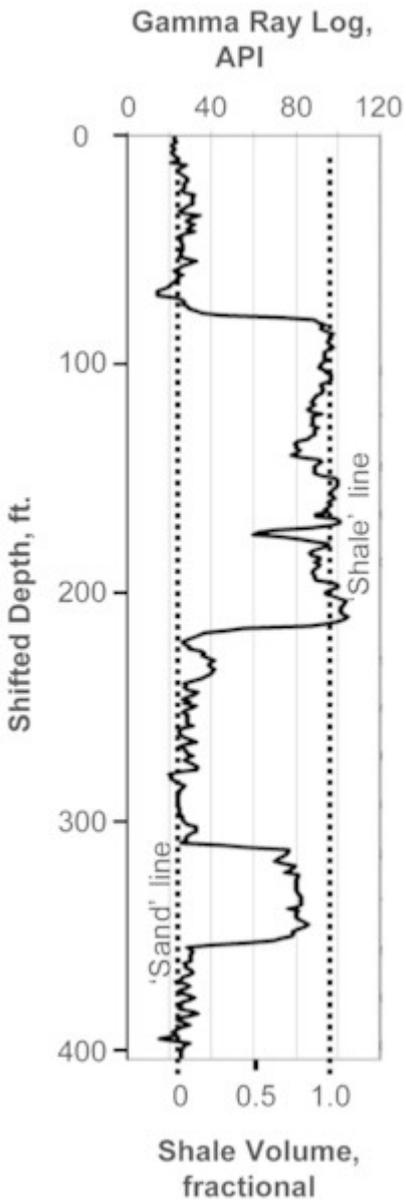
Гамма каротаж

Вид каротажа, основанный на изучении естественного гамма-излучения и взаимодействия вещества горной породы с наведенным ионизирующим излучением.



Применение сцинтилляторов.

Гамма каротаж



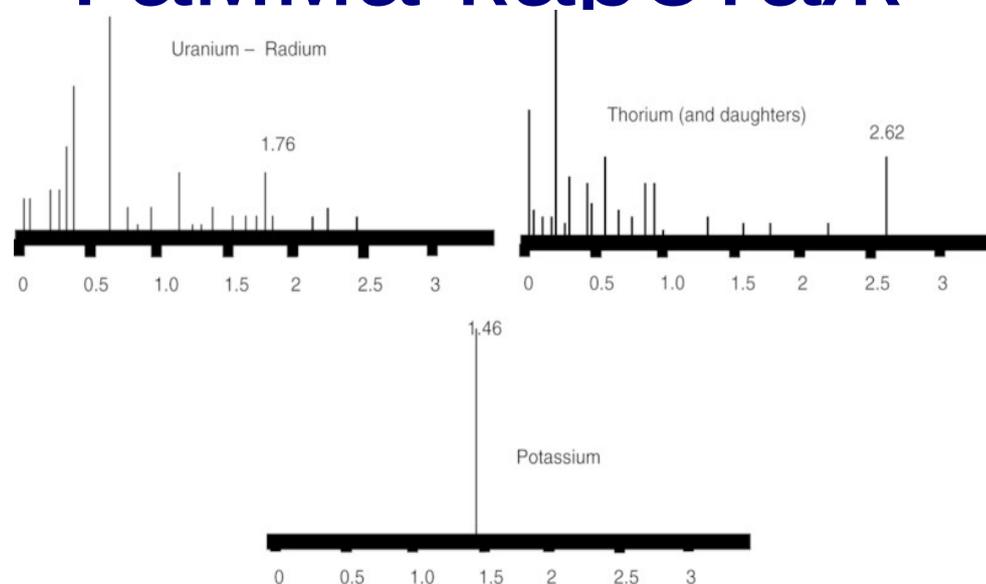
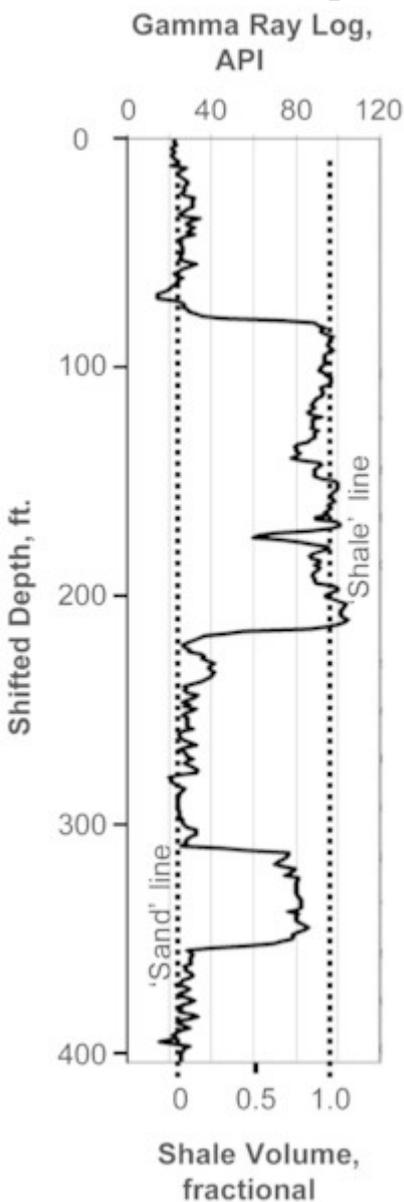
При спектральном гамма-каротаже (СГК) определяют суммарную естественную радиоактивность породы (гамма-каротаж) и отдельное содержание в ней калия, урана и тория. Метод применяется для решения качественных и количественных задач.

Для чистых карбонатных пород характерно низкое содержание К, U и Th и соответственно низкая гамма-активность.

Обогащение карбонатных пород глинистым материалом отмечается спектральным гамма-каротажем максимумом на кривой ГК и увеличением содержания К, U и Th.

Применение сцинтилляторов.

Гамма каротаж



В отдельных случаях против карбонатных пород наблюдается повышенная гамма-активность по ГК при низком содержании К и Th, но высокой концентрации U. Эти интервалы совпадают с трещиноватыми и высокопродуктивными зонами карбонатных отложений. Аналогичная картина наблюдается и против известковистых и алевролитистых пород, в которых происходит интенсивное развитие естественной трещиноватости, отмечаемой на кривых SGK низким содержанием калия и тория и высокой концентрацией урана. Такие же показания фиксируются на кривых SGK в области тектонических разломов и против трещиноватых сланцев и аргиллитовых пород.

В зонах естественной трещиноватости в результате циркулирующих подземных вод происходит осаждение урана. Повышенная гамма-активность на кривой ГК обусловлена при этом повышенной концентрацией урана. Разделить породы на собственно глинистые и чистые (трещиноватые, алевролитовые) с повышенной естественной гамма-активностью возможно по данным SGK на основании отдельной регистрации содержания К, U и Th.

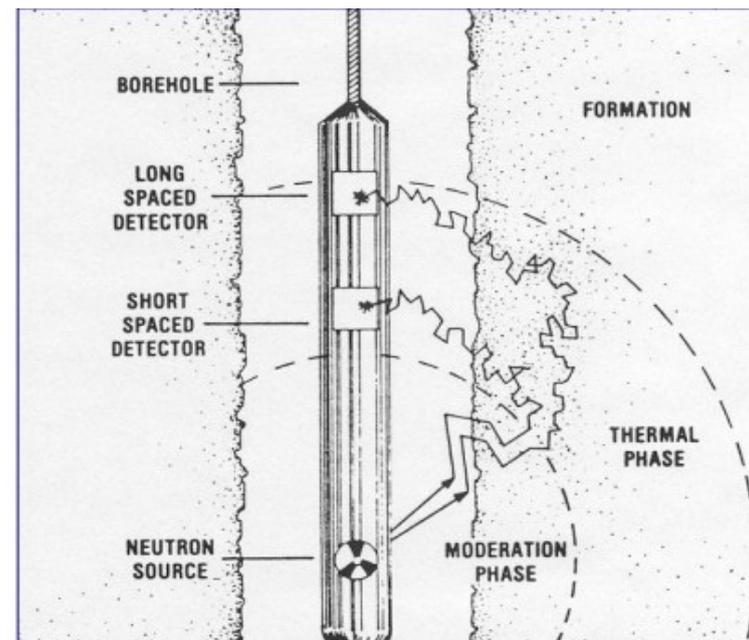
Применение сцинтилляторов.

Гамма каротаж

По нейтронным свойствам осадочные горные породы можно разделить на две группы — большого и малого водородосодержания.

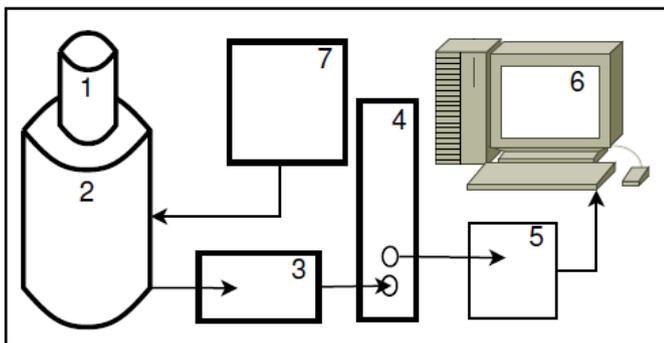
К первой группе пород относятся глины, характеризующиеся высокой влагоемкостью (пористостью) и содержащие значительное количество минералов с химически связанной водой (водные алюмосиликаты), гипсы, отличающиеся малой пористостью, но содержащие химически связанную воду, а также некоторые очень пористые и проницаемые породы-коллекторы, насыщенные в естественных условиях водой или нефтью. При измерениях зондами большой длины ($L \geq 40$ см) на диаграммах НГК эти породы отмечаются низкими показаниями радиационного гамма-излучения.

Во вторую группу пород входят малопористые породы — плотные известняки и доломиты, цементированные песчаники и алевролиты, а также гидрокимические образования (ангидриты и каменная соль). На диаграммах НГК, зарегистрированных зондами большой длины, эти породы выделяются высокими показаниями. Против других осадочных пород (песков, песчаников, пористых карбонатов) показания НГК зависят от их глинистости и содержания в них водорода и хлора (насыщенности водой различной минерализации, нефтью или газом).

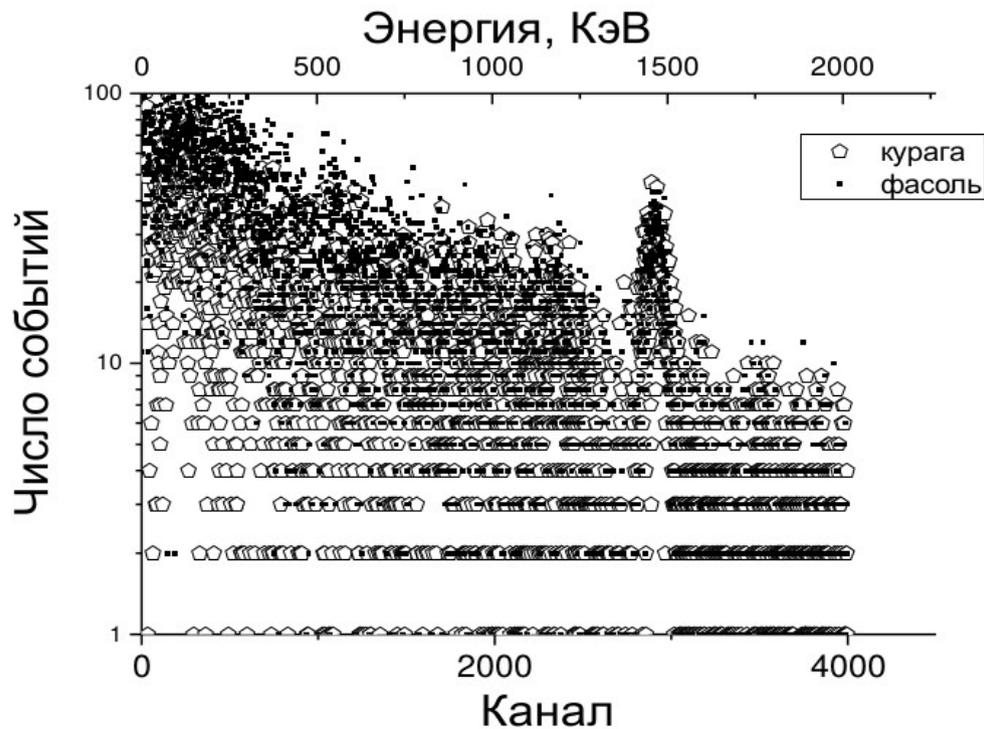


Применение сцинтилляторов. Радиоэкология и безопасность

Низкофоновая установка (фоновый сигнал < 4 имп./с) для гамма-спектрометрии.



Применение сцинтилляторов. Радиоэкология и безопасность



Собственная радиоактивность человека



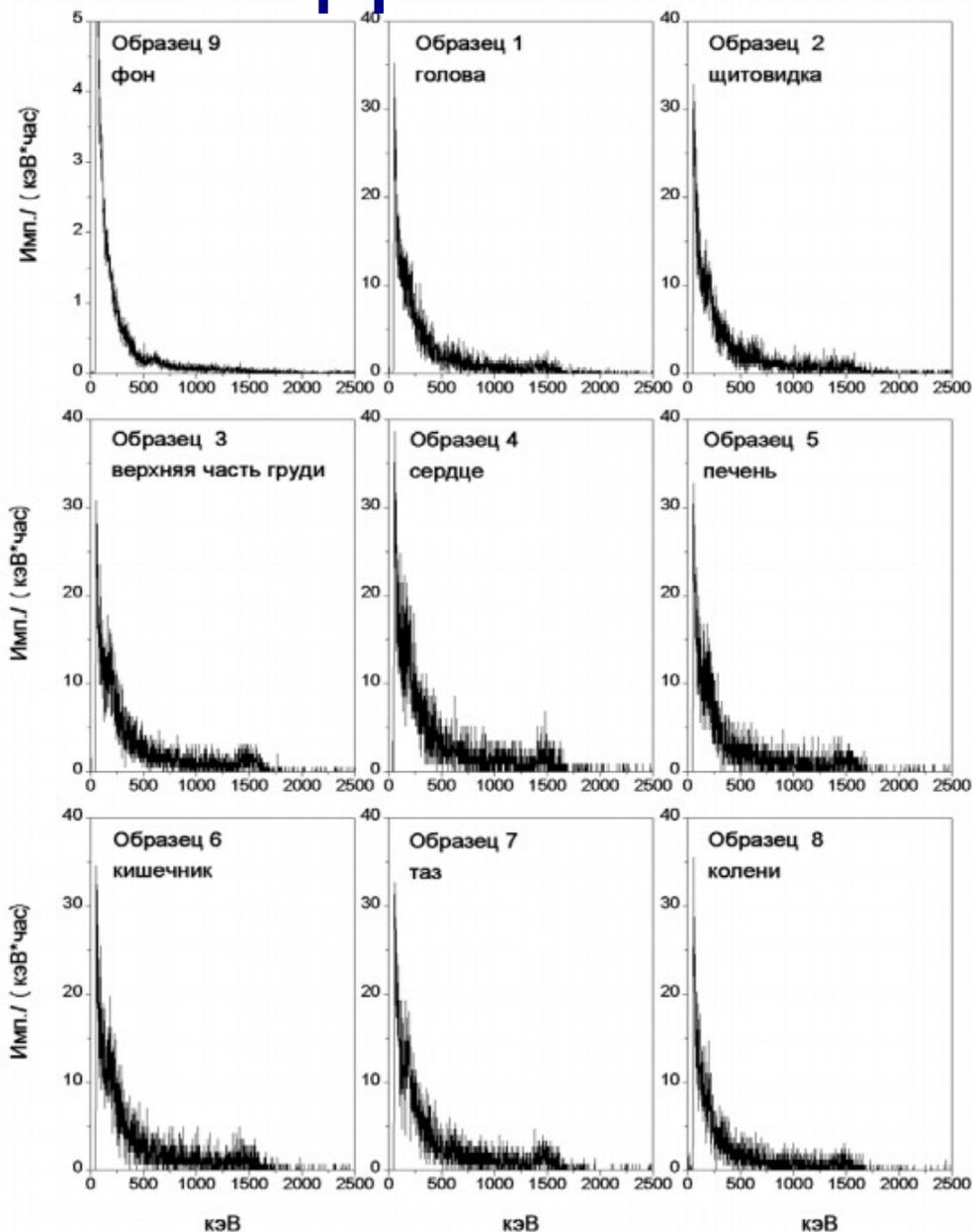
Собственная радиоактивность кураги
фасоли

Доля калия-40 в природе составляет
0,0117%, $E=1,46$ МэВ

(период полураспада $1,248 \cdot 10^9$ лет)

В грамме природного калия происходит в
среднем 32 распада калия-40 в секунду.

Применение сцинтилляторов. Радиоэкология и безопасность

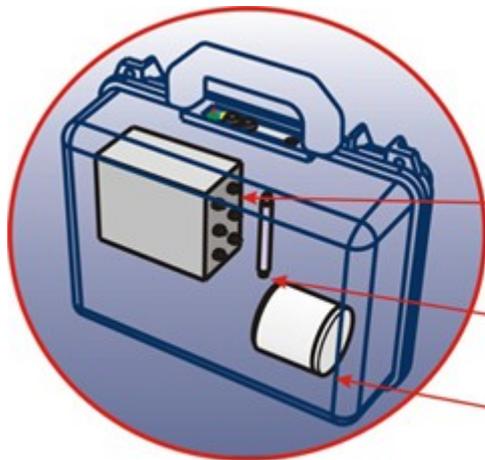


Собственная радиоактивность человека



Доля калия-40 в природе составляет 0,0117%, $E=1,46$ МэВ
(период полураспада $1,248 \cdot 10^9$ лет)
В грамме природного калия происходит в среднем 32 распада калия-40 в секунду.

Применение сцинтилляторов. Радиоэкология и безопасность



Нейтронный детектор

- 6 пропорциональных счетчиков в замедлителе

Широкодиапазонный гамма-детектор
(для безопасности)

- счетчик Гейгера-Мюллера

Спектрометрический гамма-детектор
NaI(Tl) 76 мм x 76 мм

Заключение

- Сцинтилляторы все шире используются в исследованиях окружающей среды, космоса, человека
- По сравнению с другими детекторами сцинтиллятор обладает высокой скоростью счета и низкой ценой
- Развитие сцинтилляторов: поиск новых ярких материалов, новые фотодетекторы

