



**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 №6

Взаимодействие гамма-квантов с веществом

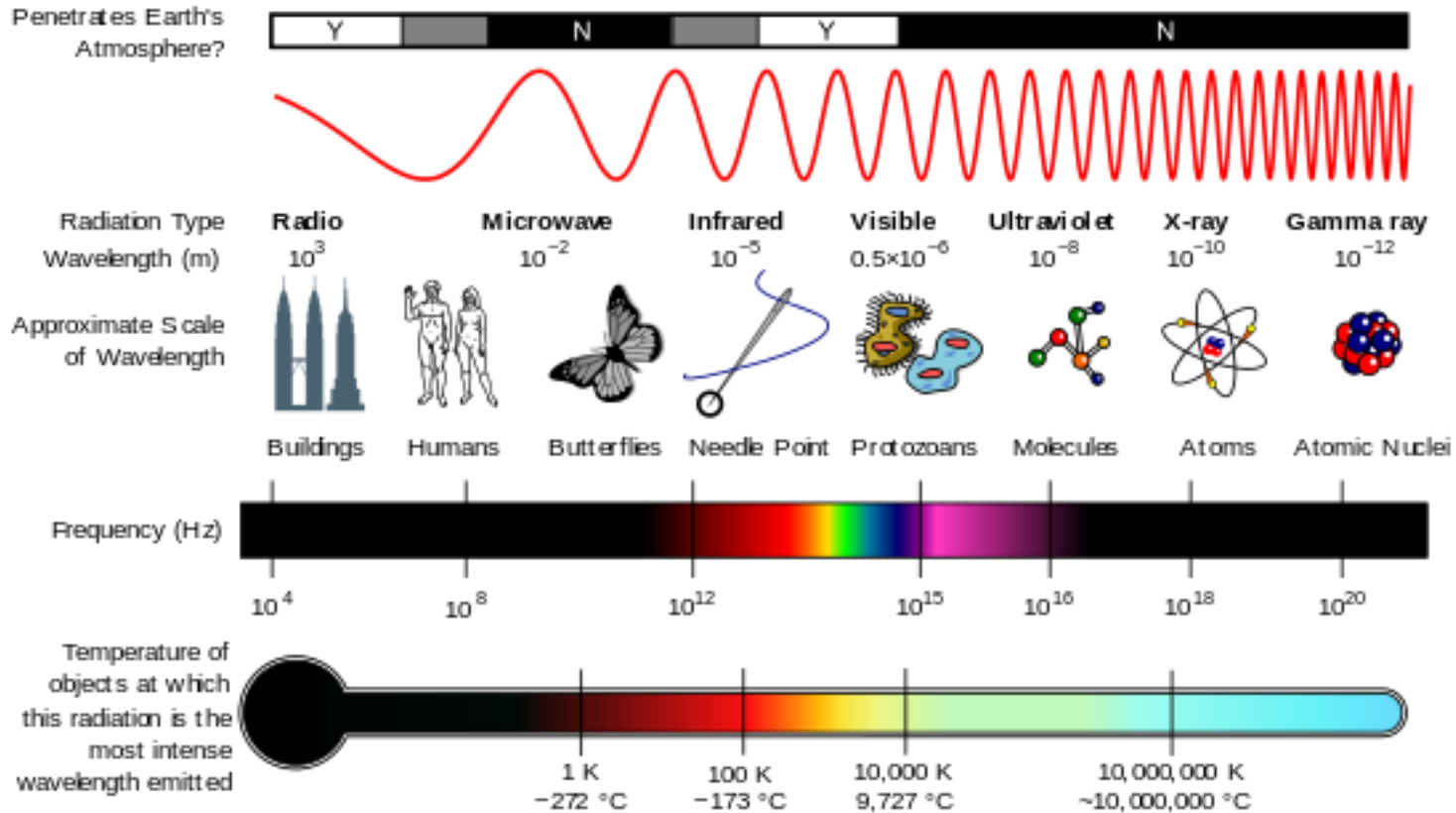
Лекция №6

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

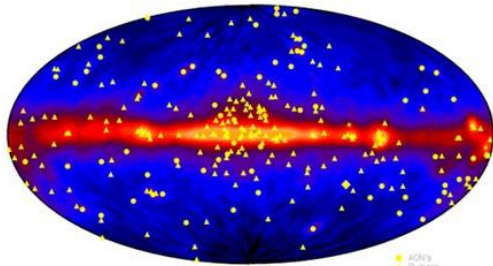
Место гамма-квантов в спектре электромагнитных излучений



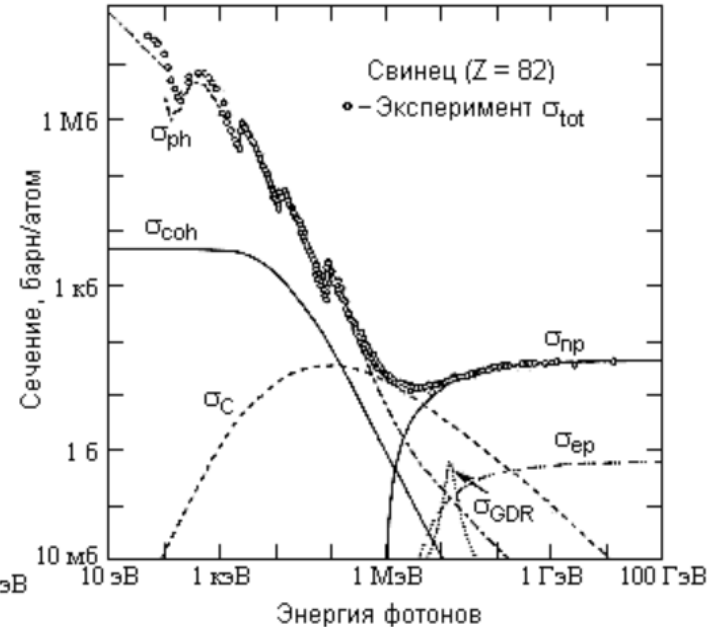
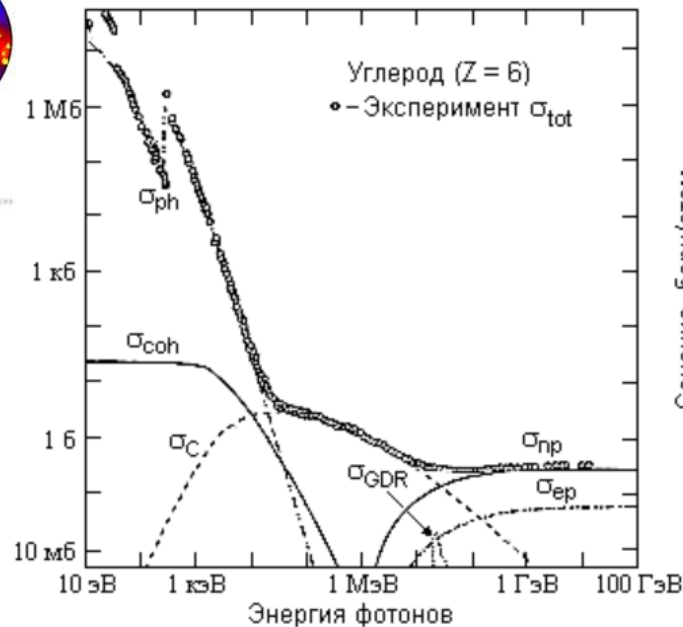
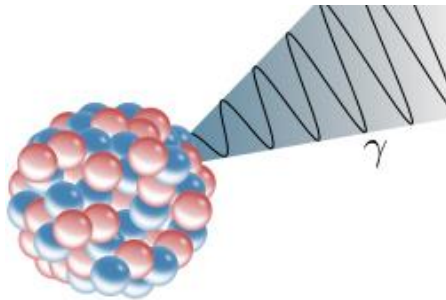
К гамма-излучению относят электромагнитные волны, длина которых значительно меньше межатомных расстояний

В области энергий гамма-квантов, излучаемых возбужденными ядрами при переходах в основное и низшие возбужденные состояния, т. е. при E_γ 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:

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



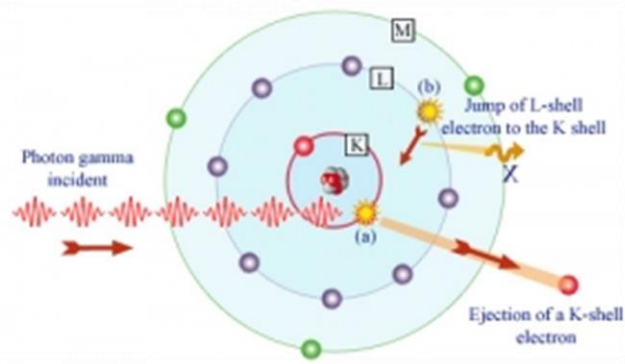
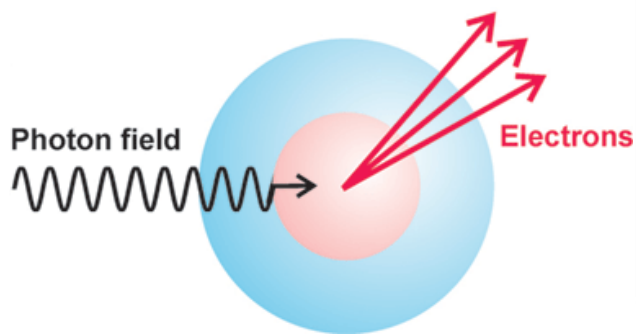
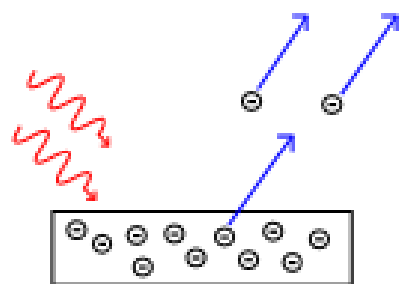
- AGN
- Pulsars
- Solar Flares
- Gamma (LMC)
- Unidentified Sources



Сечение взаимодействия фотонов с углеродом и свинцом :

σ_{ph} - сечение фотоэффекта, σ_{coh} - сечение релеевского рассеяния,
 σ_{C} - сечение комптоновского рассеяния, $\sigma_{\text{нр}}$ - сечение рождения пары в поле ядра, $\sigma_{\text{ер}}$ - сечение образования пар в поле атомных электронов, σ_{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)

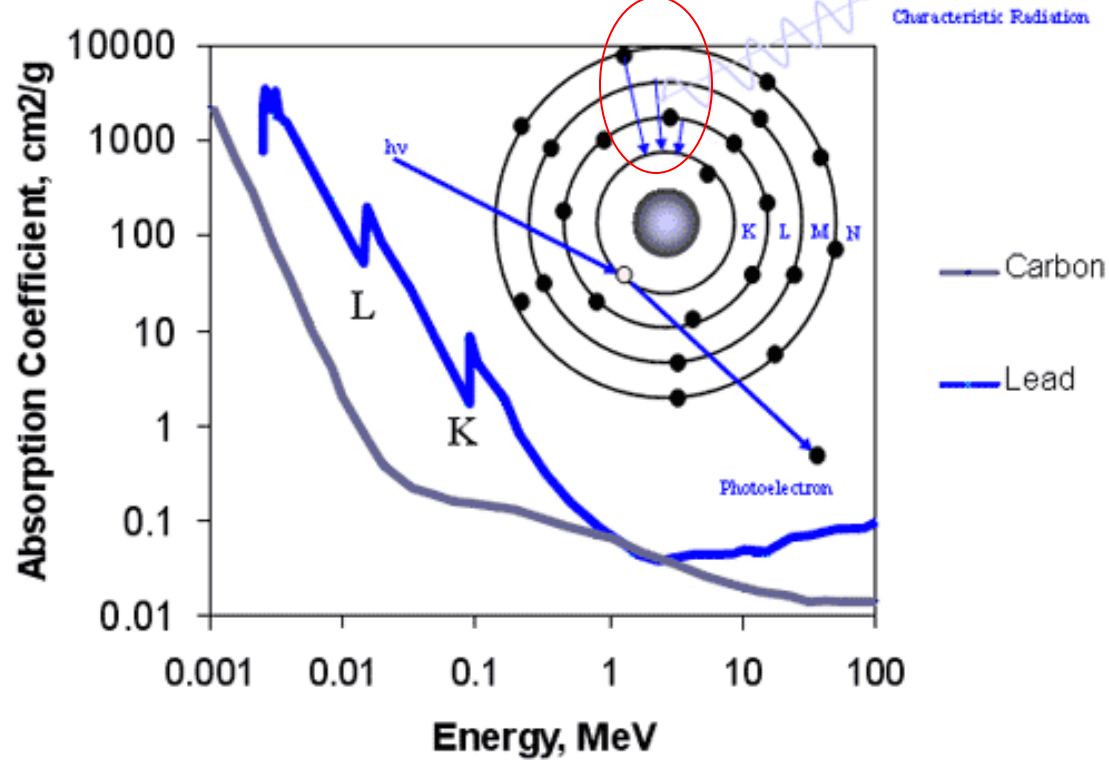
Если энергия γ -кванта больше энергии связи электрона оболочки атома, происходит фотоэффект. Это явление состоит в том, что фотон целиком поглощается атомом, а один из электронов атомной оболочки выбрасывается за пределы атома. Используя закон сохранения энергии, можно определить кинетическую энергию 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_γ – 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**

Используется для
идентификации материалов



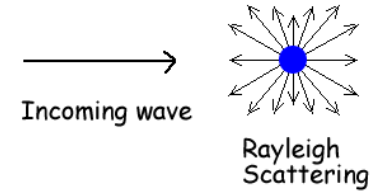
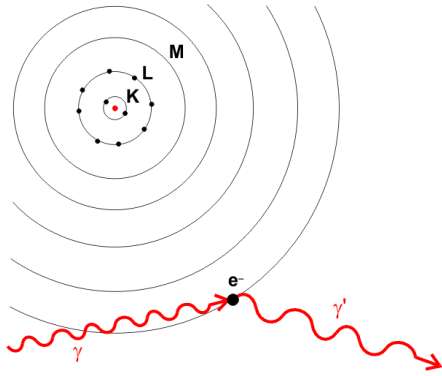
Вероятность фотопоглощения в среде $\sim Z^N/E^{3.5}$

Z – заряд ядра (атомный номер)

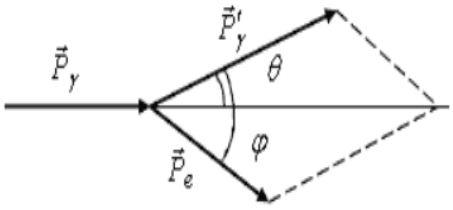
$N = 4-5$

E – энергия гамма-кванта

3. Эффект Комптона



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



$$E' = \frac{E}{1 + \left(\frac{E}{m_0c^2}\right)(1 - \cos\theta)}$$

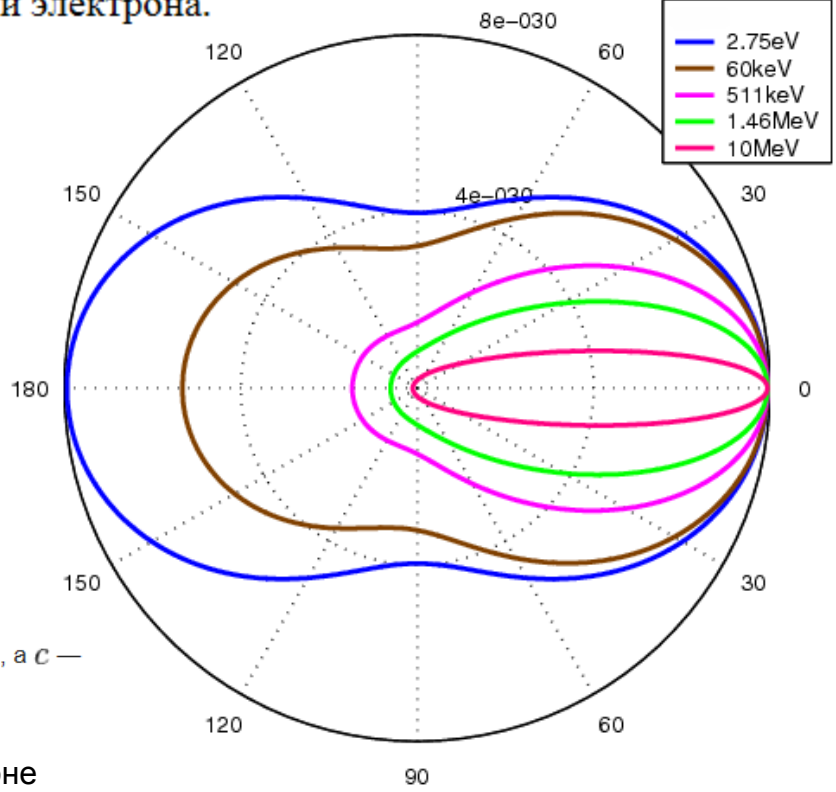
$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}_e, \quad m_0c^2 + E_\gamma = E'_\gamma + E_e$$

$$\Delta\lambda = 2\lambda_0 \sin^2(\theta/2), \quad \lambda_0 = h/m_0c, \quad \lambda_0 = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ М}$$

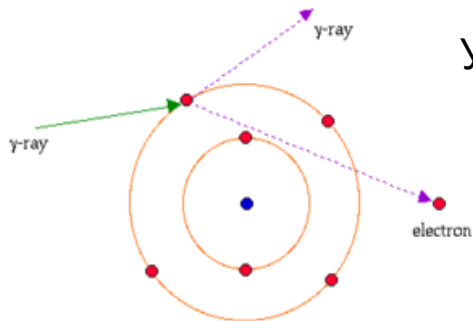
где λ_0 — комптоновская длина волны электрона, θ — угол между направлением падающей и рассеянной волнами, h — постоянная Планка, m_0 — масса электрона, а c — скорость света.

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

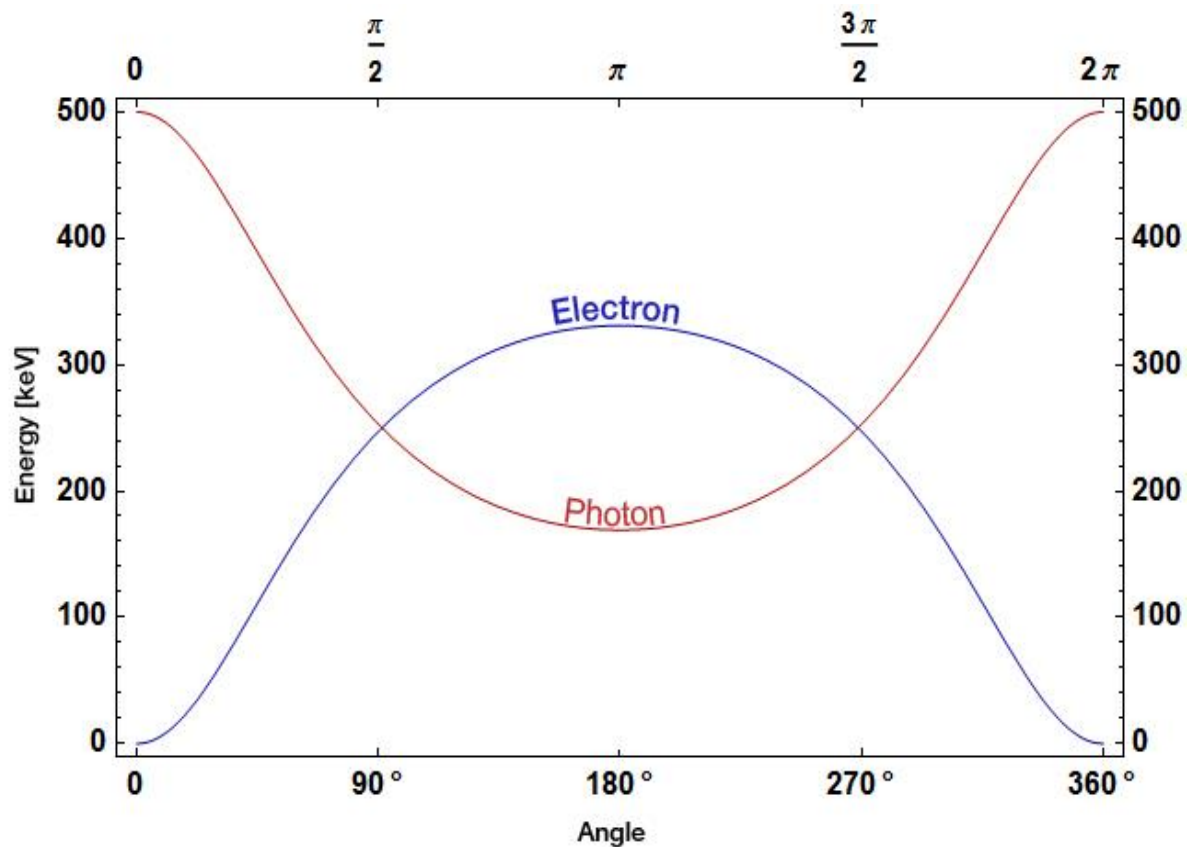
$$\sigma_k = \pi r_0^2 \frac{m_0c^2}{\hbar\omega} \left(\ln \frac{2\hbar\omega}{m_0c^2} + \frac{1}{2} \right)$$



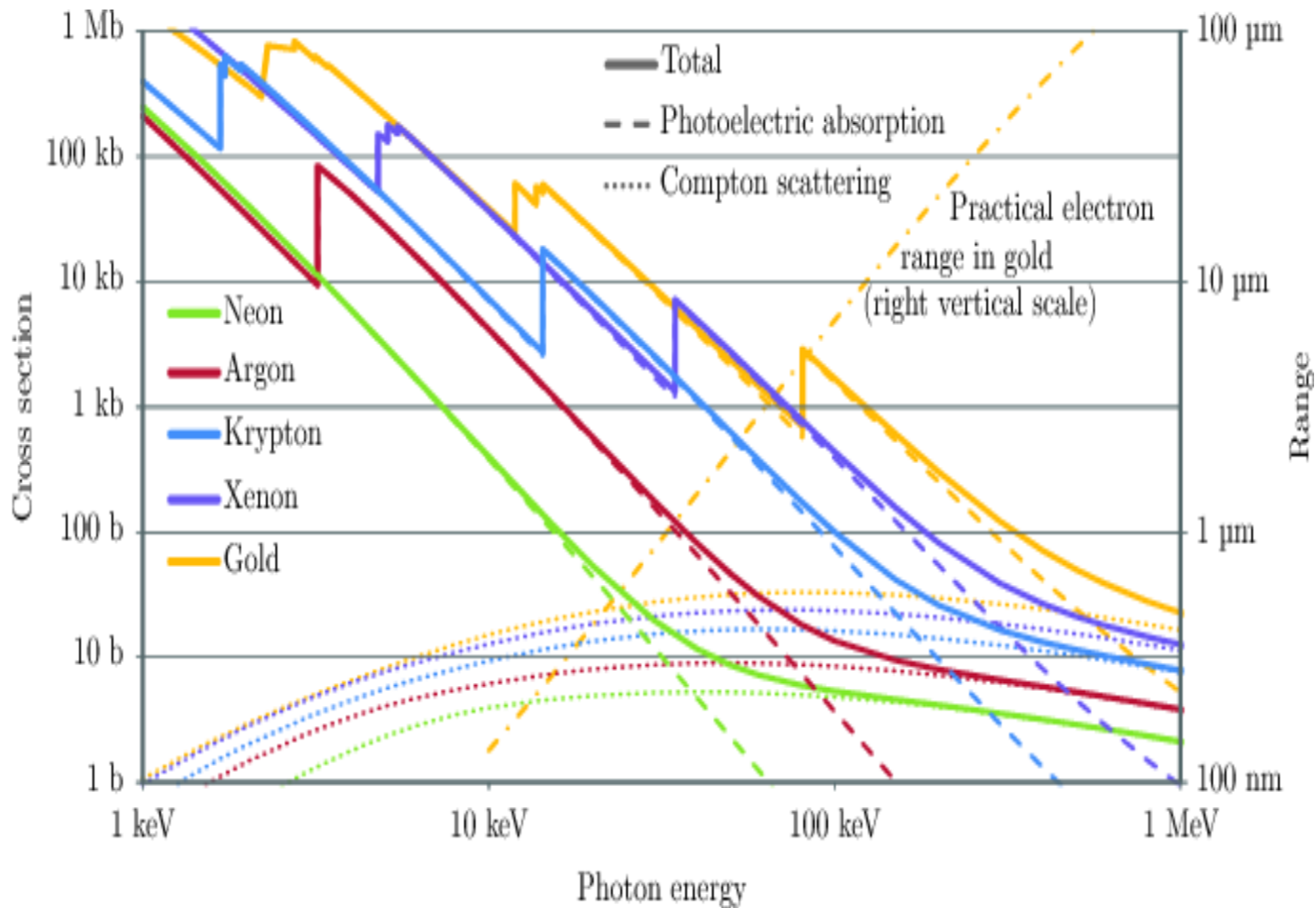
Синим показана угловая зависимость для томсоновского (рэлеевского) упругого рассеяния, т.е. для случая, когда энергия фотона мала по сравнению с массой электрона



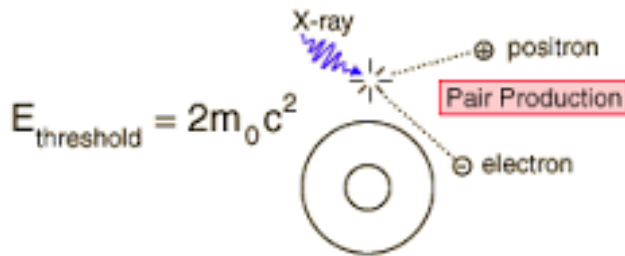
Угловые зависимости энергий рассеянного фотона и электрона отдачи при Комптоновском рассеянии гамма-квантов с энергией 500 кэВ



Сравнение энергетической зависимости сечений фотоэффекта и Комптоновского рассеяния для разных сред



4. Рождение электрон-позитронных пар

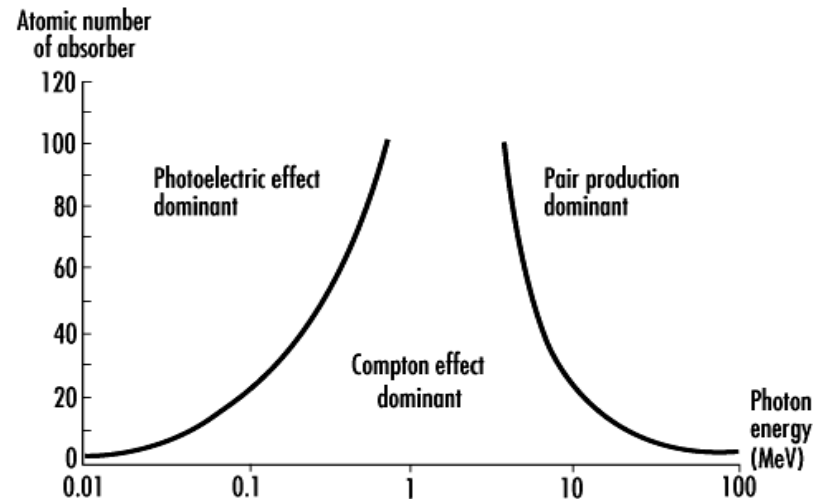
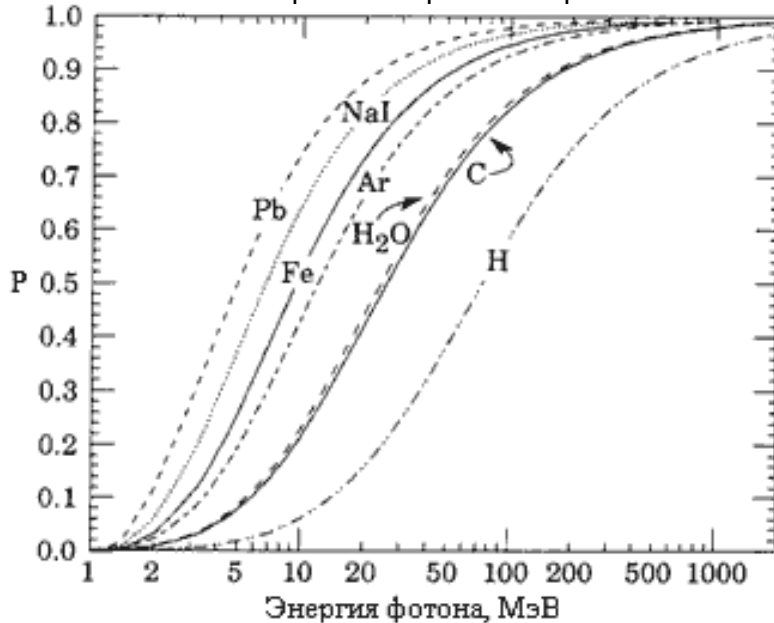


$$p_\gamma = p_{e^-} + p_{e^+} + p_R$$

- Взаимодействие фотона с полем ядра
- Обратный процесс - аннигиляция
- Порог реакции 1.022 МэВ = $2 m_e$
- Сечение:

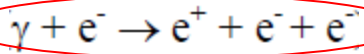
резко растёт после порога
сильно зависит от ат номера $\sim Z^2$

Вероятность образования фотоном электрон-позитронной пары

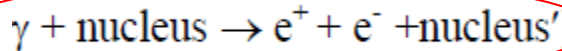
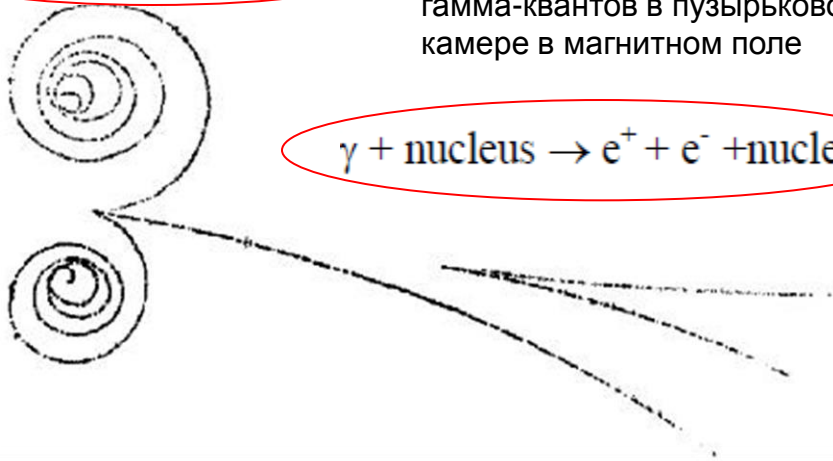


$$\sigma_p = \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left(\frac{28}{9} \ln \left(\frac{2E_\gamma}{m_e c^2} \right) - \frac{218}{27} \right)$$

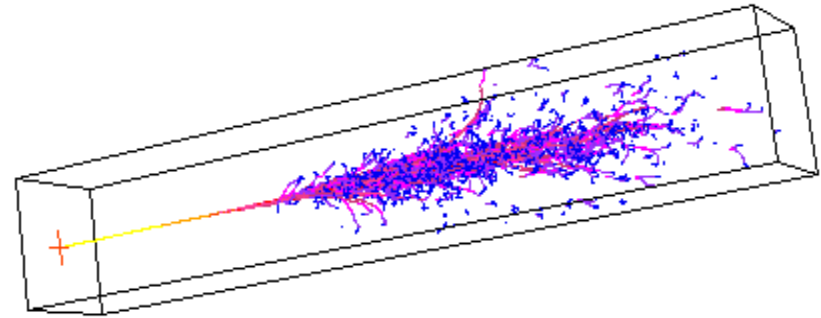
сечение образования электрон-позитронной пары в области энергий фотонов $m_e c^2 \ll E_\gamma \ll m_e c^2 (137/Z_2)$



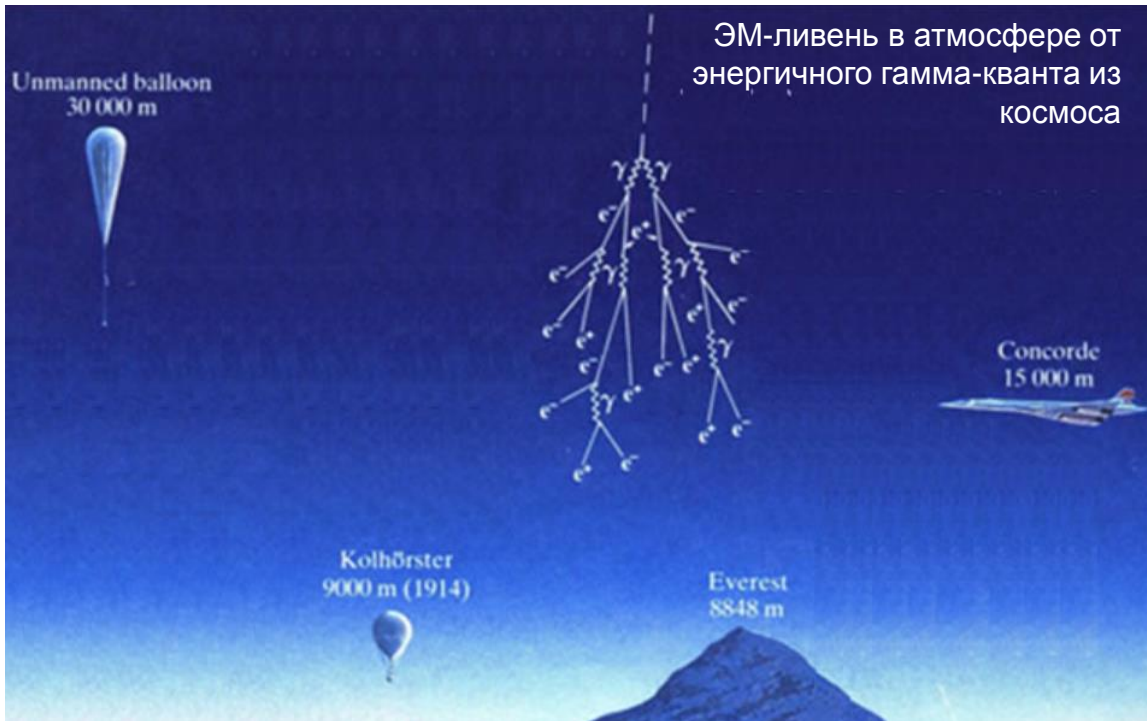
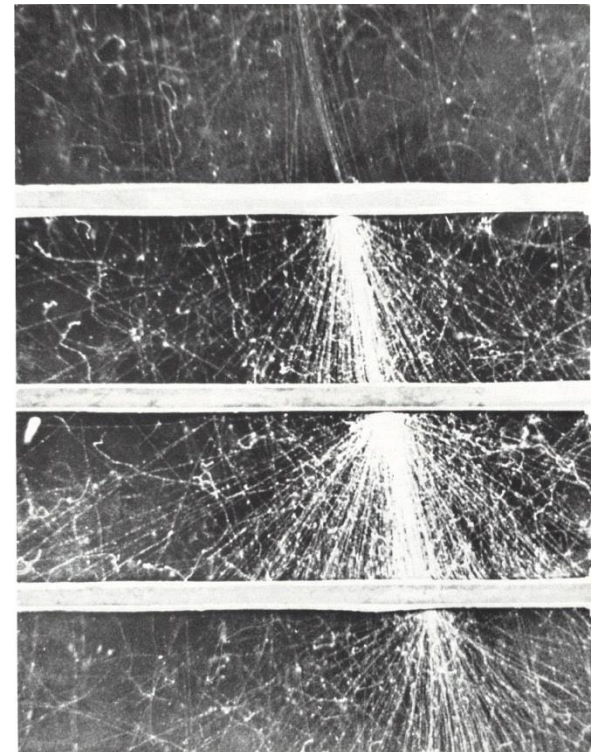
Рождение пар от энергичных гамма-квантов в пузырьковой камере в магнитном поле



Монте-Карло симулирование электронного ливня в кристалле электромагнитного калориметра



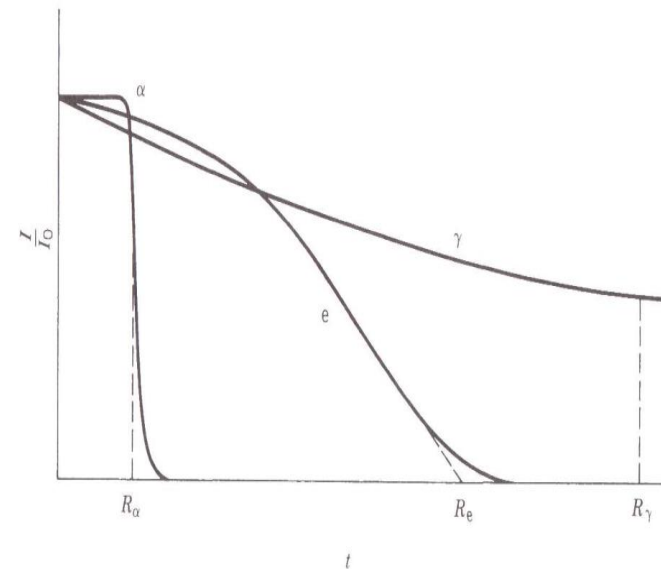
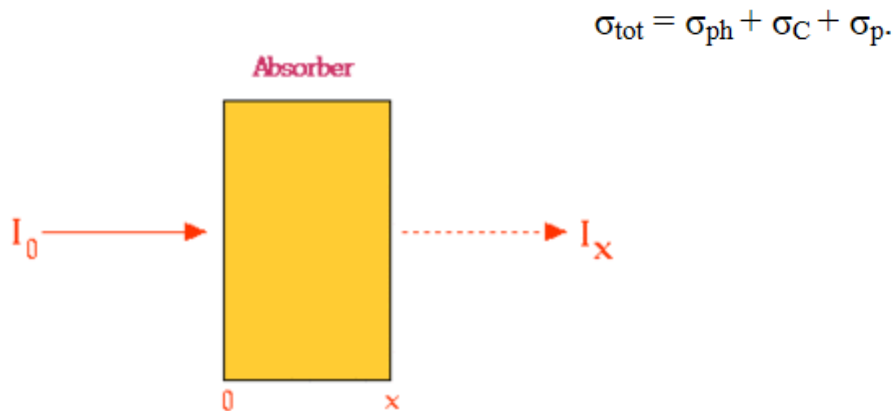
ЭМ-ливень в камере Вильсона со свинцовыми пластинами



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

5. Коэффициент поглощения

В области энергий гамма-квантов, излучаемых возбужденными ядрами при переходах в основное и низшие возбужденные состояния, т. е. при E_γ 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:

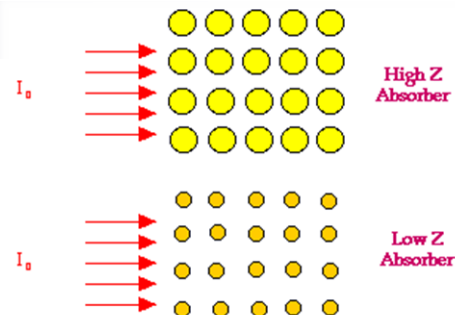


Уменьшение интенсивности $I(x)$ моноэнергетичного коллимированного пучка гамма-квантов не слишком толстым слоем x однородного вещества происходит экспоненциально:

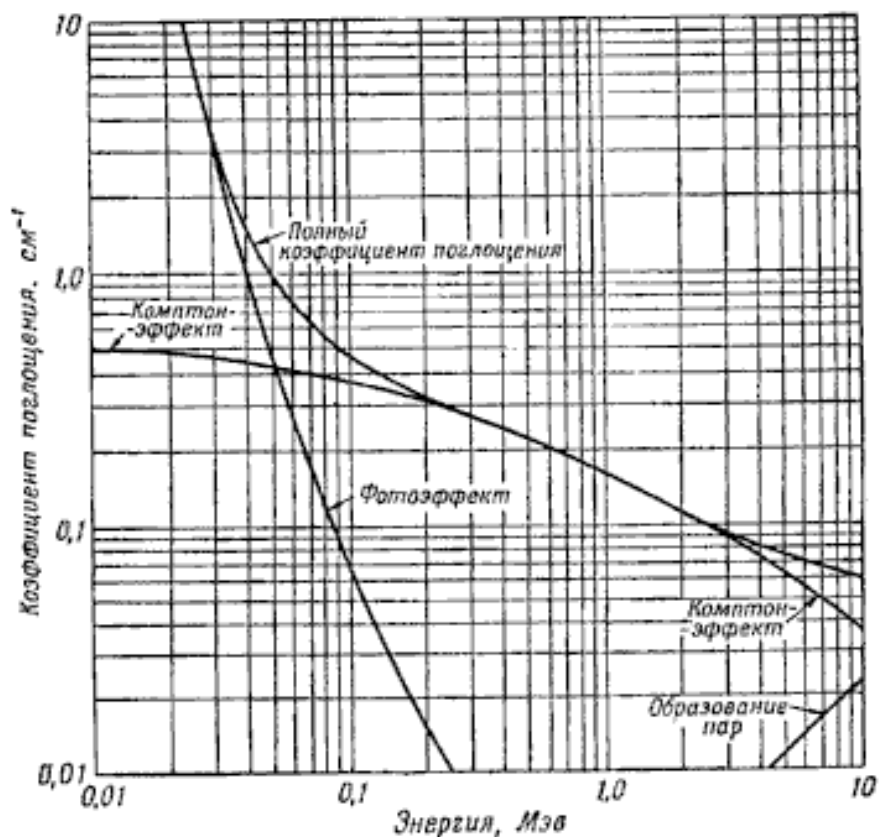
$$I(x) = I(0)e^{-n\sigma x} = I(0)e^{-\tau x}.$$

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

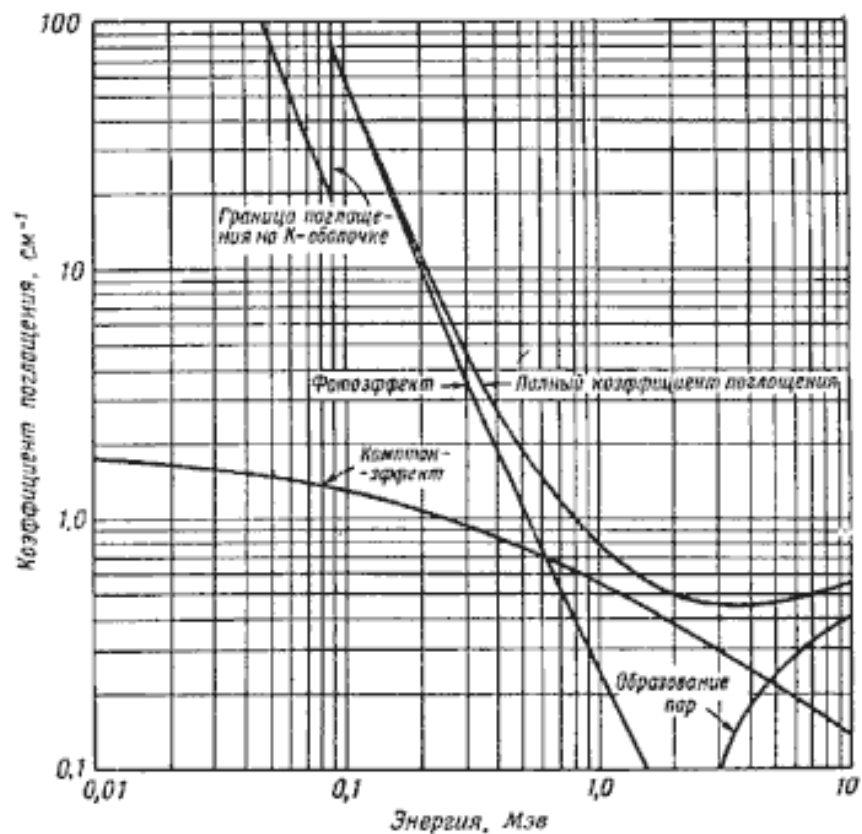
$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

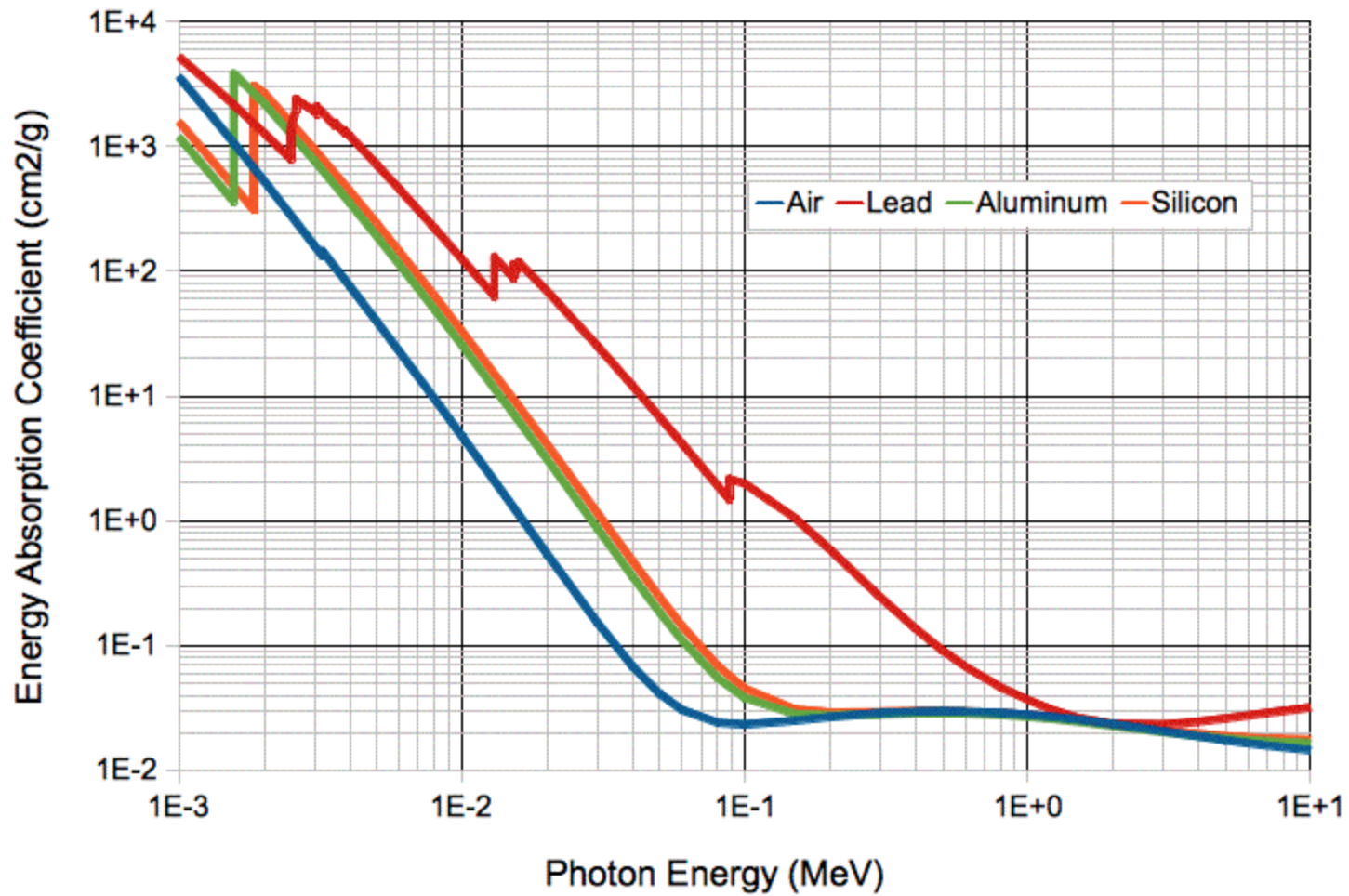


Алюминий



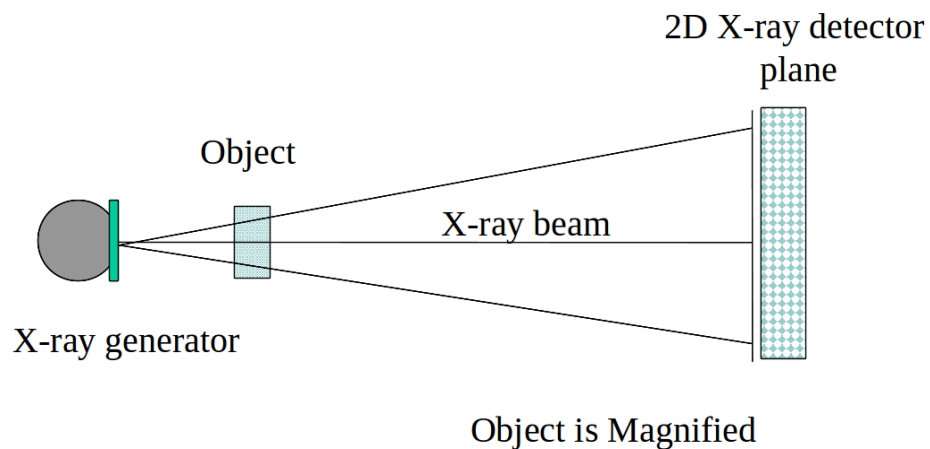
Свинец



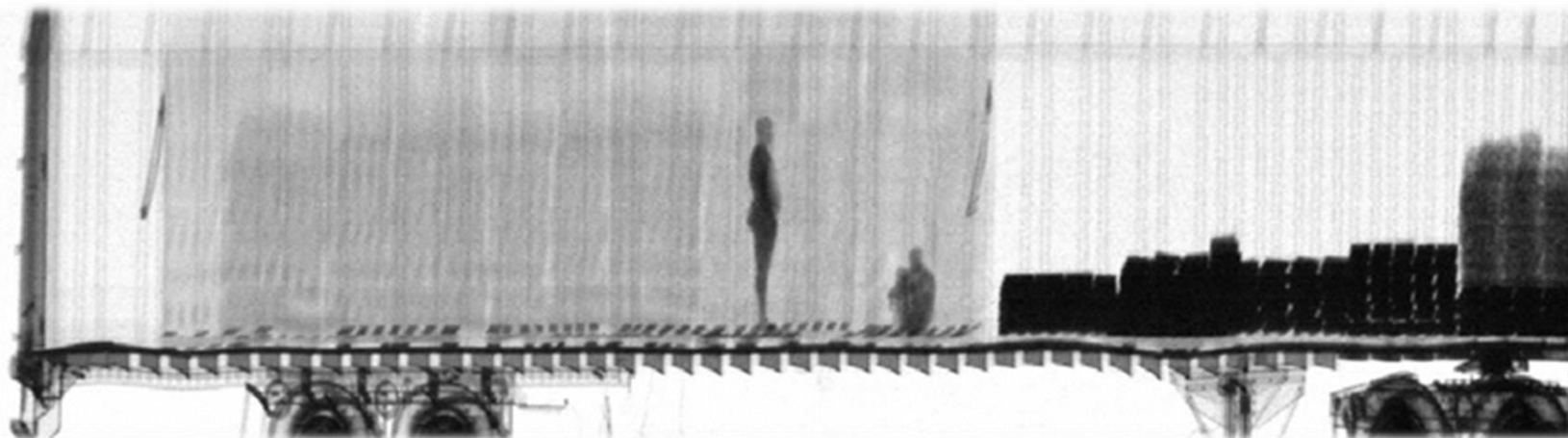
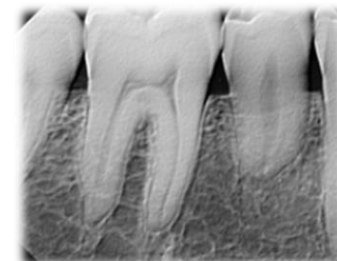


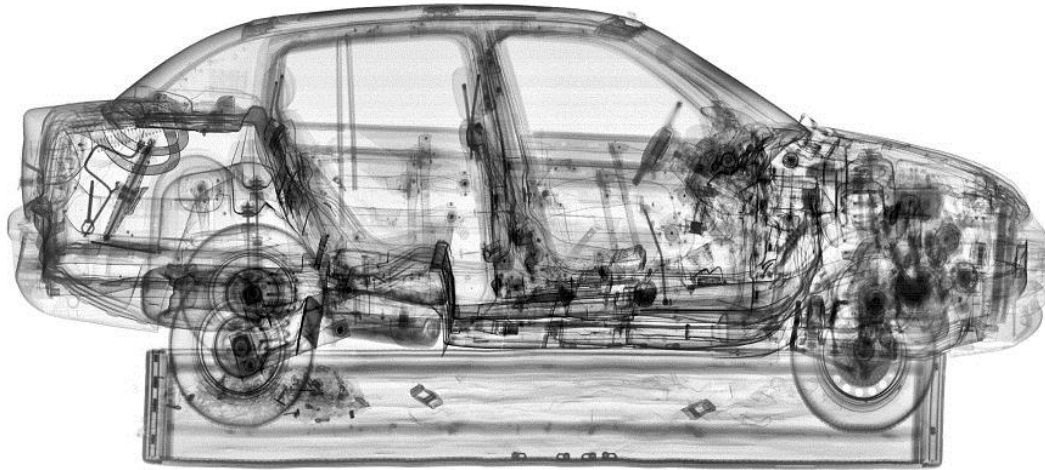
6. Примеры использования гамма-излучений

Рентгеновская и гамма-радиография

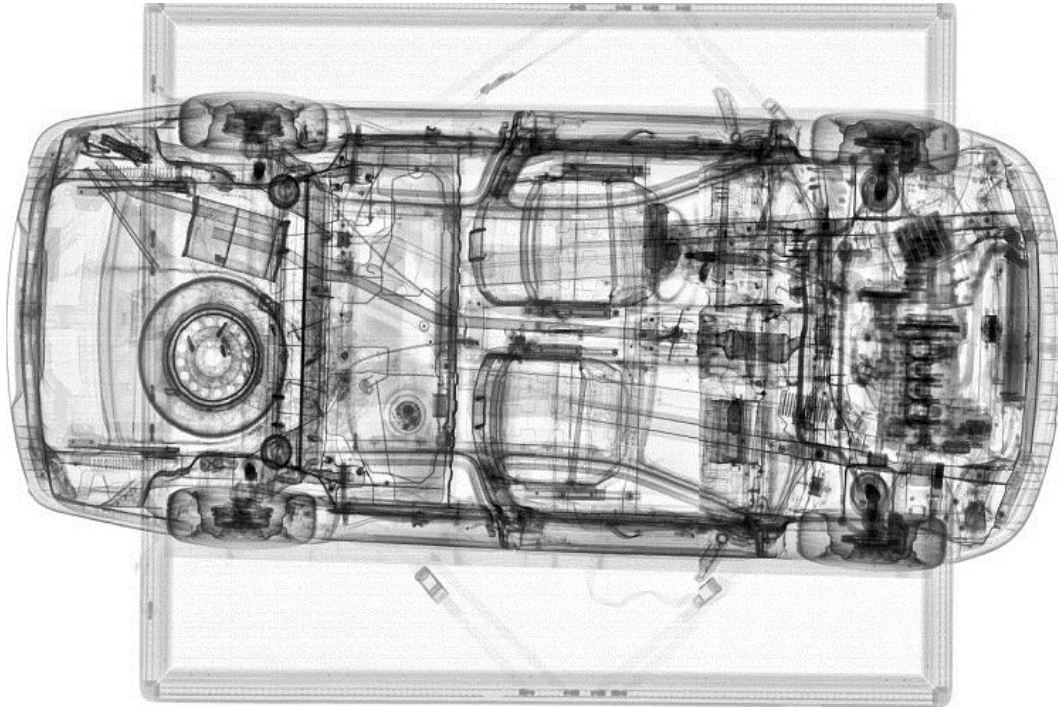


Hand mit Ringen





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



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

Портальные мониторы ядерных материалов (гамма-спектрометрия)

TS/LAURUS Systems



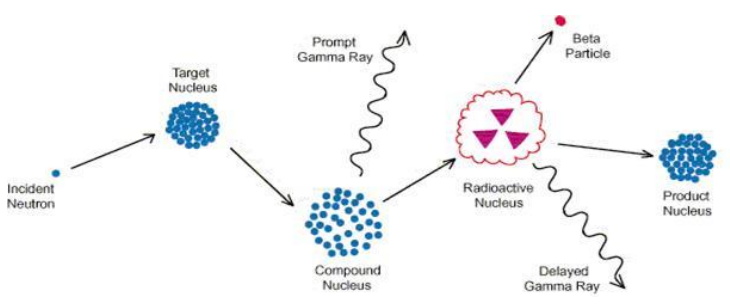
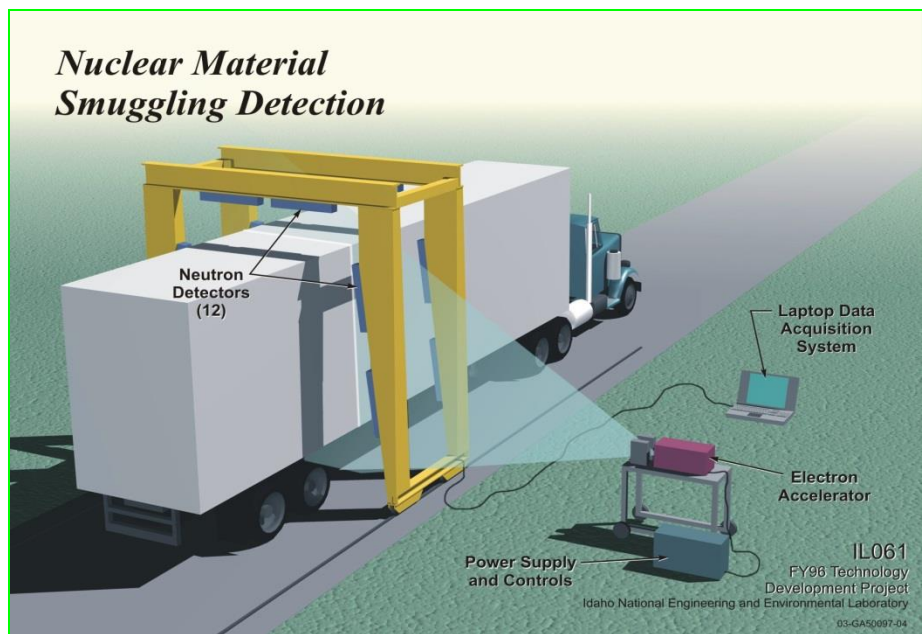
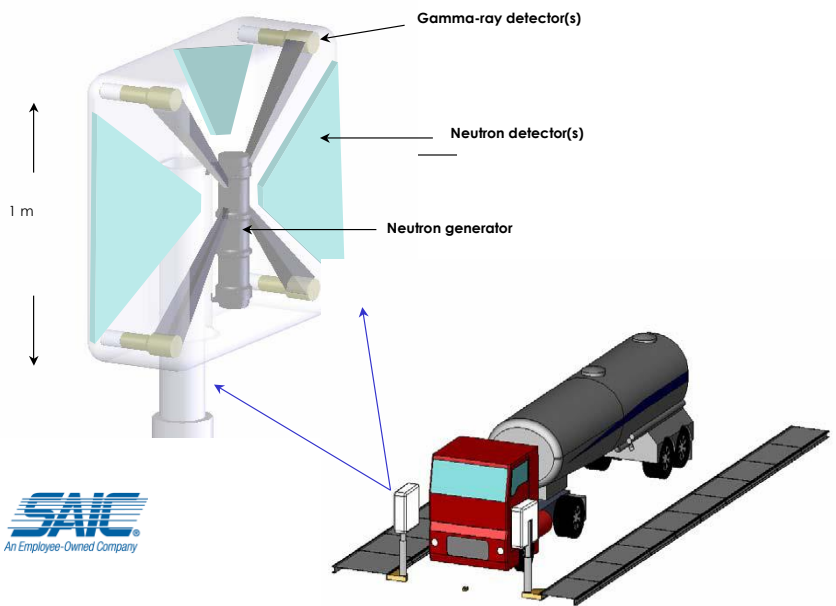
LUNDLUM



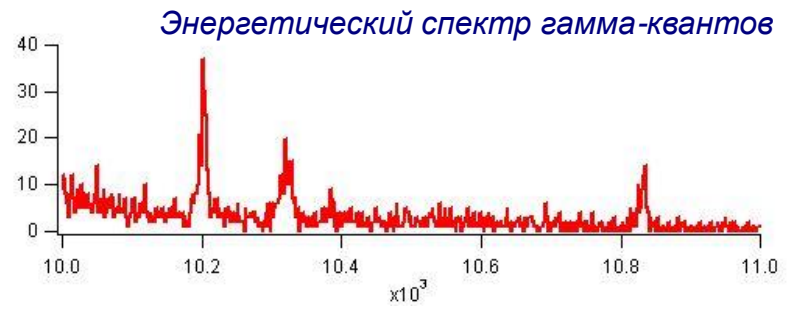
Canberra



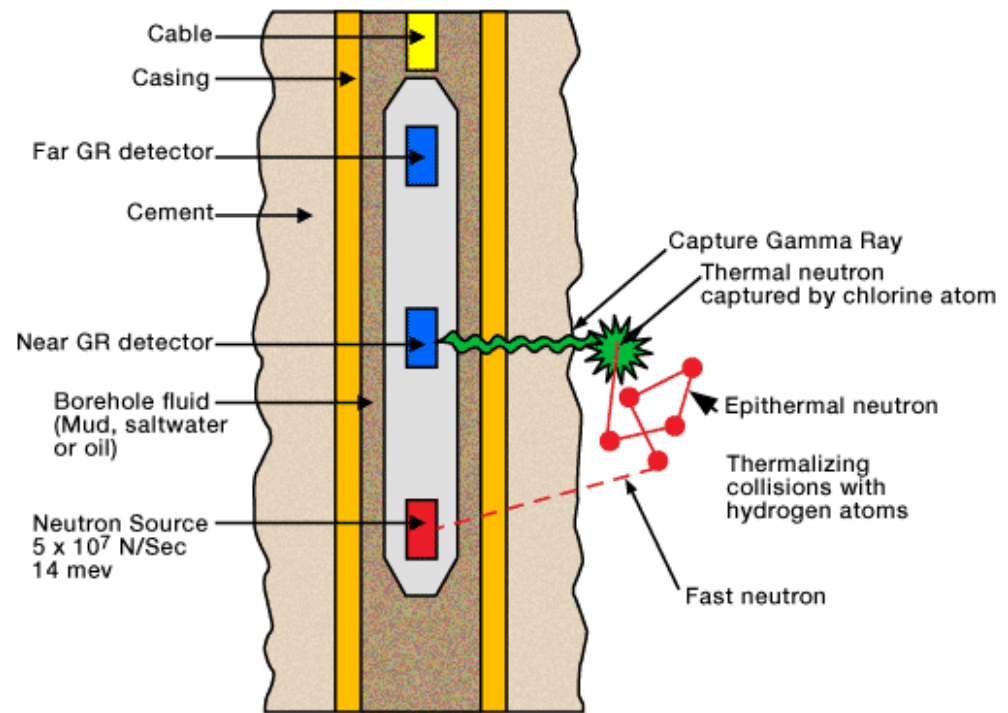
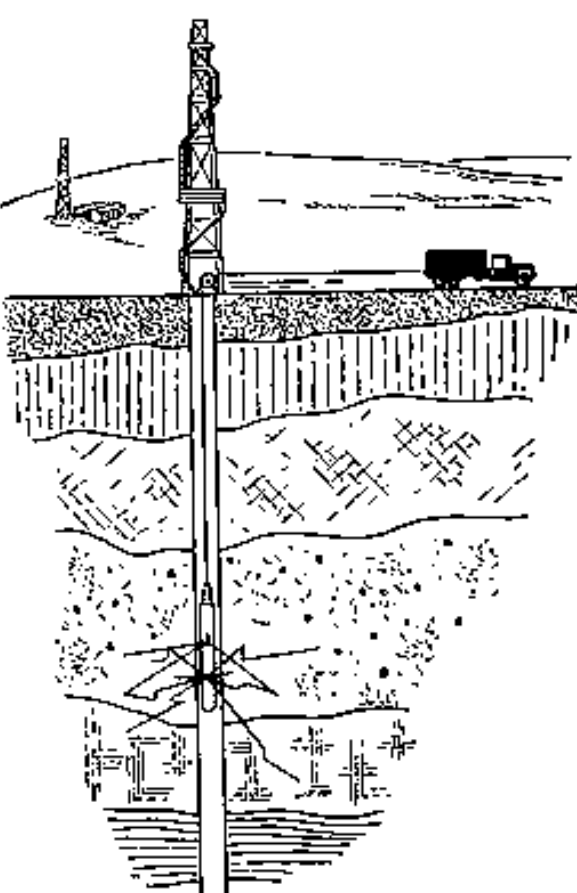
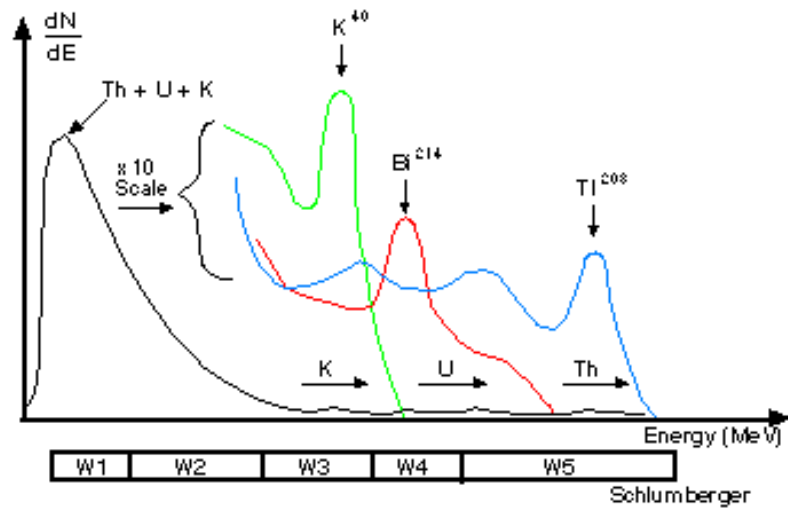
Системы для идентификации химических взрывчатых веществ и ядерных материалов



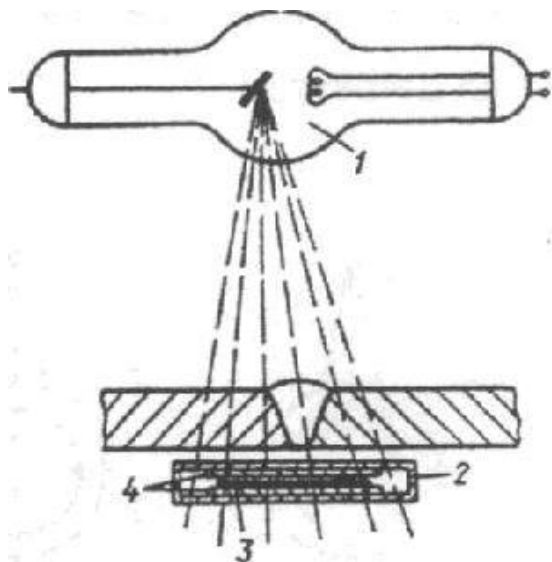
Нейтронно-активационный анализ



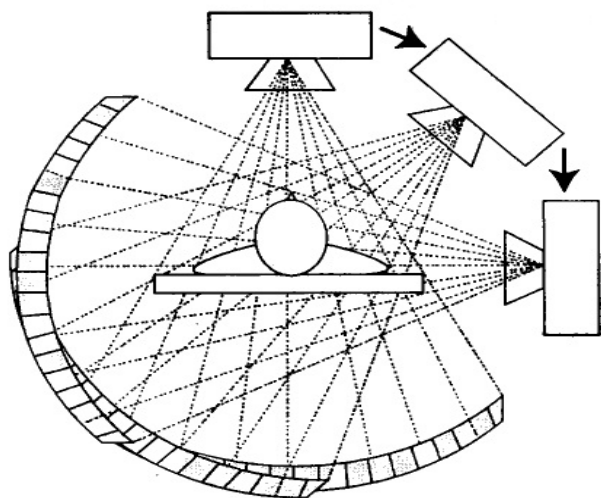
Гамма-каротаж



Дефектоскопия



Рентгеновская томография



Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ)

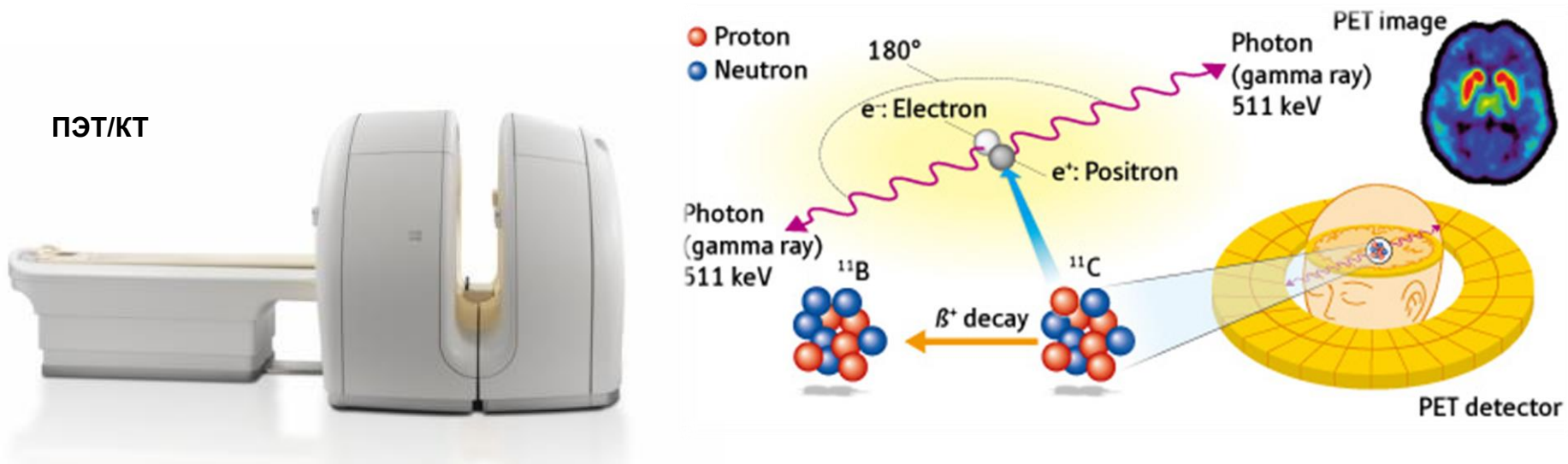
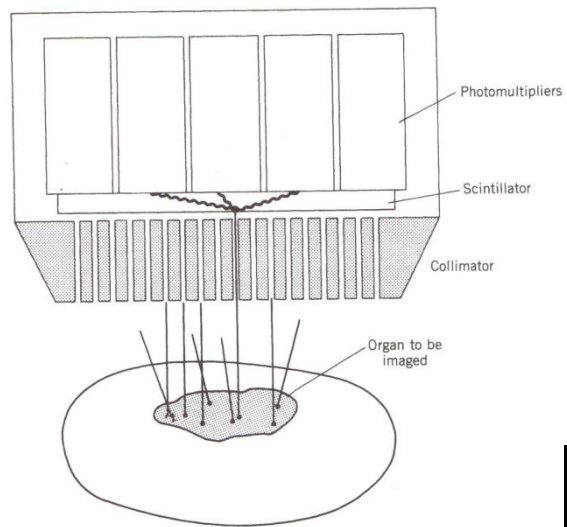


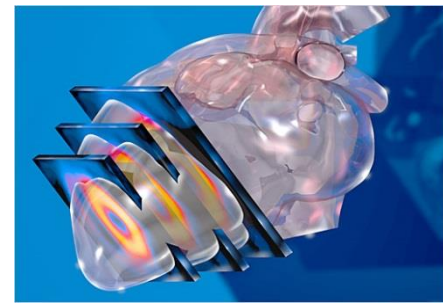
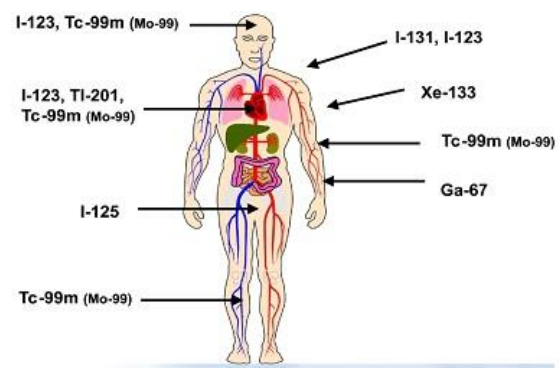
Table 2. Radio-isotopes used in PET

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

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

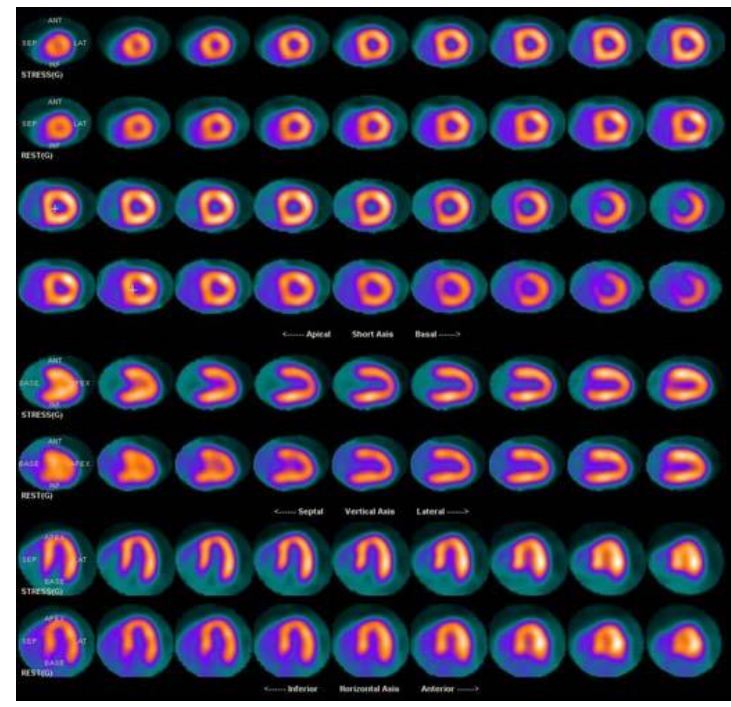
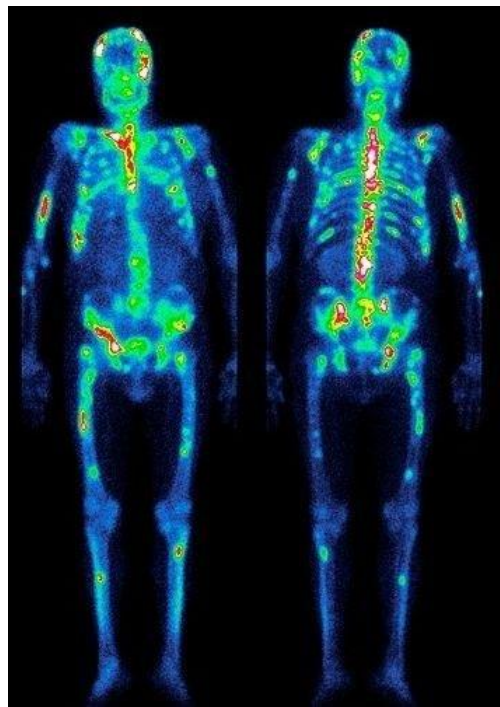


Гамма-камера



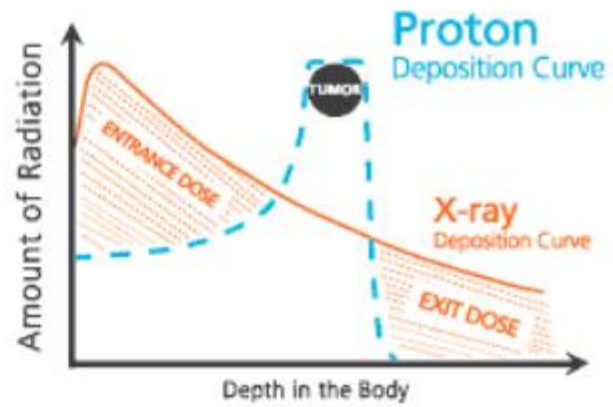
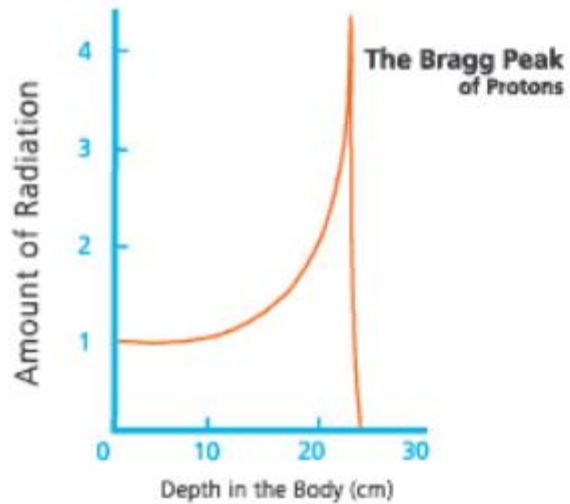
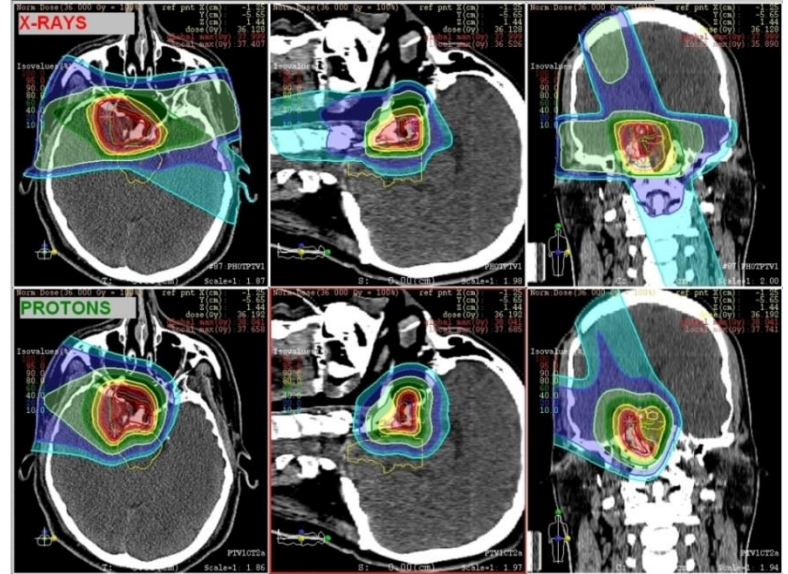
Кардиология

Онкология

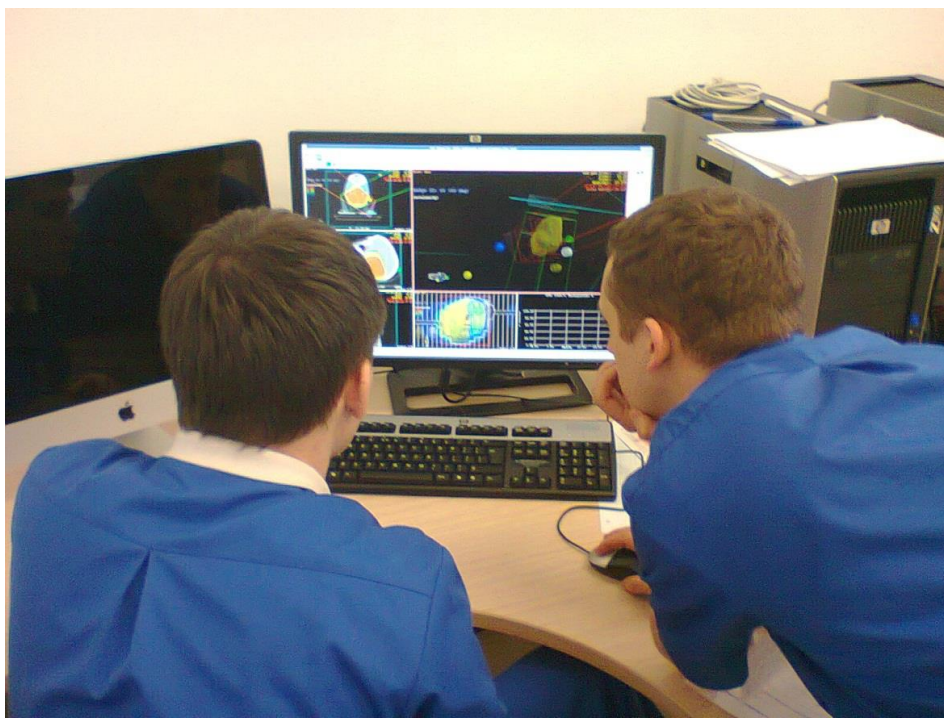


Радиационная терапия

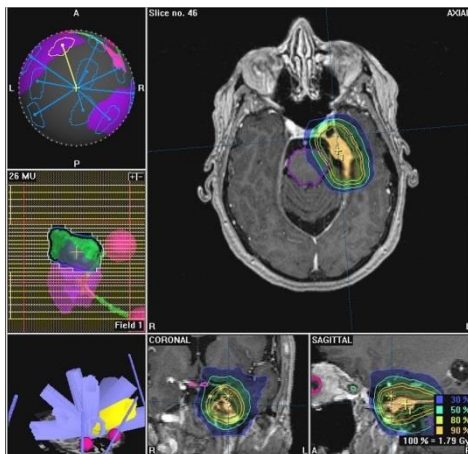




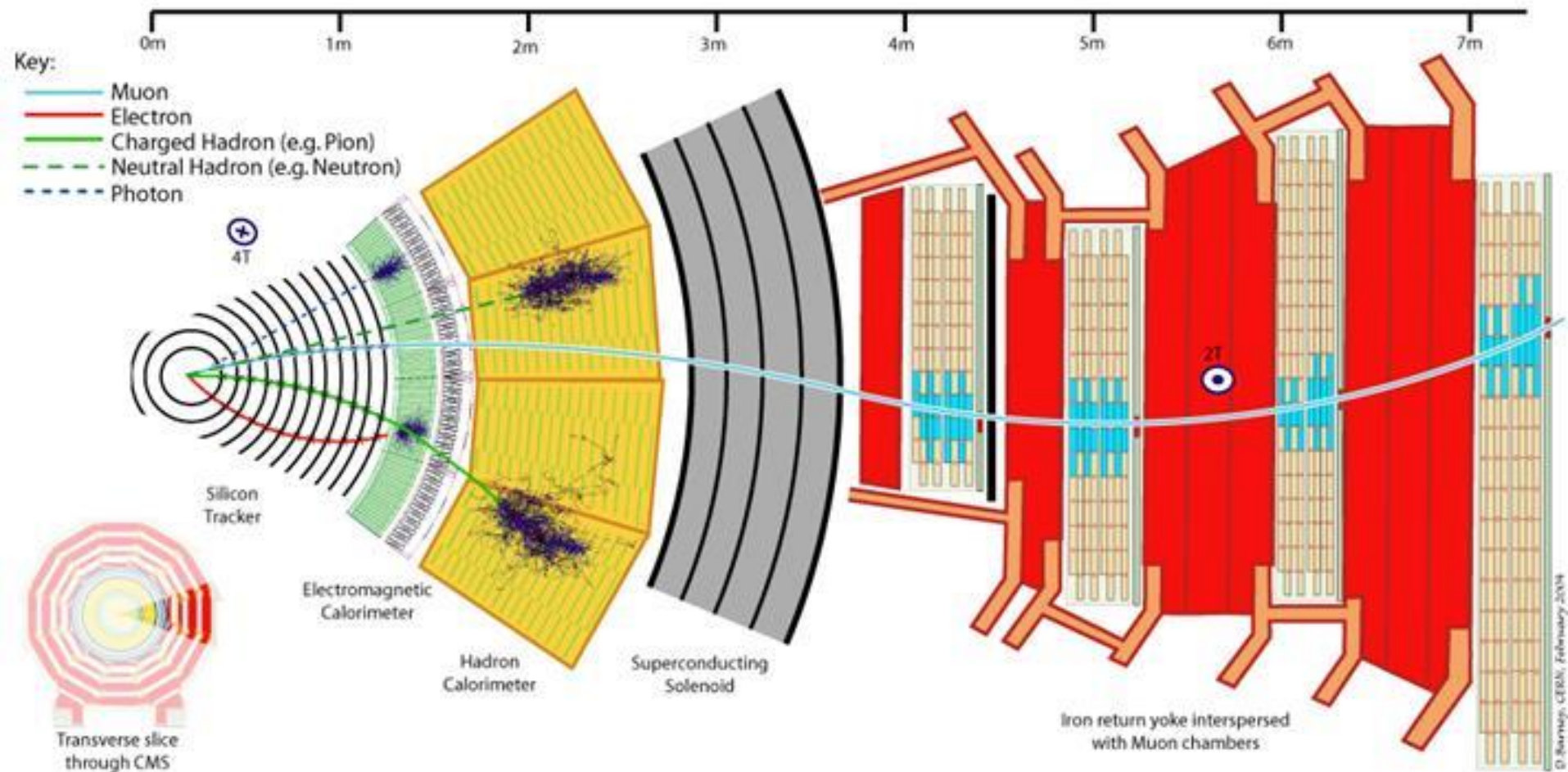
Выпускники МИФИ планируют лучевую терапию с помощью Кибер-Ножа в Центре детской онкологии и гематологии им. Дмитрия Рогачева

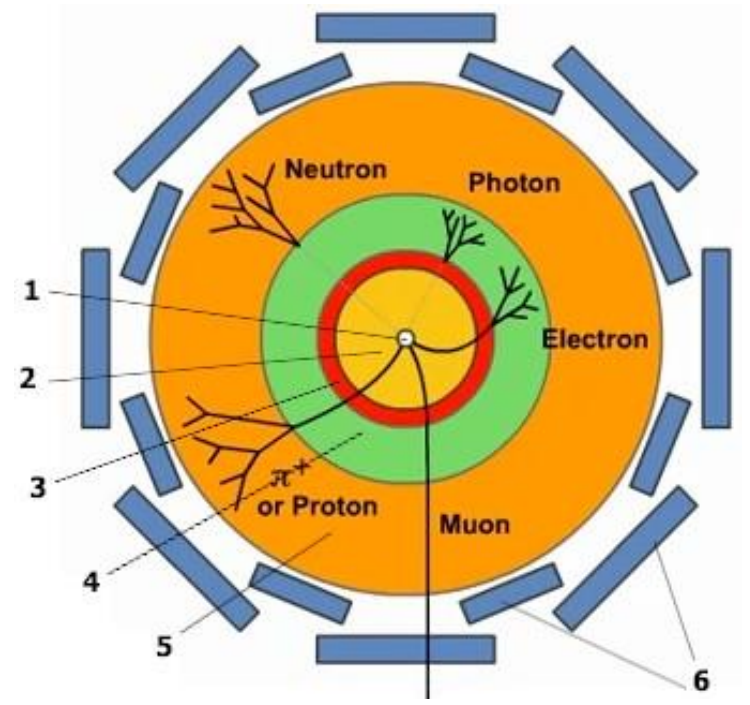
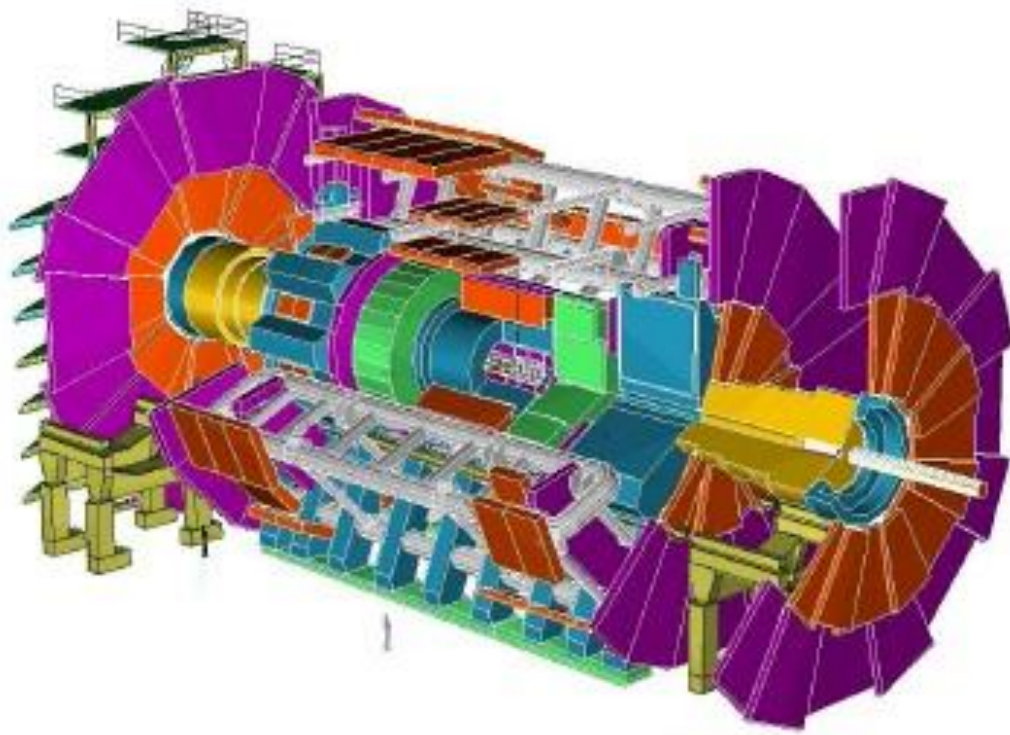


Программа планирования лучевой терапии XiO компании Elekta.

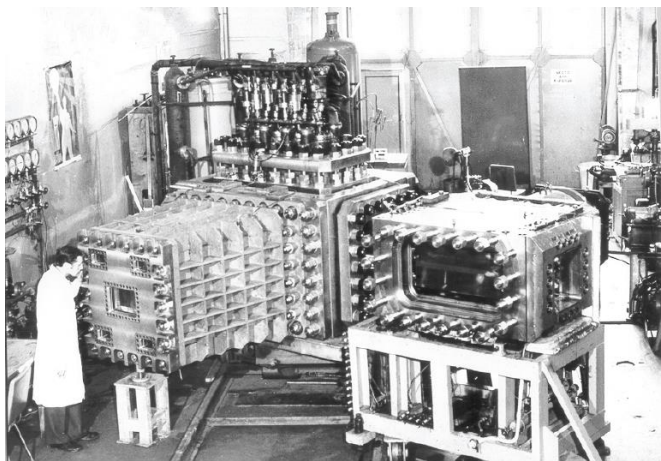


Физика высоких энергий

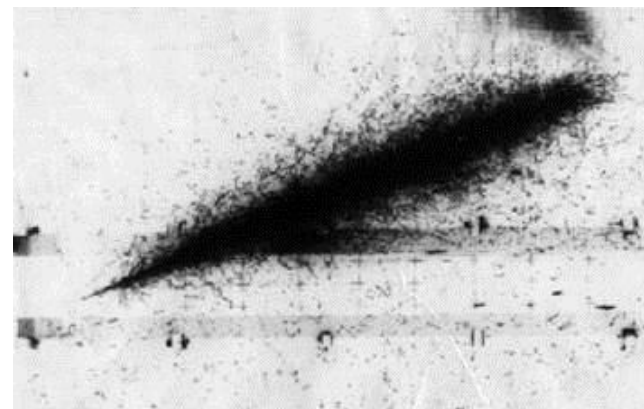




ATLAS

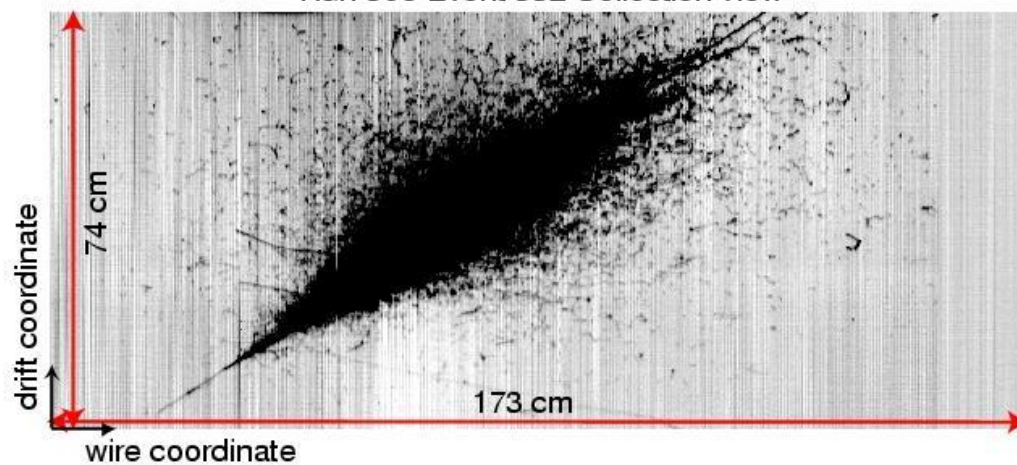


800-литровая жидкоксеронона камера ДИАНА



Фотография электромагнитного ливня в 180-литровой ксерононовой 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

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> .