



**Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»**

**Институт ядерной физики и технологий  
Лаборатория экспериментальной ядерной физики**  
<http://enpl.mephi.ru/>

**А.И. Болоздыня**

# **Экспериментальная ядерная физика**

**Лекция №3**

**Взаимодействие гамма-квантов с веществом**

2017

## *Лекция №3*

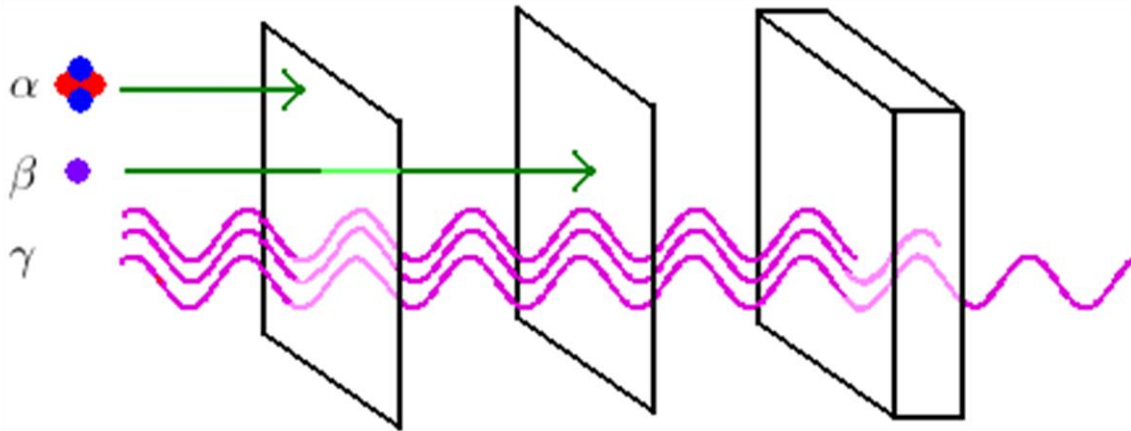
### *Взаимодействие гамма-квантов с веществом*

1. Введение
2. Фотоэффект
3. Эффект Комптона
4. Рождение электрон-позитронных пар
5. Коэффициент поглощения
6. Примеры использования гамма-излучений

# 1. Введение

1900

Radium



**Paper Aluminium Lead**



Paul Ulrich Villard  
(1860-1934)

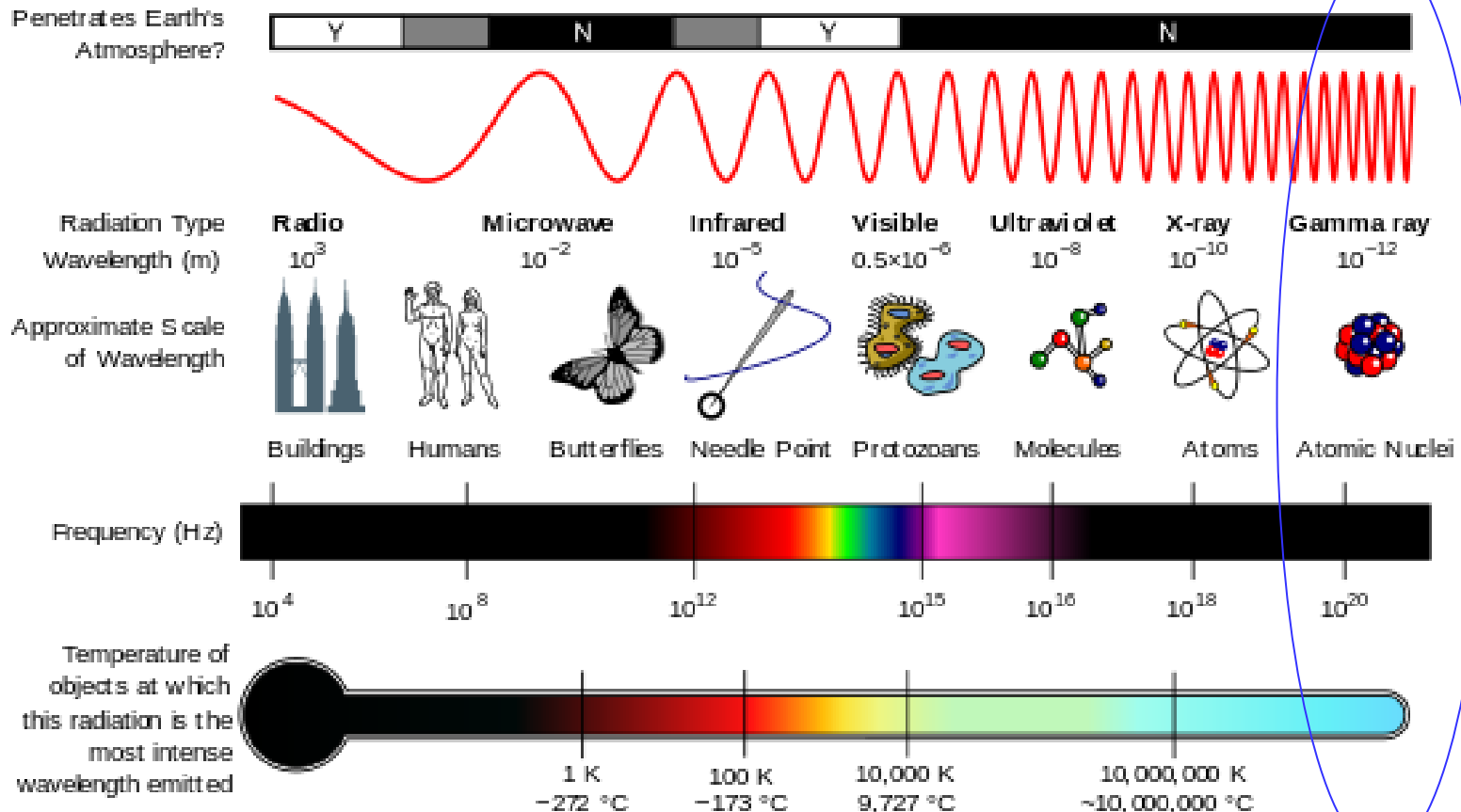
**Гамма-лучи**, в отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучей, не содержат заряженных частиц и поэтому не отклоняются электрическими и магнитными полями и характеризуются большей проникающей способностью при равных энергиях и прочих равных условиях.

Основные процессы, возникающие при прохождении гамма-излучения через вещество:

- **Фотоэффект** — энергия гамма-кванта поглощается электроном оболочки атома, и электрон, совершая работу выхода, покидает атом (который становится ионизированным).
- **Комптон-эффект** — гамма-квант рассеивается при взаимодействии с электроном, при этом образуется новый гамма-квант, меньшей энергии, что также сопровождается высвобождением электрона и ионизацией атома.
- **Эффект образования пар** — гамма-квант в поле ядра превращается в электрон и позитрон.
- **Ядерный фотоэффект** — при энергиях выше нескольких десятков МэВ гамма-квант способен выбивать нуклоны из ядра.

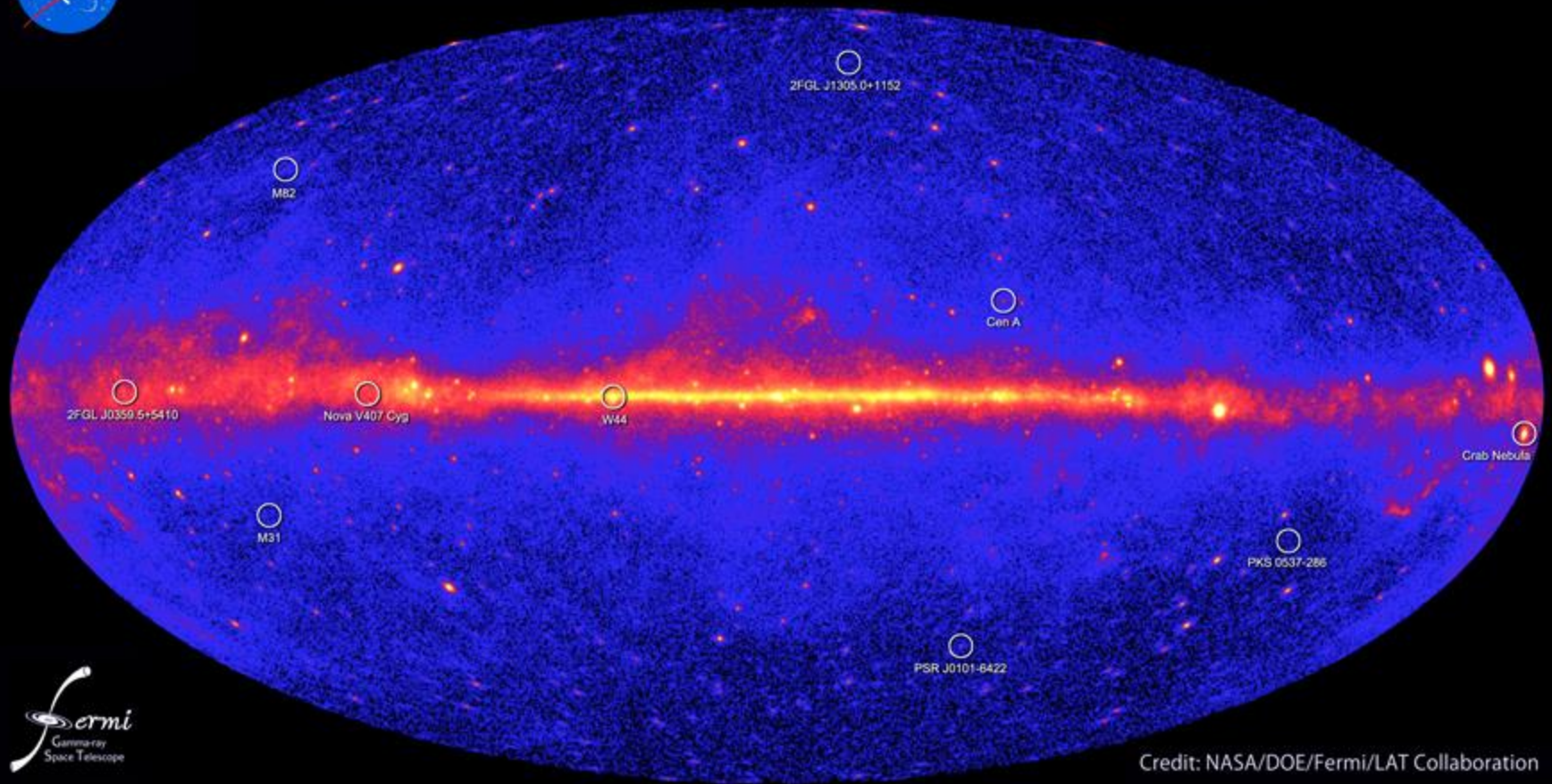
К гамма-излучению относят электромагнитные волны, длина которых значительно меньше межатомных расстояний, поэтому они обладают ярко выраженными корпускулярными свойствами. Содержание  $\gamma$ -квантов во Вселенной  $\sim 400 \text{ см}^{-3}$

### Место гамма-квантов в спектре электромагнитных излучений





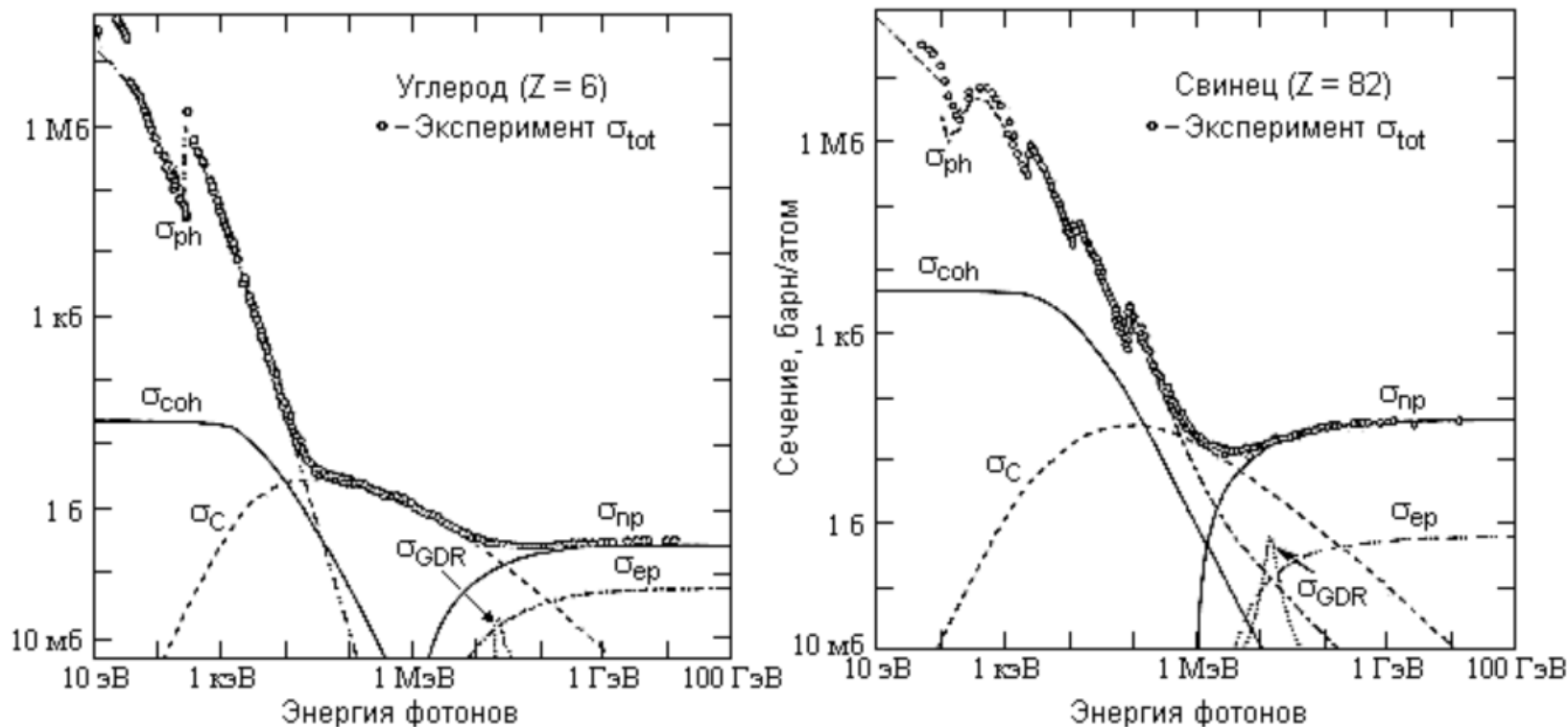
# Fermi two-year all-sky map



Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

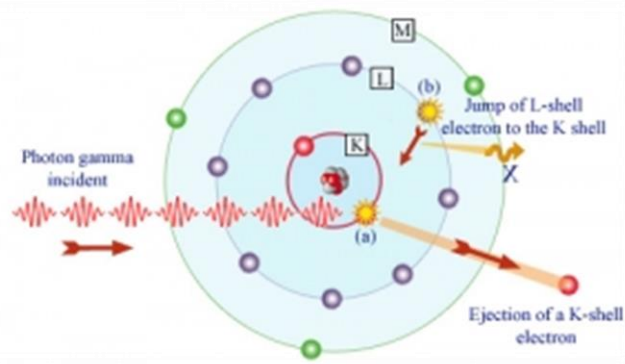
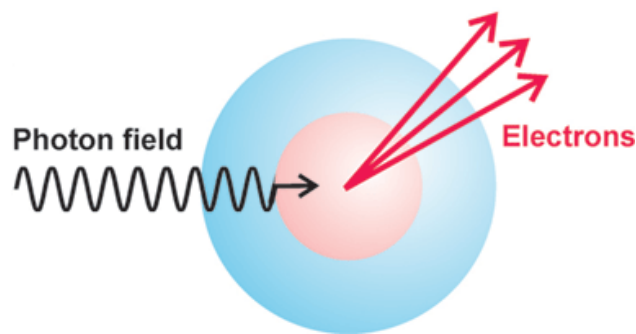
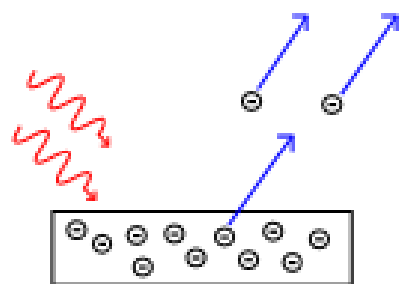
В области энергий гамма-квантов, излучаемых возбужденными ядрами при переходах в основное и низшие возбужденные состояния, т. е. при  $E_\gamma$  от 10 кэВ до примерно 10 МэВ наиболее существенны три процесса взаимодействия фотонов с веществом: комптоновское (некогерентное) рассеяние, фотоэффект и образование пар электрон-позитрон. Суммарное эффективное сечение в этой области энергий является суммой эффективных сечений отдельных процессов, участвующих в ослаблении первичного потока:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{C}} + \sigma_{\text{p}}$$



$\sigma_{\text{ph}}$  - сечение фотоэффекта,  $\sigma_{\text{coh}}$  - сечение релеевского рассеяния,  $\sigma_{\text{C}}$  - сечение комптоновского рассеяния,  $\sigma_{\text{np}}$  - сечение рождения пары в поле ядра,  $\sigma_{\text{ep}}$  - сечение образования пар в поле атомных электронов,  $\sigma_{\text{GDR}}$  - сечения ядерного фотопоглощения

## 2. Фотоэффект



Нобелевская премия по физике 1921 года была присуждена А. Эйнштейну «за заслуги в теоретической физике и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта» (дискретность света)

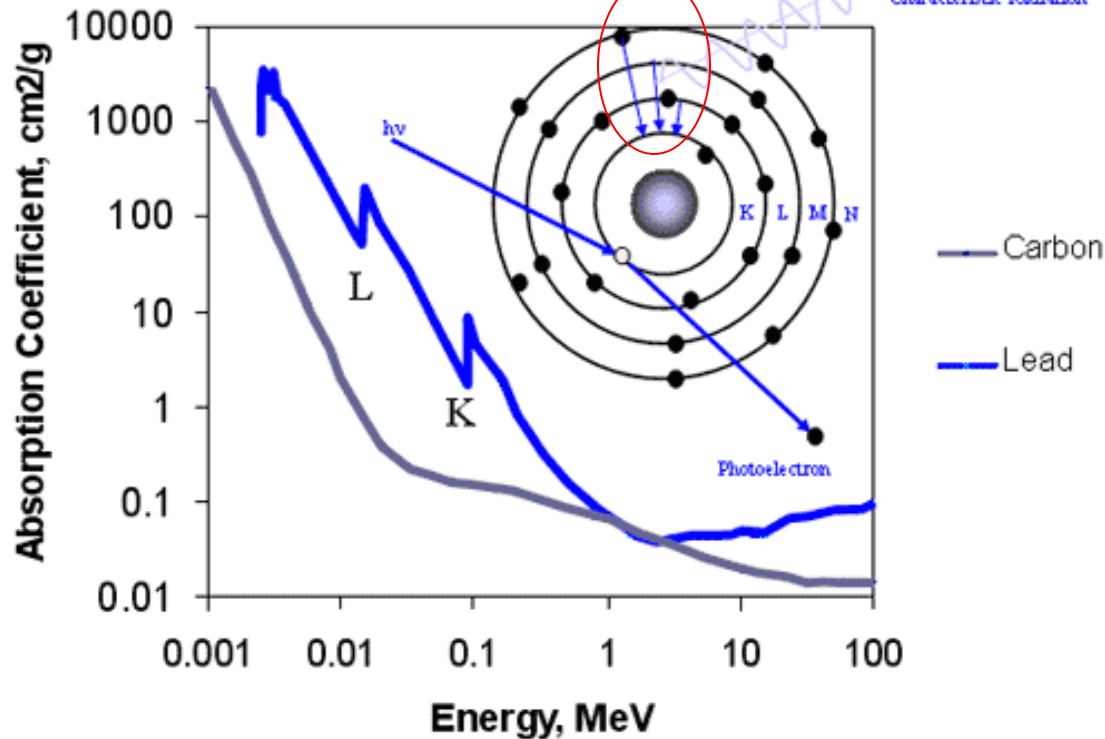
Если энергия  $\gamma$ -кванта больше энергии связи электрона оболочки атома, происходит фотоэффект. Это явление состоит в том, что фотон целиком поглощается атомом, а один из электронов атомной оболочки выбрасывается за пределы атома. Используя закон сохранения энергии, можно определить кинетическую энергию фотоэлектрона  $E_e$ :

$$E_e = E_\gamma - I_i - E_n,$$

где  $I_i$  – ионизационный потенциал оболочки атома, из которой выбивается электрон;  $E_n$  – энергия отдачи ядра,  $E_\gamma$  – энергия гамма-кванта. Величина энергии отдачи ядра обычно мала, поэтому ею можно пренебречь. Тогда энергия фотоэлектрона определится соотношением  $E_e = E_\gamma - I_i$ , где  $i = K, L, M, \dots$  – индекс электронной оболочки.

Для каждого вещества существует граничная частота (энергия фотона) света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны называется **красной (нижней) границей фотоэффекта**

$$I(x) = I(0)e^{-\mu_0 x} = I(0)e^{-\mu x}$$



*Вероятность фотопоглощения в среде  $\sim Z^N/E^{3.5}$*

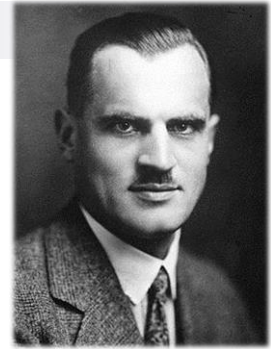
$Z$  – заряд ядра (атомный номер)

$N = 4-5$

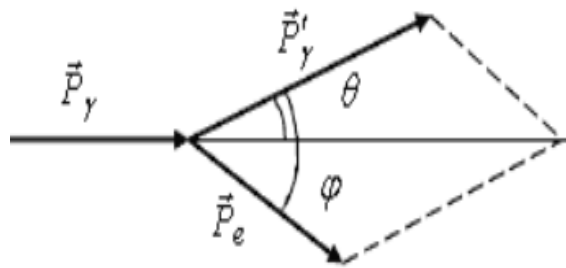
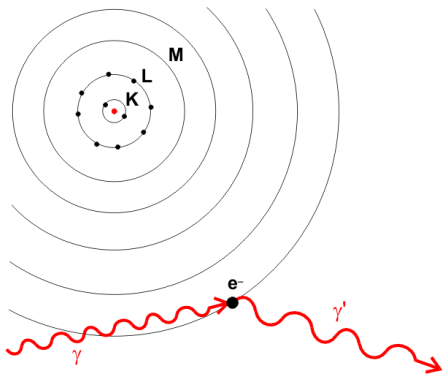
$E$  – энергия гамма-кванта

### 3. Эффект Комптона

**Комптон-эффект** – это рассеяние  $\gamma$ -квантов на свободных электронах. Электрон можно считать свободным, если энергия  $\gamma$ -квантов во много раз превышает энергию связи электрона.



Артур Холли Комптон  
(1892-1962)  
Н.п. 1927



$$E' = \frac{E}{1 + \left(\frac{E}{m_0 c^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}'_\gamma + \vec{P}_e, \quad m_e c^2 + E_\gamma = E'_\gamma + E_e$$

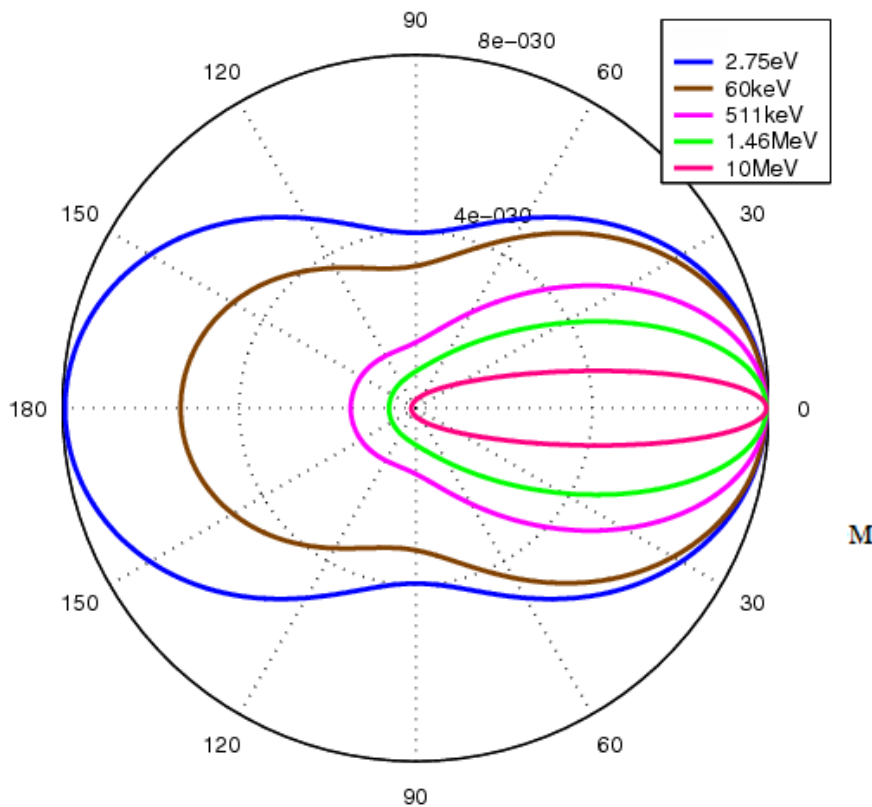
$$\Delta\lambda = 2\lambda_0 \sin^2(\theta/2), \quad \lambda_0 = h/m_0 c, \quad \lambda_0 = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

где  $\lambda_0$  — **комптоновская длина волны** электрона,  $\theta$  — **угол** между направлением падающей и рассеянной волнами,  $h$  — **постоянная Планка**,  $m_0$  — **масса электрона**, а  $c$  — **скорость света**.

Полное сечение комптоновского рассеяния на свободном электроне (формула Клейна — Нишины , 1928)

$$\sigma_k = \pi r_0^2 \frac{m_0 c^2}{\hbar \omega} \left( \ln \frac{2\hbar \omega}{m_0 c^2} + \frac{1}{2} \right)$$

## Угловая зависимость рассеяния гамма-квантов на электроне для разных энергий гамма-квантов

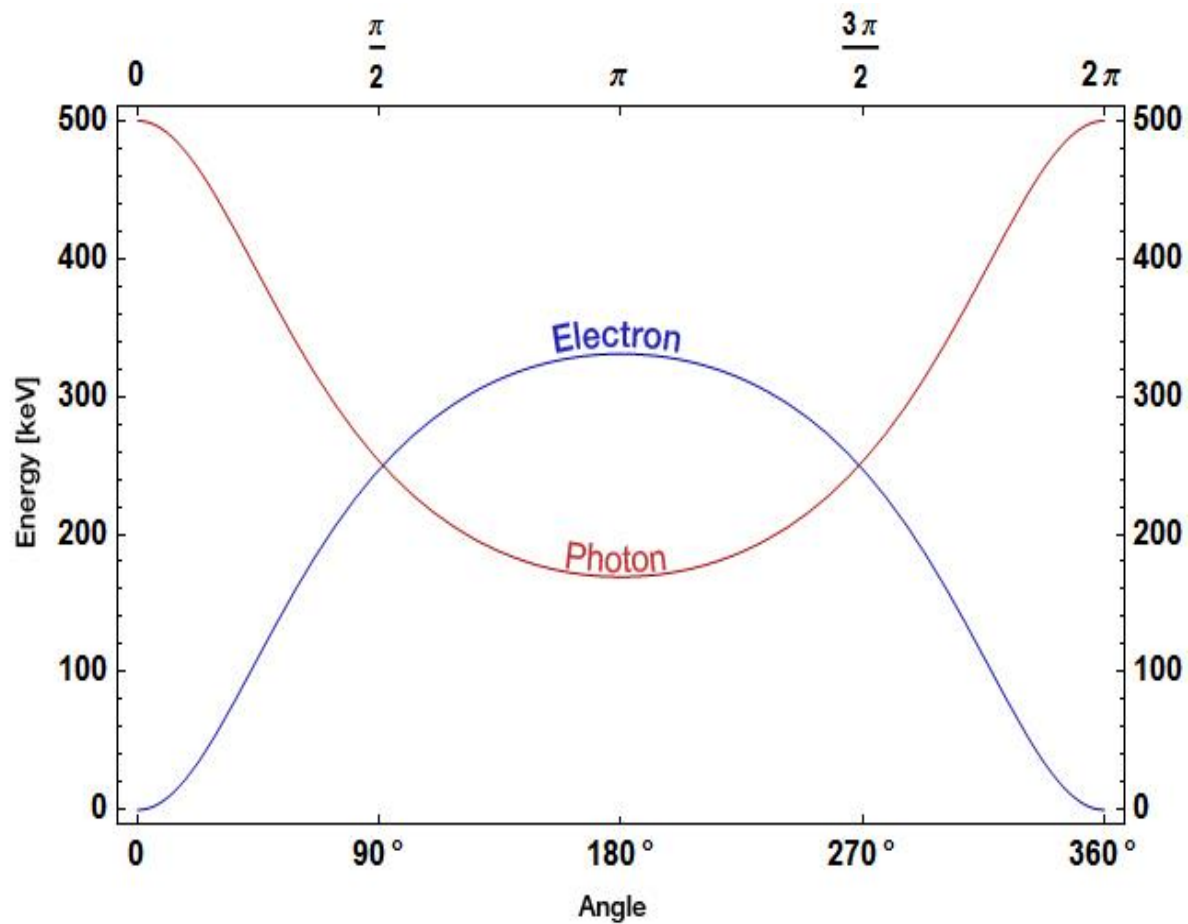
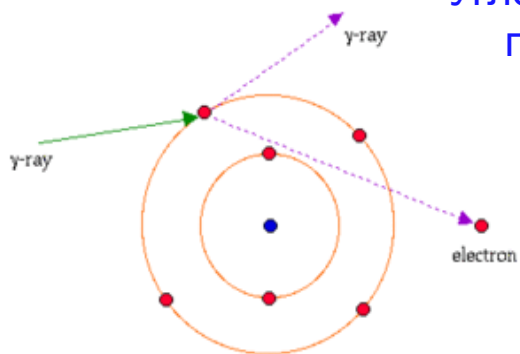


→  
Incoming wave

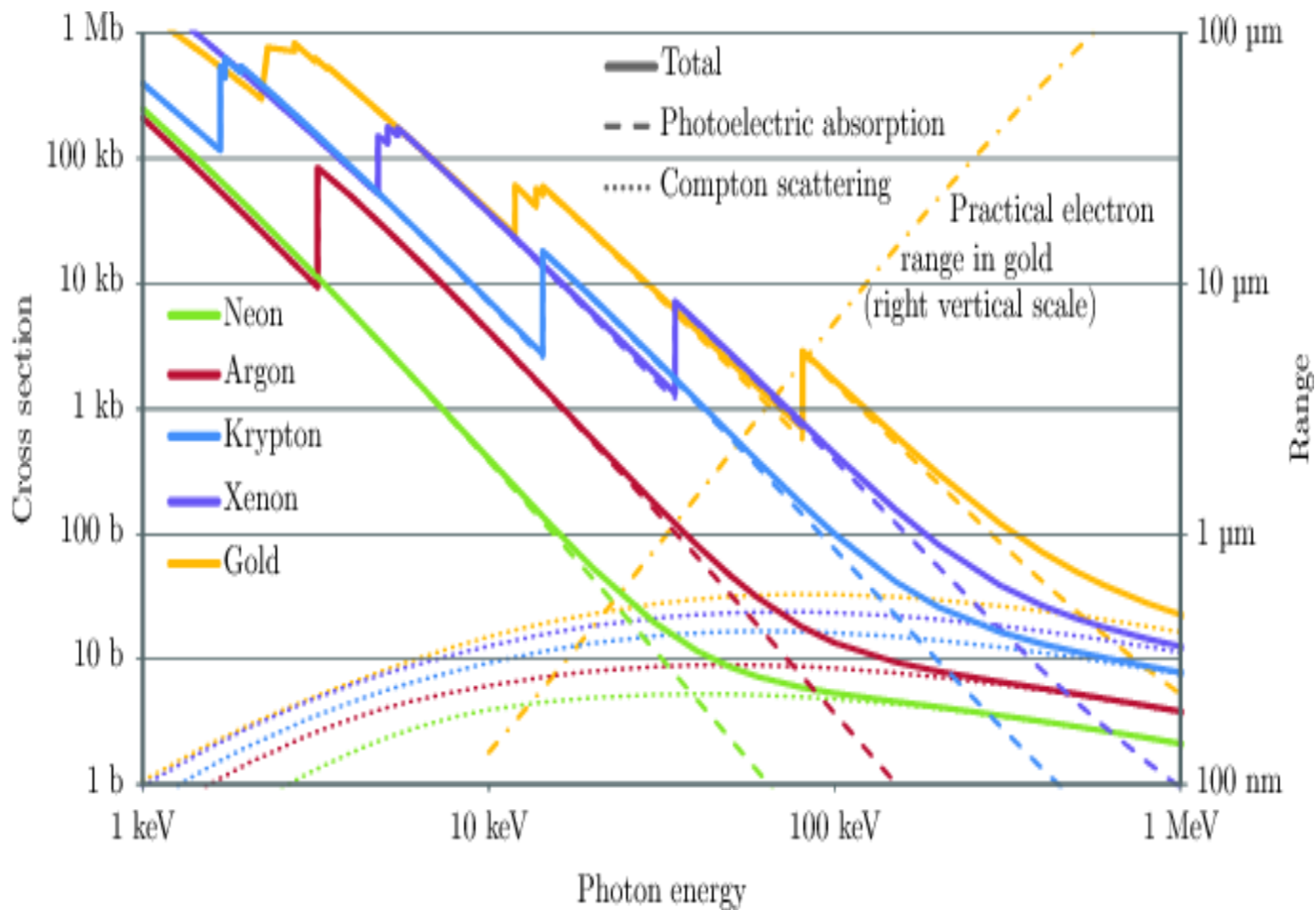


Синим показана зависимость для рэлеевского (когернтного) упругого рассеяния, когда энергия фотона мала по сравнению с массой электрона

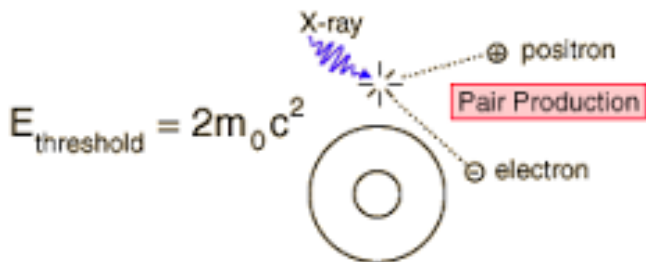
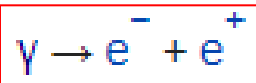
Угловые зависимости энергий рассеянного фотона и электрона отдачи при Комptonовском рассеянии гамма-квантов с энергией 500 кэВ



## Сравнение энергетической зависимости сечений фотоэффекта и Комптоновского рассеяния для разных сред



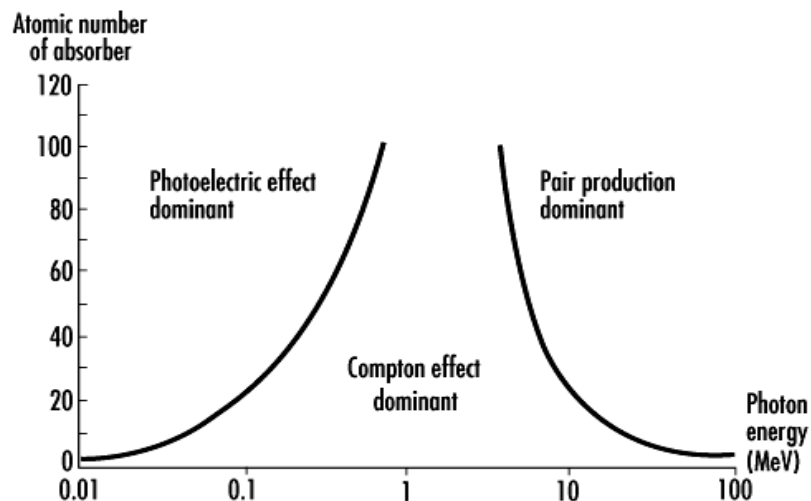
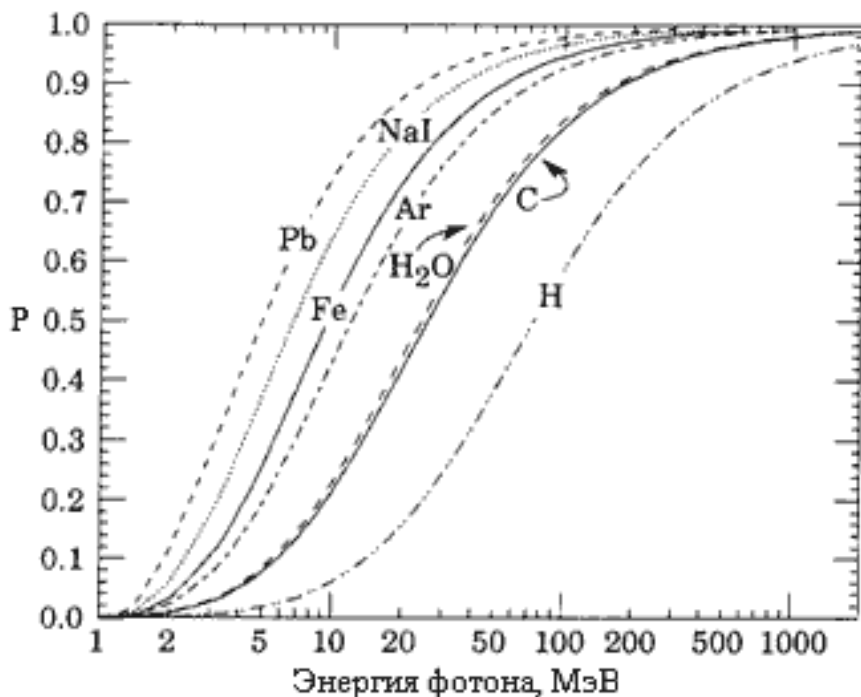
## 4. Рождение электрон-позитронных пар



$$p_\gamma = p_{e^-} + p_{e^+} + p_R$$

- Взаимодействие фотона с полем ядра
- Обратный процесс - аннигиляция
- Порог реакции 1.022 МэВ =  $2m_e$
- Сечение:  
резко растёт после порога  
сильно зависит от ат. номера  $\sim Z^2$

Вероятность образования фотоном электрон-позитронной пары



$$\sigma_p = \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left( \frac{28}{9} \ln \left( \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} \right) - \frac{218}{27} \right)$$

сечение образования электрон-позитронной пары в области энергий фотонов  $m_e c^2 \ll E_\gamma \ll m_e c^2 (137/Z_2)$

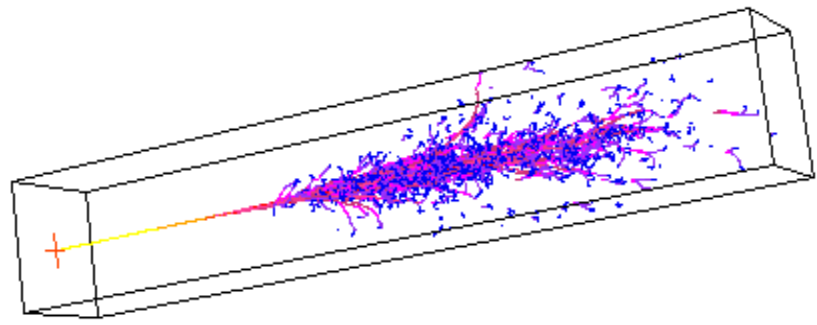
$$\gamma + e^- \rightarrow e^+ + e^- + e^-$$

Рождение пар от энергичных гамма-квантов в пузырьковой камере в магнитном поле

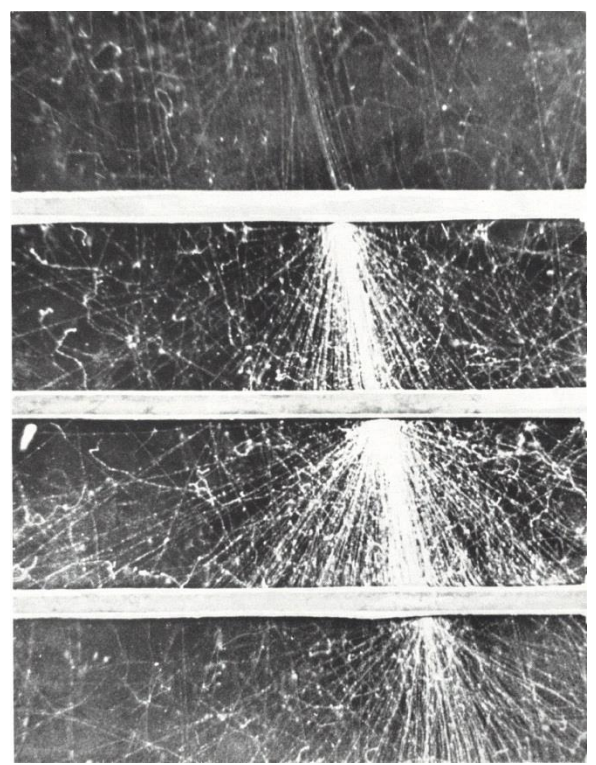


$$\gamma + \text{nucleus} \rightarrow e^+ + e^- + \text{nucleus}'$$

Монте-Карло симулирование электронного ливня в кристалле электромагнитного калориметра

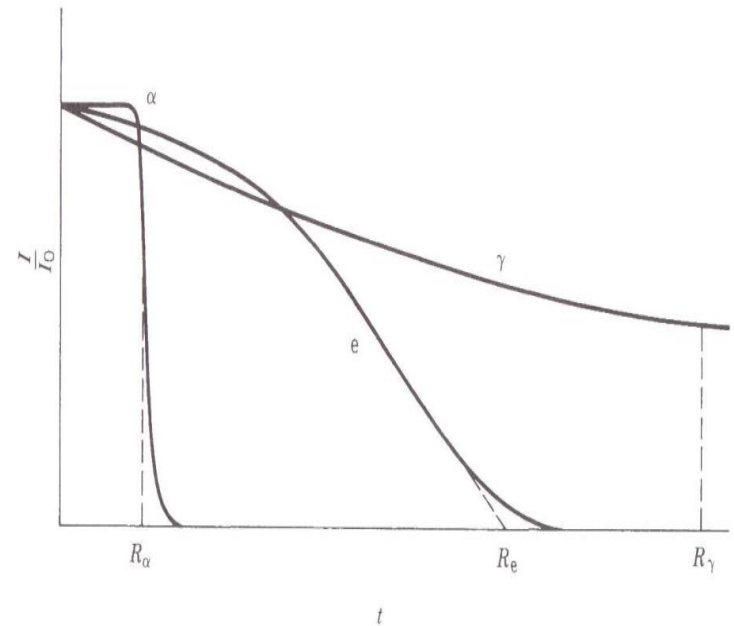
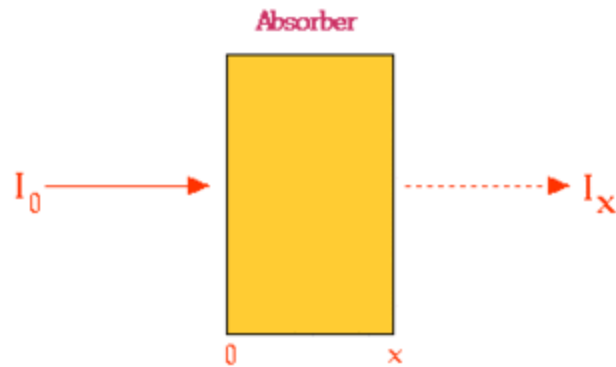


ЭМ-ливень в камере Вильсона со свинцовыми пластинами



ЭМ-ливень в атмосфере от энергичного гамма-кванта из КОСМОСА

## 5. Коэффициент поглощения



Уменьшение интенсивности  $I(x)$  моноэнергетичного коллимированного пучка гамма-квантов не слишком толстым слоем  $x$  однородного вещества происходит экспоненциально:

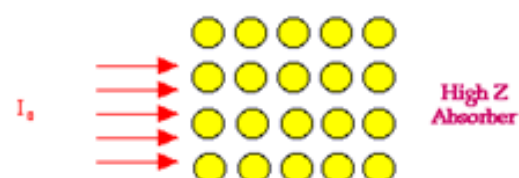
$$I(x) = I(0)e^{-n\sigma x} = I(0)e^{-\tau x}.$$

где  $n$  - концентрация атомов поглотителя. Величину  $\tau$  (она обычно выражается в  $\text{см}^{-1}$ ) называют **линейным коэффициентом поглощения**.

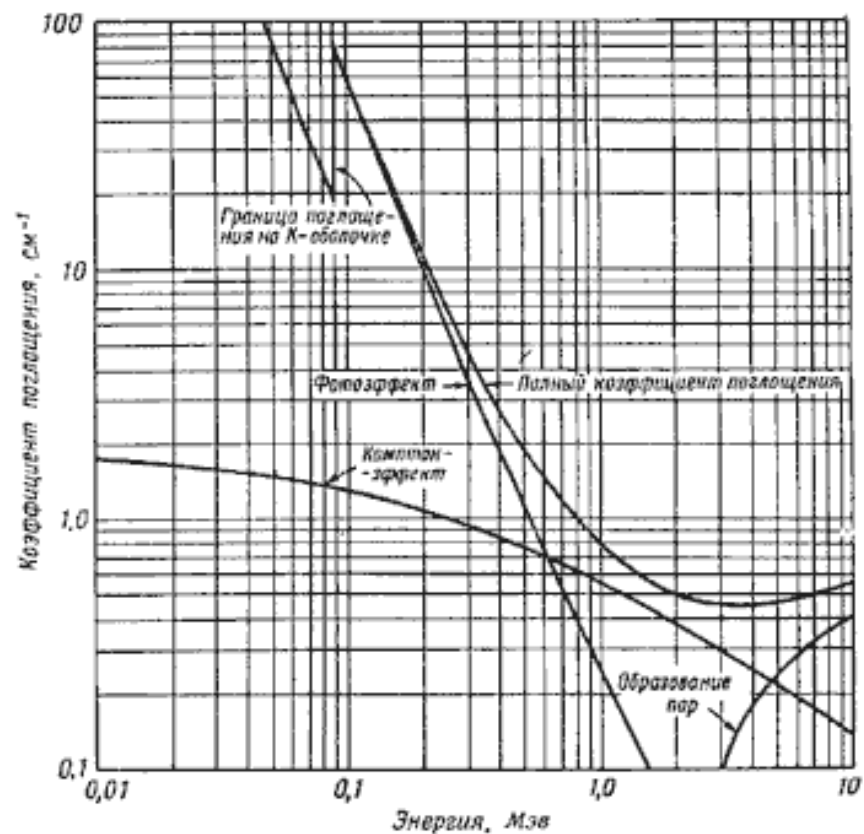
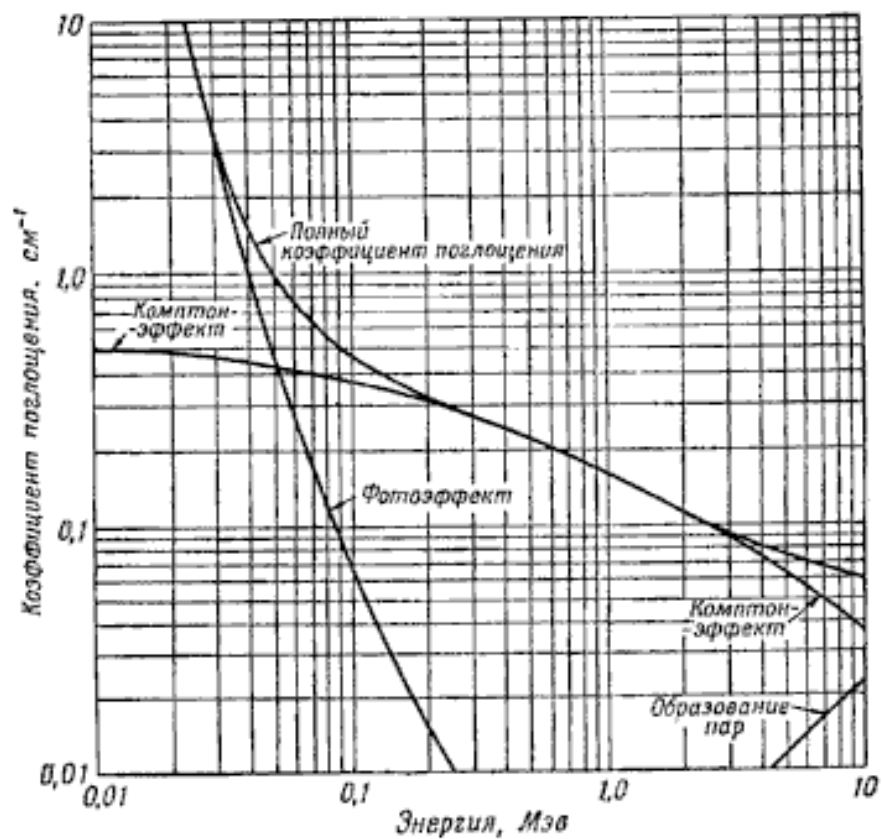
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{C}} + \sigma_{\text{p}}.$$

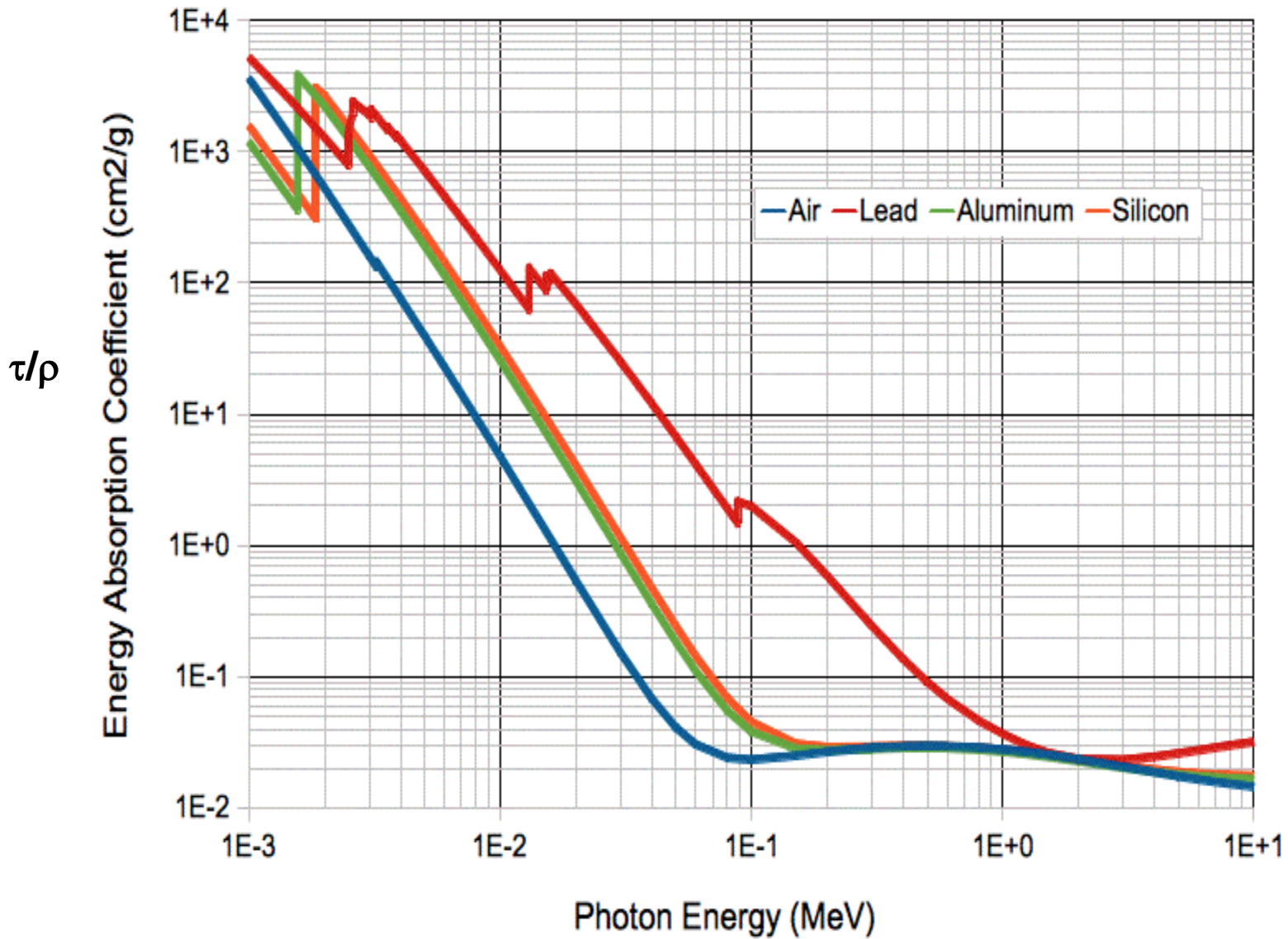


Алюминий



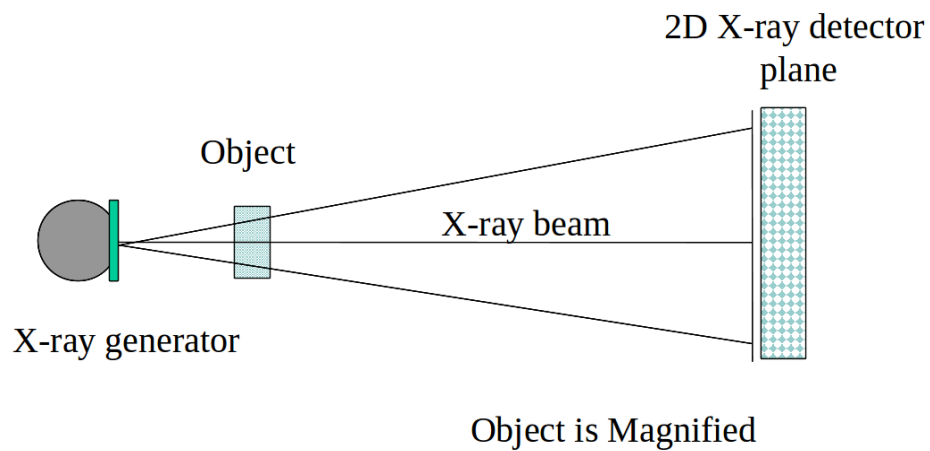
Свинец



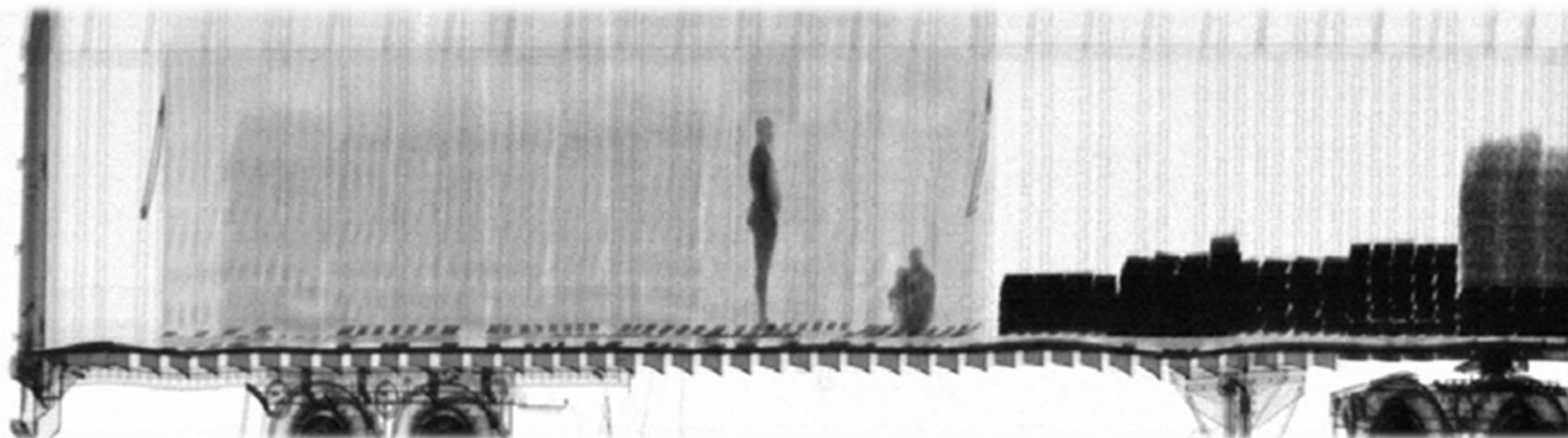
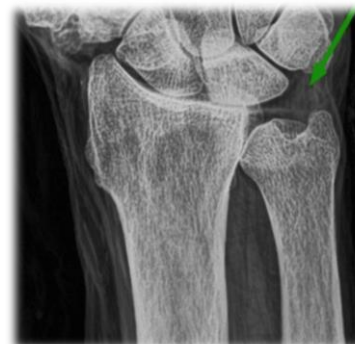
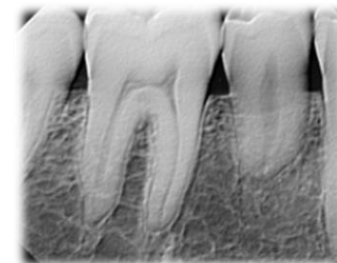


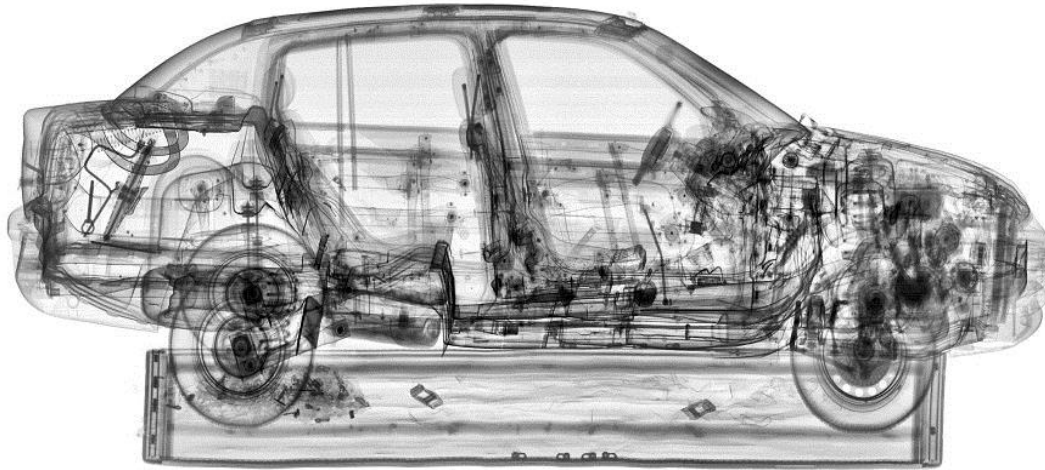
## 6. Примеры использования гамма-излучений

### Рентгеновская и гамма-радиография

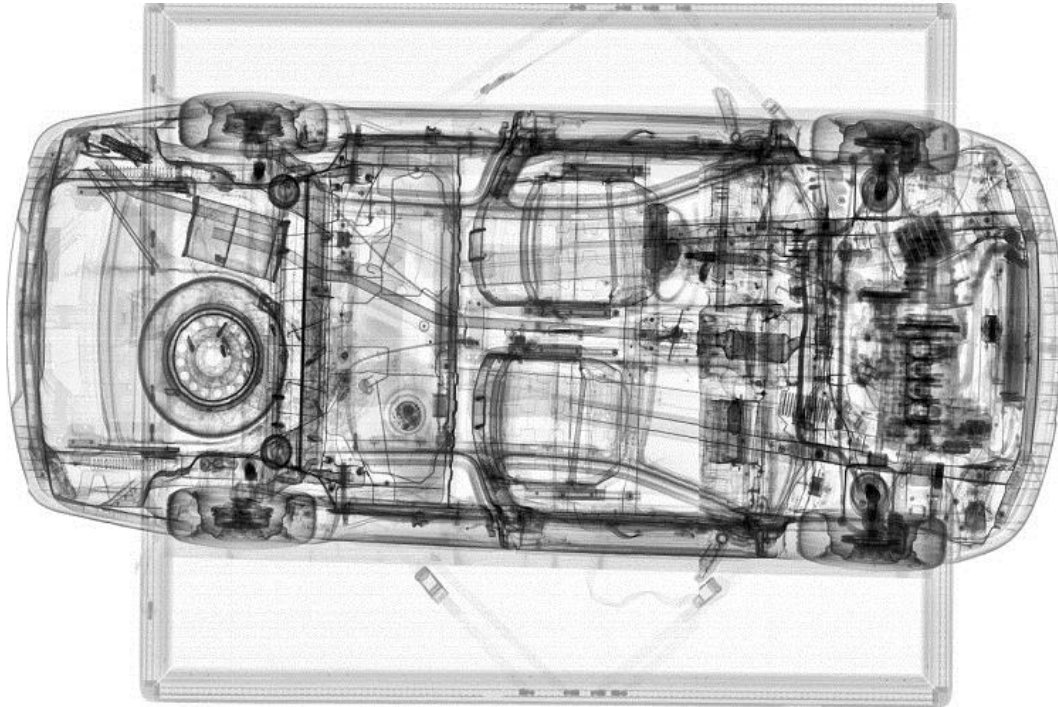


*Hand mit Ringen*



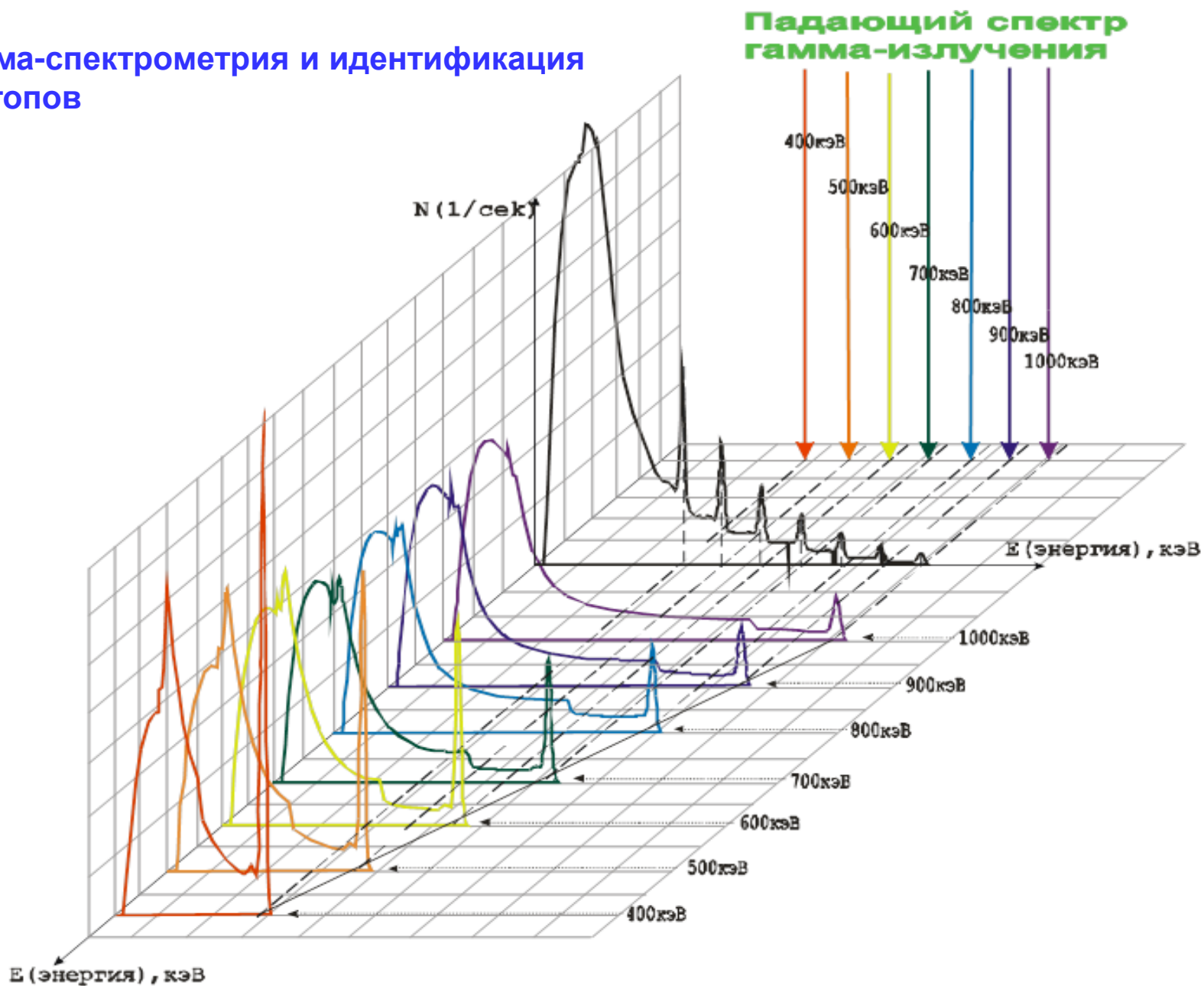


**L3 Communications, Security,  
And Detection Systems**



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

## Гамма-спектрометрия и идентификация ИЗОТОПОВ



## Гамма-телескоп «Ксения»

(орбитальная станция «Мир» с 1991 по 2000 год)



### Основные характеристики

Плотность ксенона	0.6 г/см <sup>3</sup>
Концентрация водорода	0.26 %
Плотность ксенона при 23° С	55 атм
Напряженность электрического поля	2.6 кВ/см
Максимальное время дрейфа электронов	15 мс
Энергетический диапазон	0.1÷5 МэВ
Чувствительный объем	1000 см <sup>3</sup>
Чувствительная площадь	100 см <sup>2</sup>
Энергетическое разрешение (662 кэВ)	3.5±0.25%
Энергетическое разрешение (1 МэВ)	(2.0±0.2)%
Эффективность по фотопику (662 кэВ)	(4.5±0.2)%
Эффективность по фотопику (1.33 МэВ)	(1.5±0.1)%
Потребляемая мощность	15 Вт
Масса	80 кг

# Портальные мониторы ядерных материалов (гамма-спектрометрия)

**TSA/LAURUS Systems**



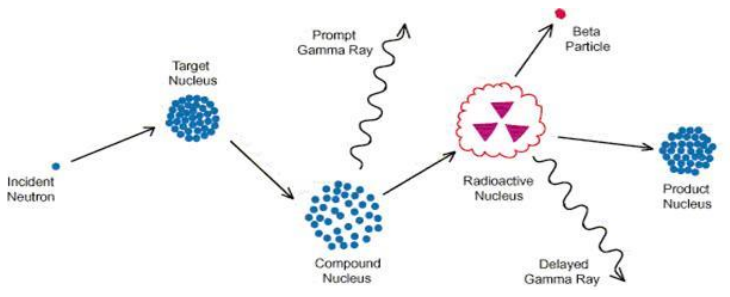
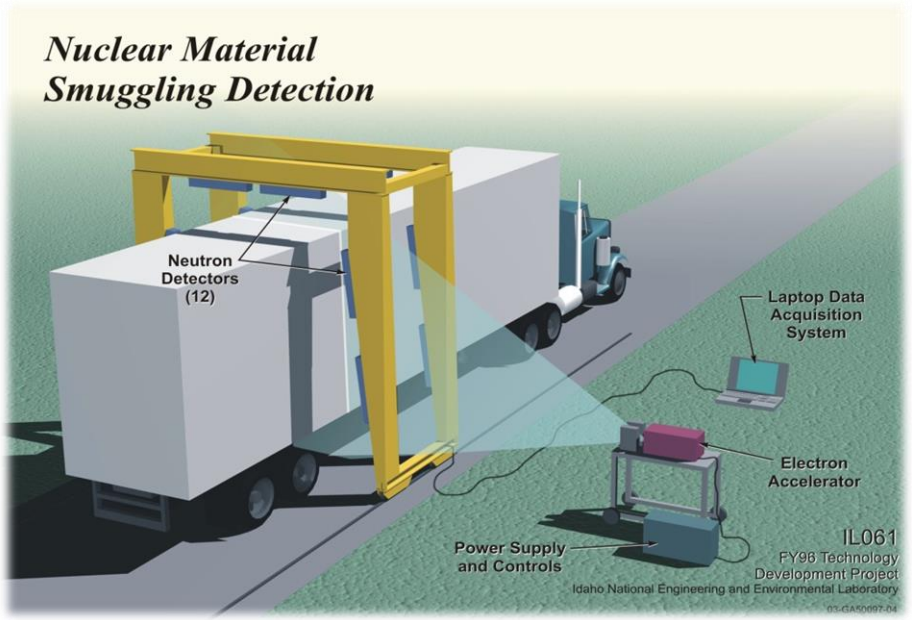
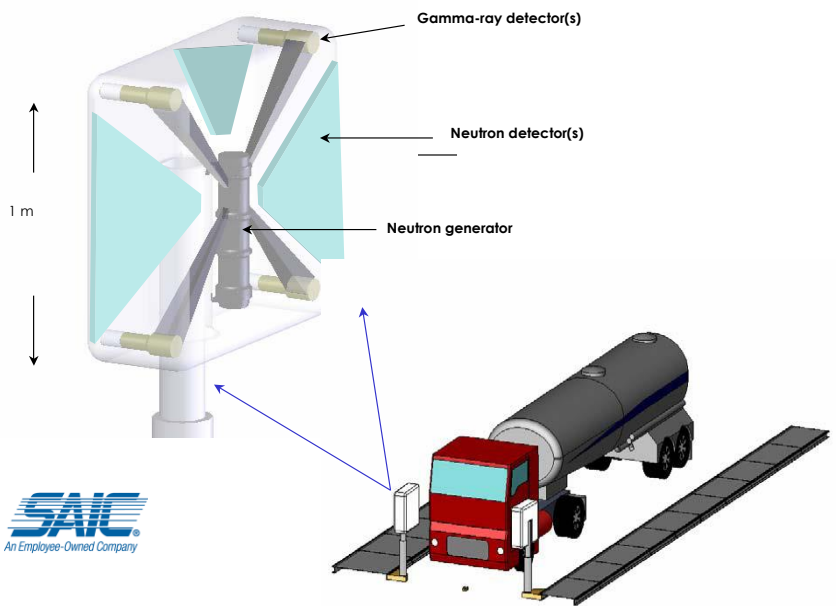
**LUNDLUM**



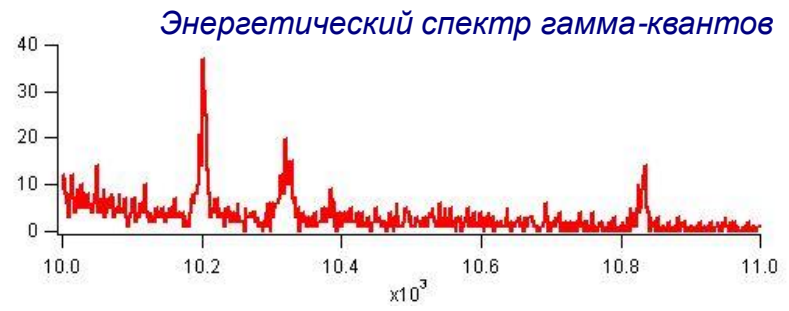
**Canberra**



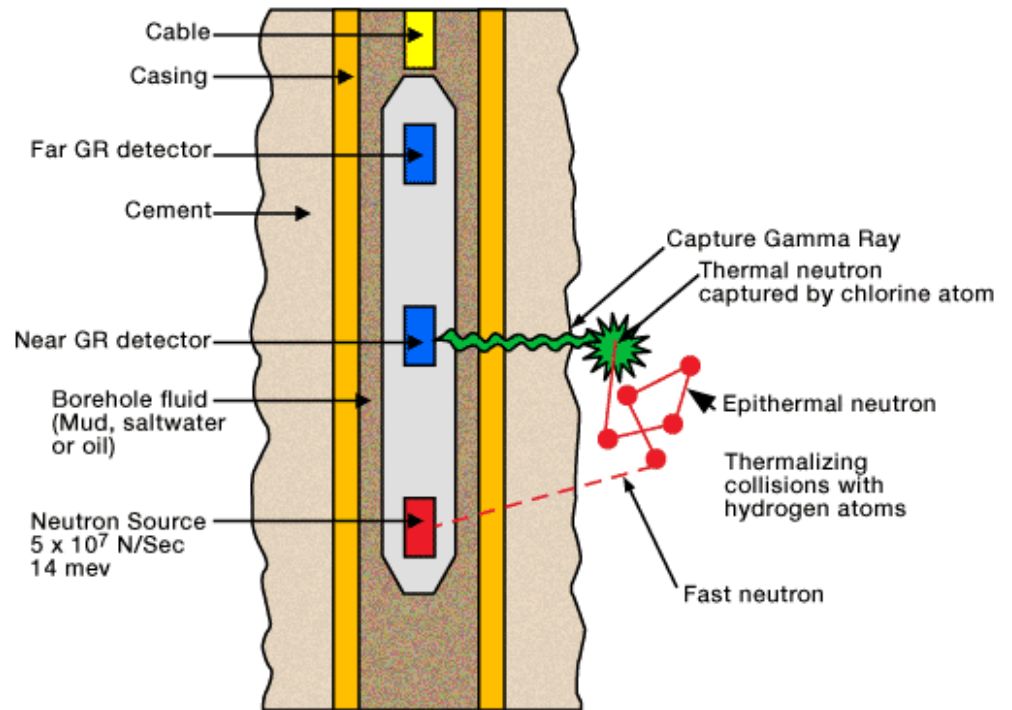
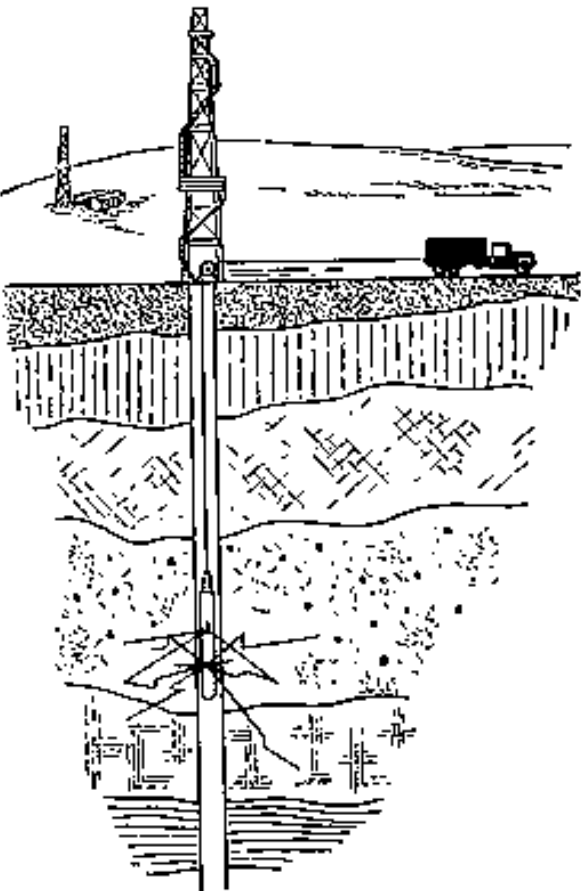
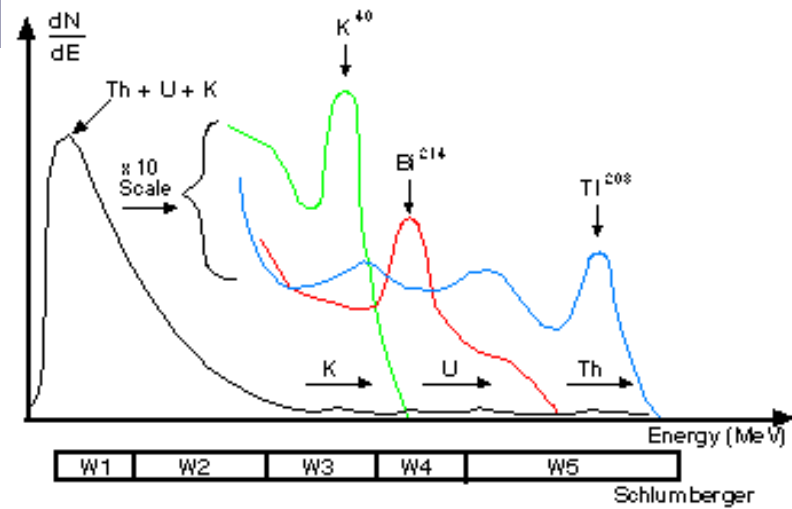
# Системы для идентификации химических взрывчатых веществ и ядерных материалов



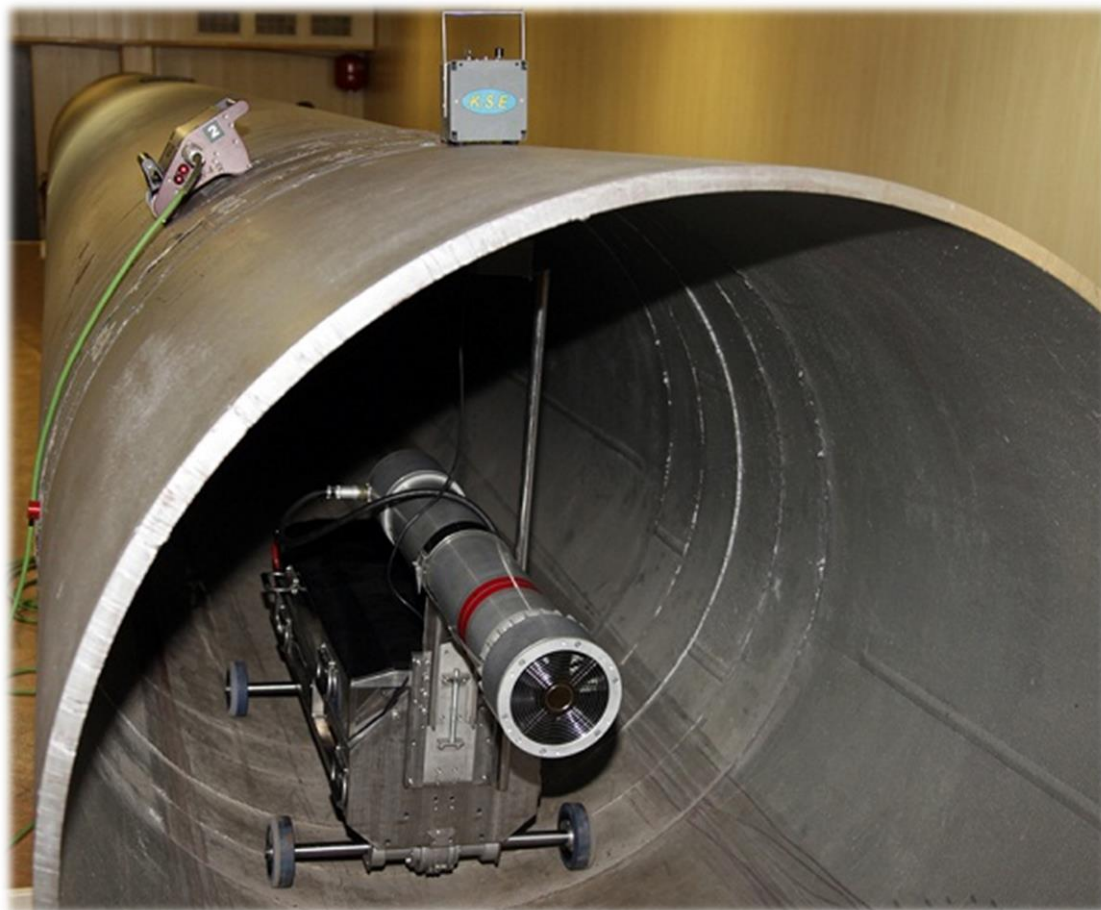
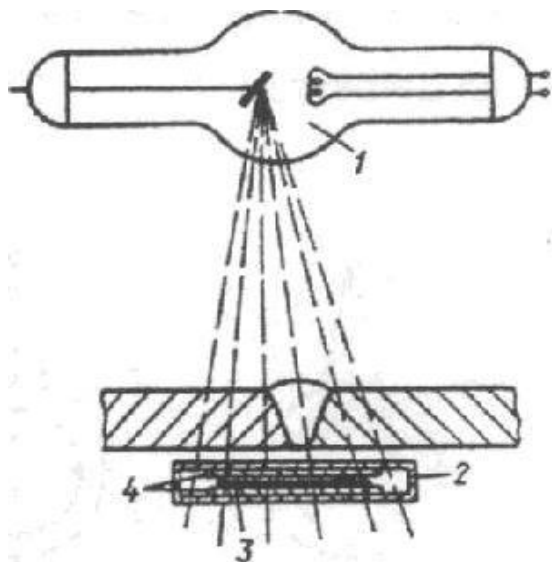
Нейтронно-активационный анализ



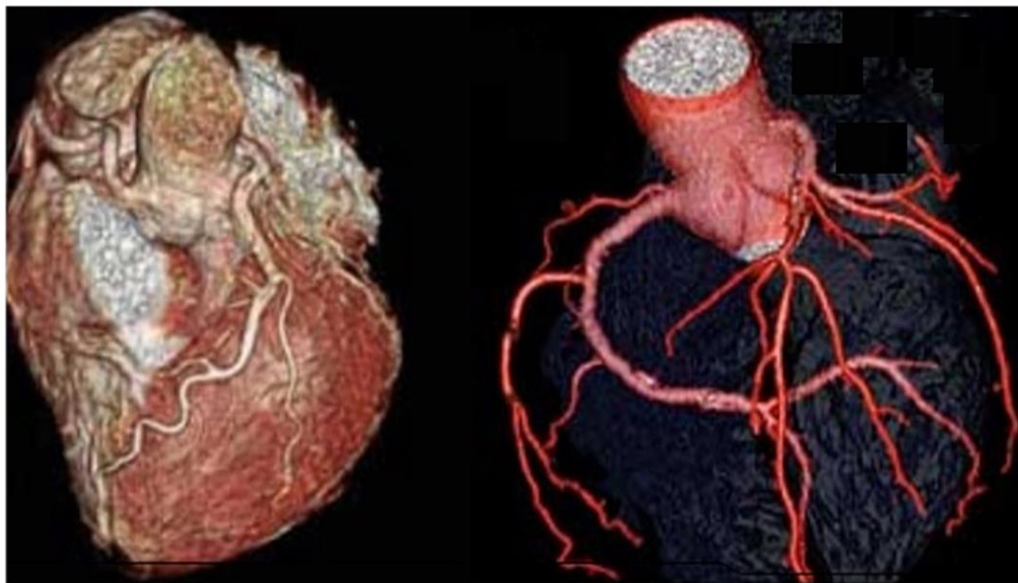
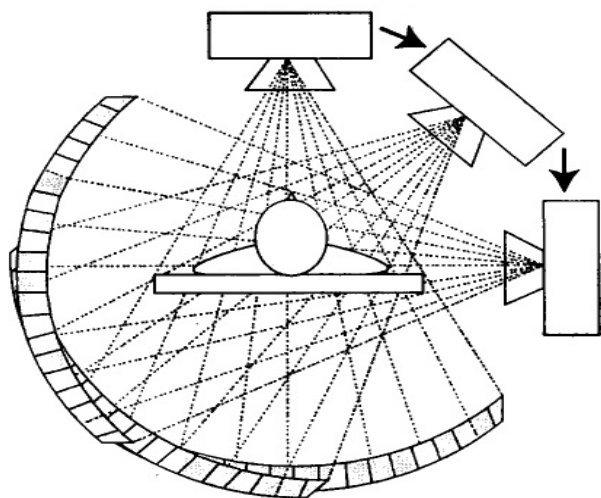
# Гамма-каротаж



## Дефектоскопия

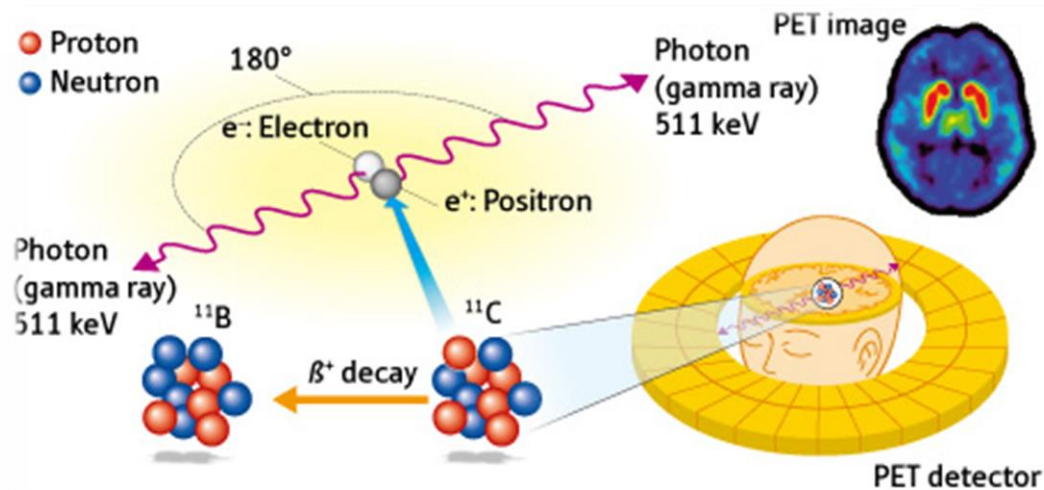


## Рентгеновская томография



## Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ)

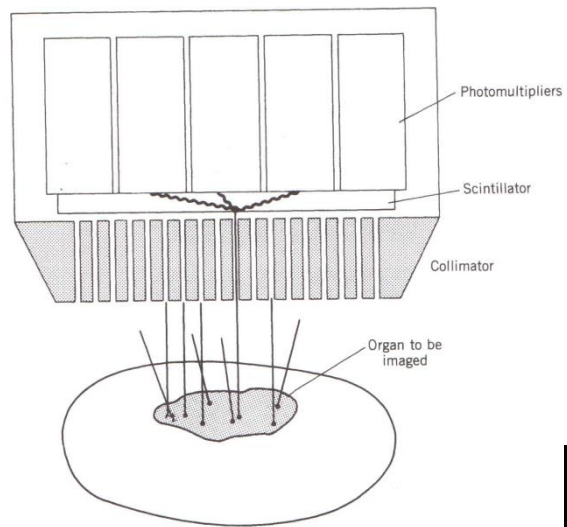
ПЭТ/КТ



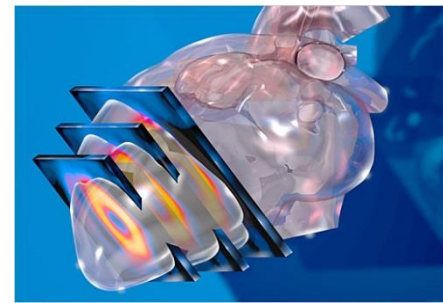
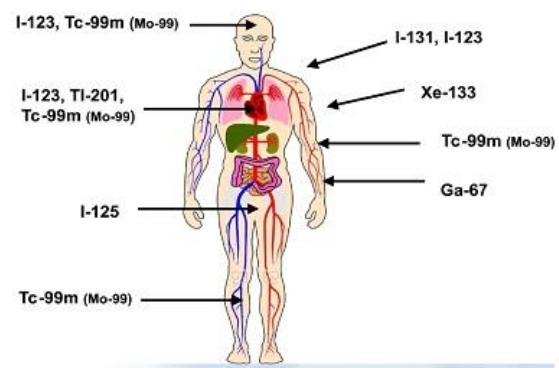
**Table 2.** Radio-isotopes used in PET

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

# Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

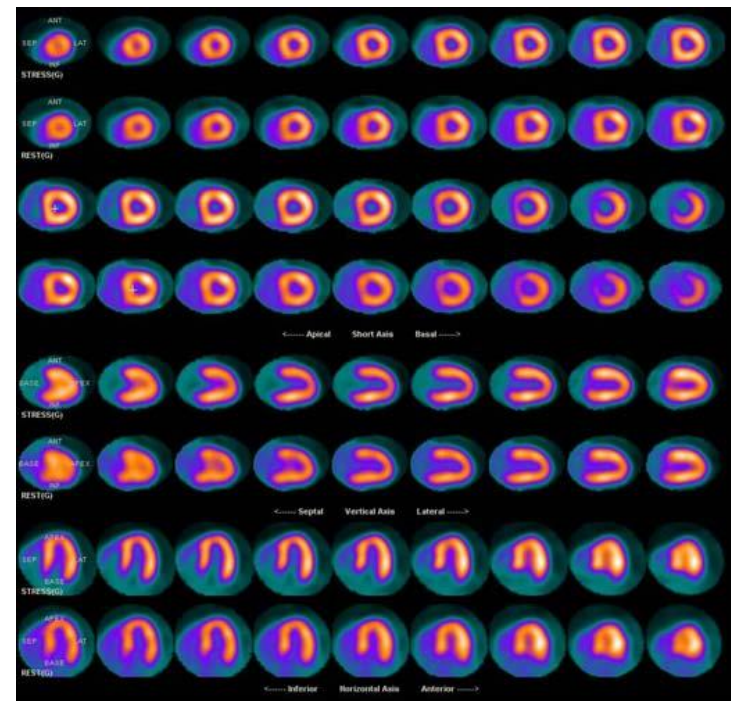
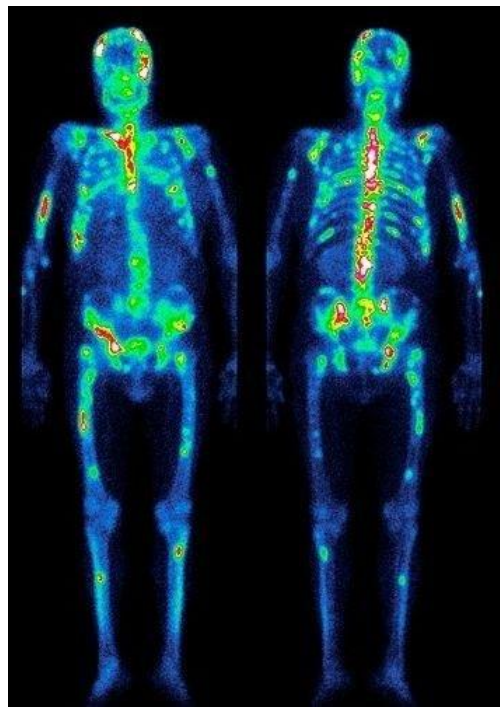


Гамма-камера



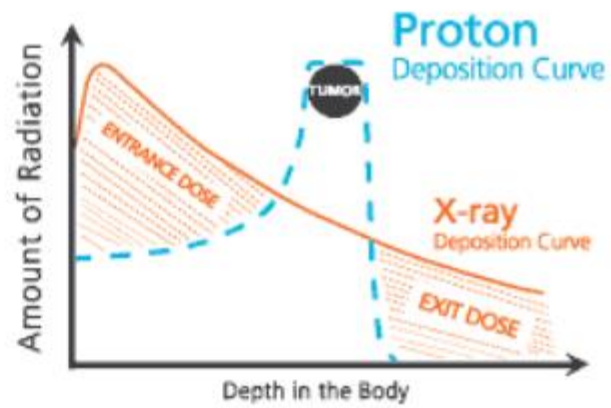
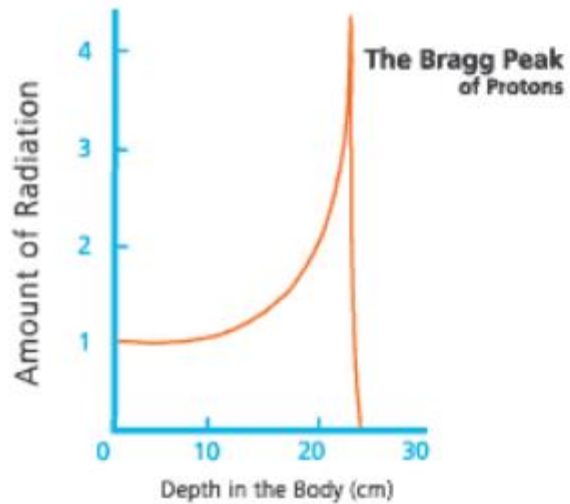
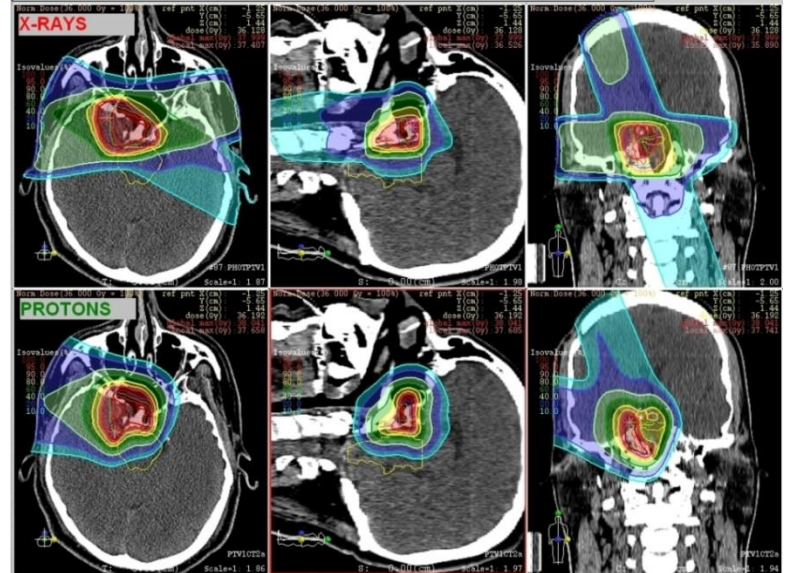
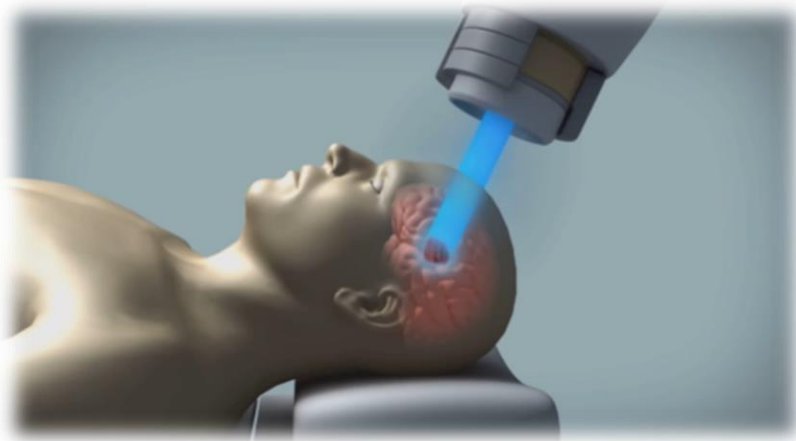
Кардиология

Онкология

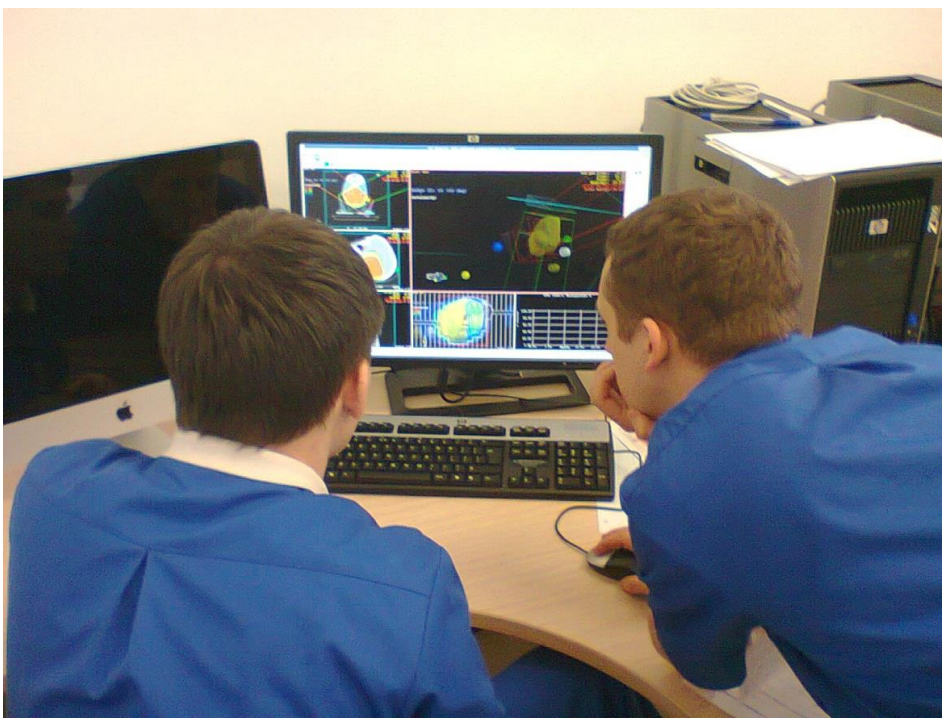


## Радиационная терапия

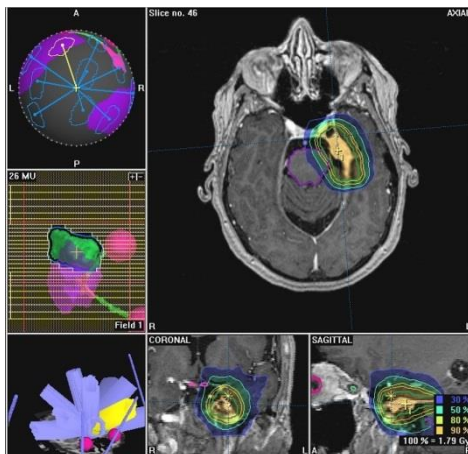




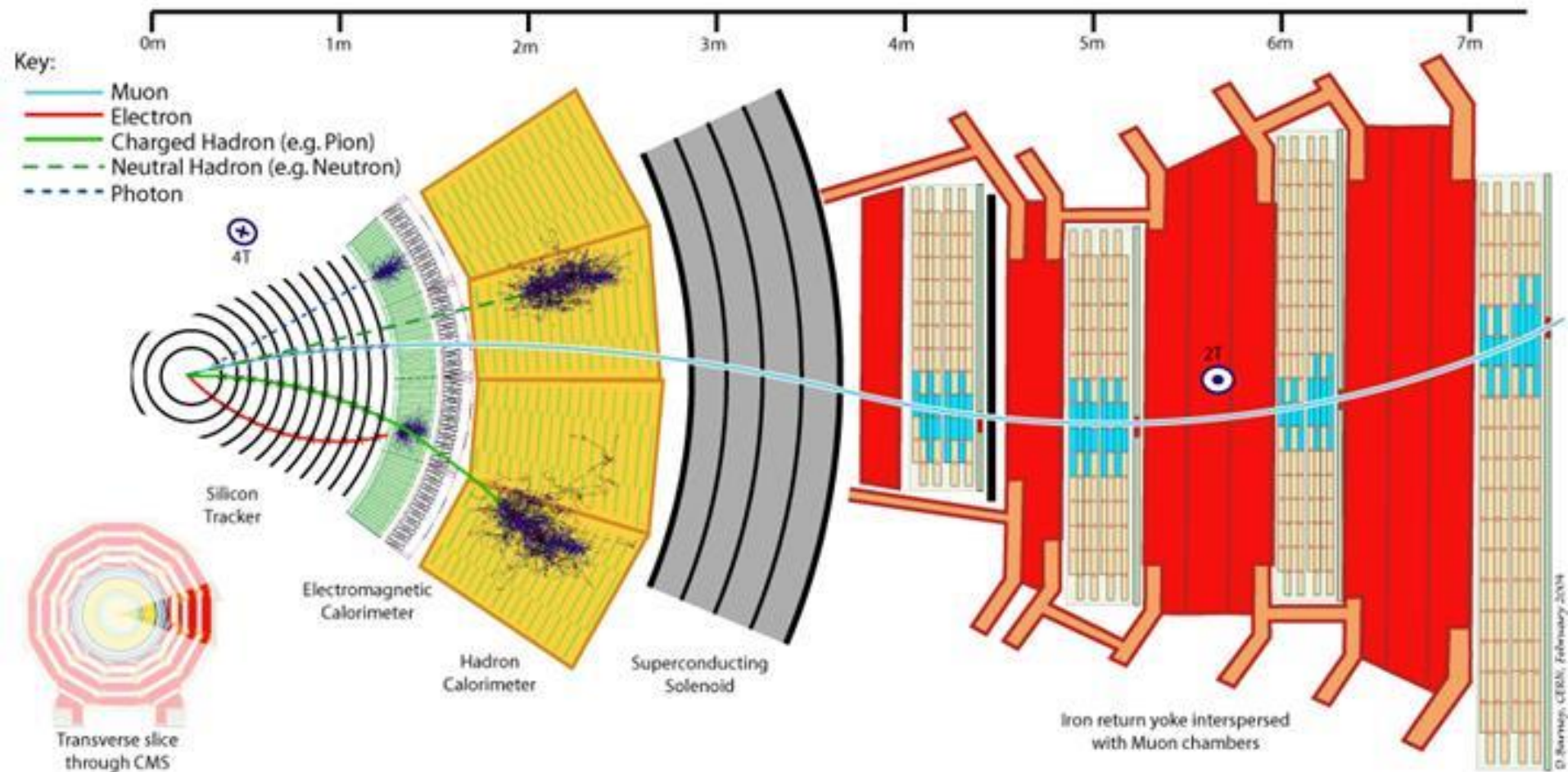
Выпускники МИФИ планируют лучевую терапию с помощью Кибер-Ножа в Центре детской онкологии и гематологии им. Дмитрия Рогачева

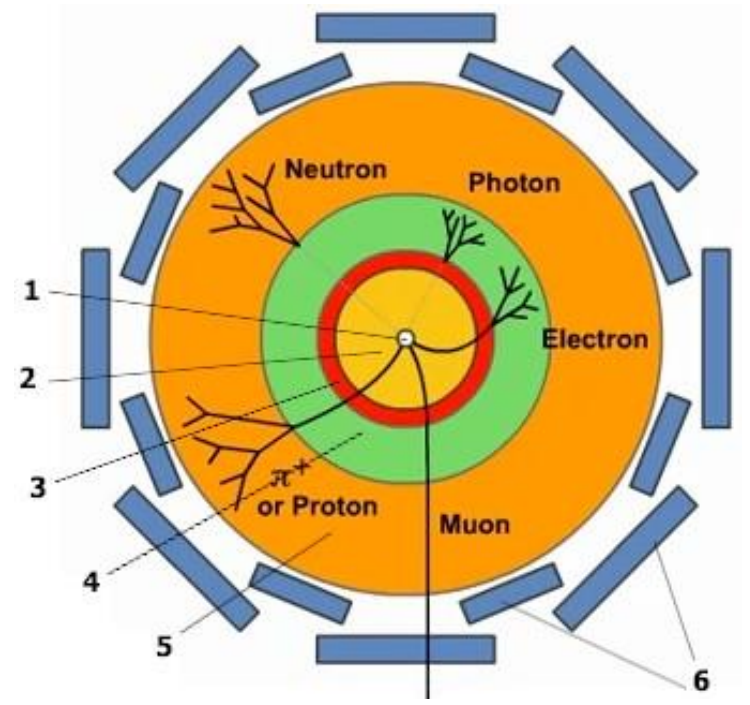
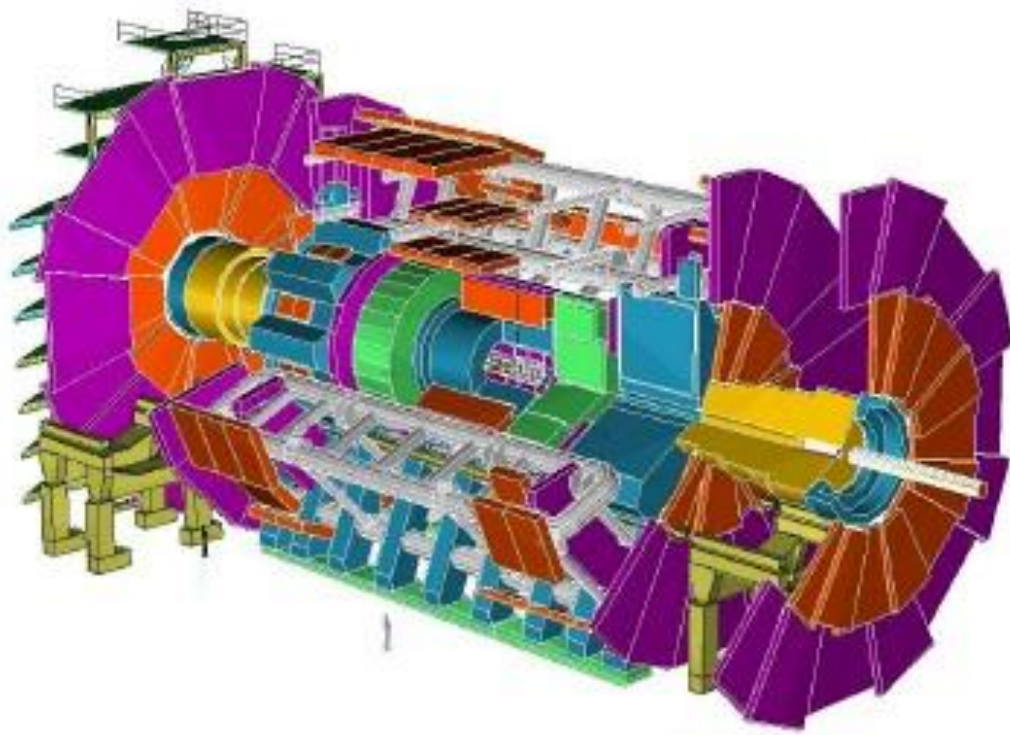


Программа планирования лучевой терапии XiO компании Elekta.

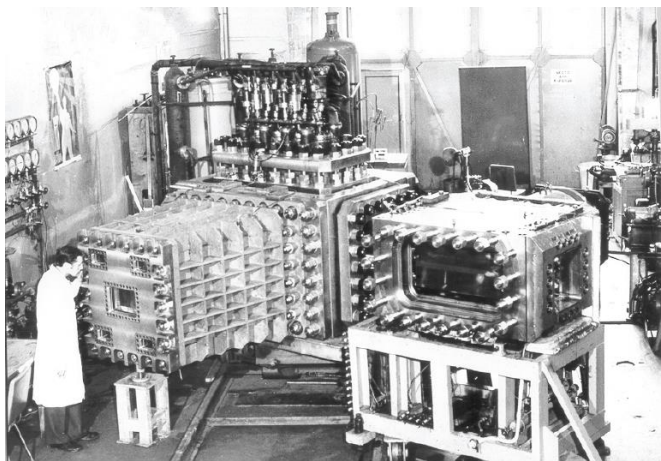


# Физика высоких энергий

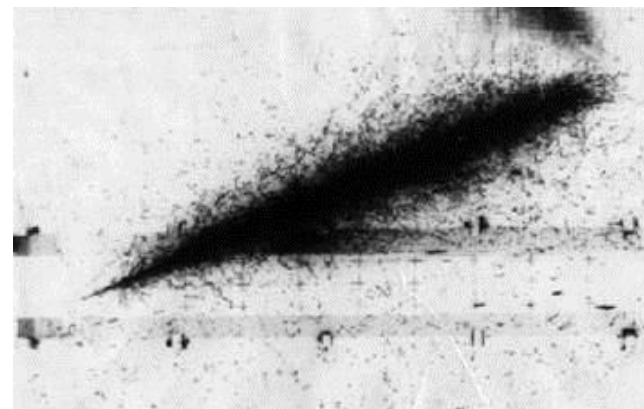




ATLAS

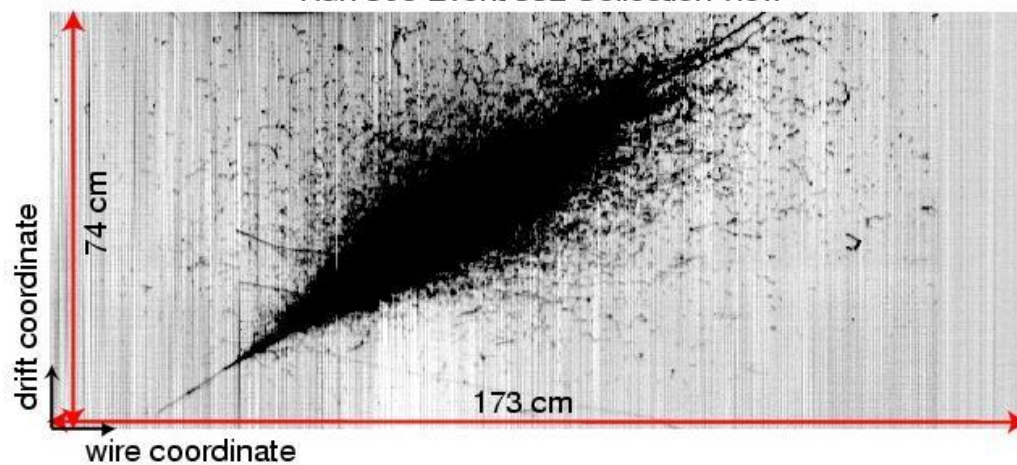


800-литровая жидкоксеронона камера ДИАНА



Фотография электромагнитного ливня в 180-литровой ксеронона камере ИТЭФа

Run 308 Event 332 Collection view



Electromagnetic shower observed in the ICARUS LAr drift chamber during the technical run with cosmic rays at Pavia, summer 2001

## ***Вместо Заключения:***

*« ... теория – это хорошая вещь, но правильный эксперимент остаётся навсегда»*

*П.Л.Капица*

## Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1
2. Взаимодействие частиц с веществом,  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm03.htm#3>
3. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава VIII, стр.446-453. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>
4. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 7, pp.198-204; <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .