

Методы измерения среднего атомного номера макрообъектов при просвечивании фотонами с энергиями до 10 МэВ

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Курилик Александр Сергеевич

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobel'цына
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова»

8 апреля 2014



Оглавление

Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации



Введение

Задачи интроскопии

Возможные решения

Просвечивание фотонами

Цель диссертационной работы

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации



Задачи интроскопии

- ▶ получение информации о внутренней структуре неизвестных объектов
- ▶ обнаружение скрытых дефектов в продукции промышленного производства
- ▶ проверка соответствия декларации и реального содержимого грузов и транспортных средств
- ▶ обеспечение безопасности в морских и речных портах, аэропортах, железнодорожных вокзалах



Источники проникающего излучения

- ▶ рентгеновское излучение с верхней границей энергии фотонов до сотен кэВ
- ▶ радиоактивные источники γ -квантов с энергиями до нескольких МэВ
- ▶ источники тормозного излучения на основе ускорителей электронов
- ▶ импульсные и непрерывные источники тепловых и быстрых нейтронов
- ▶ высокоэнергетичные мюоны космического излучения
- ▶ неионизирующее электромагнитное излучение — в том числе терагерцового диапазона
- ▶ регистрация излучений испускаемых при распаде нестабильных изотопов содержащихся в исследуемом объекте



Взаимодействия и процессы

- ▶ взаимодействие фотонов с атомными электронами: фотоэффект, когерентное и некогерентное рассеяние, рождение e^-/e^+ -пар
- ▶ взаимодействие фотонов с атомными ядрами: рождение e^-/e^+ -пар, резонансное рассеяние (флюоресценция), ГДР, (γ,n), (γ,f)
- ▶ взаимодействие нейтронов с атомными ядрами: (n,γ), (n,n), (n,f)
- ▶ взаимодействие электромагнитного излучения с молекулами и атомами
- ▶ испускание γ -квантов атомными ядрами при переходе из возбуждённых состояний
- ▶ рассеяние мюонов на ядрах
- ▶ испускание нейтронов деления



Регистрируемые частицы

- ▶ фотоны
- ▶ нейтроны
- ▶ электроны
- ▶ мюоны



Получаемая информация

- ▶ 2D (2-dimensional) изображение прозрачности K (величина обратная ослаблению)
- ▶ 3D (3-dimensional) изображение распределения линейного коэффициента ослабления
- ▶ 2D / 3D изображение распределения эффективного атомного номера Z и количества вещества nD
- ▶ 2D / 3D изображение распределения изотопного состава
- ▶ наличие того или иного вещества
- ▶ наличие делящихся и радиоактивных материалов



Просвечивание фотонами

Тип излучения

рентгеновское излучение, γ -кванты, тормозное излучение

Взаимодействия и процессы

фотоэффект, когерентное и некогерентное рассеяние, рождение пар

Регистрируемые частицы

фотоны

Получаемая информация

- ▶ 2D изображение прозрачности K
- ▶ 2D изображение Z и nD , если $N_E = 2$

Влияние объекта на выбор источника

- ▶ по сравнению с рентгеновскими системами γ -кванты от радиоактивных источников могут проникать через поглотитель большей толщины
- ▶ для исследования массивных объектов используют ускорители электронов с тормозной мишенью, которые позволяют получать интенсивные потоки тормозных фотонов больших энергий



Цель диссертационной работы

Выявление оптимального числа и значений энергий монохроматических фотонов и тормозного излучения при которых достигается максимальная точность идентификации вещества неизвестных макрообъектов по среднему эффективному зарядовому числу определяемому посредством сравнения величин ослабления пучков фотонов.



Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Сечения процессов взаимодействия фотонов с веществом

Ослабление потока фотонов

Принцип измерения Z и nD

Анализ сечений

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

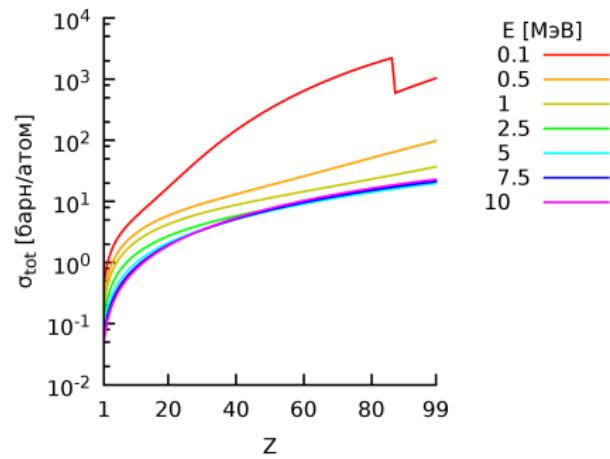
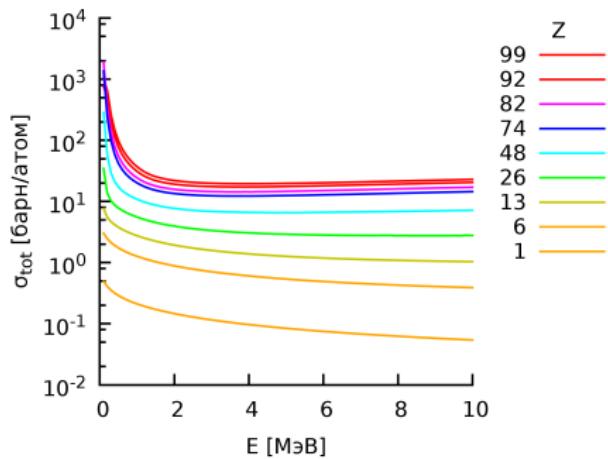
Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации



Сечения взаимодействия фотонов с веществом

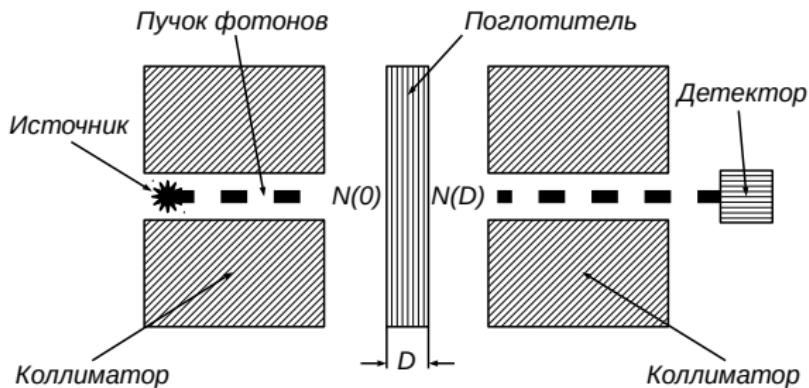
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{R}} + \sigma_{\text{C}} + \sigma_{\text{np}} + \sigma_{\text{ep}} + \sigma_{\text{nuc}}.$$



- ▶ у веществ с малым Z минимум σ при $E = 10$ МэВ
- ▶ у веществ с большим Z минимум σ при $E = \sim 3.7$ МэВ
- ▶ при E до ~ 3.7 МэВ все σ монотонно убывают



Монохроматические пучки фотонов



Ослабление монохроматического пучка фотонов:

$$N(D) = N(0) \cdot e^{-\sigma(E, Z) \cdot n \cdot D}$$

Прозрачность поглотителя [0,1]:

$$K(E, Z, nD) = \frac{N(D)}{N(0)} = e^{-\sigma(E, Z) \cdot n \cdot D}$$



Пучки фотонов с непрерывным спектром

Излучение из фотонов разных энергий:

$$N(D) = \sum_i N(E_i, D = 0) \cdot e^{-\sigma(E_i, Z) \cdot n \cdot D}$$

Пучок фотонов с непрерывным энергетическим спектром:

$$N(D) = \int_0^{\infty} N(E, D = 0) \cdot e^{-\sigma(E, Z) \cdot n \cdot D} dE$$

Суммарная доза C в детекторе, за импульс ускорителя

$$C(D) = \int_0^T \int_0^T W(T, E) \cdot e^{-\sigma(E, Z) \cdot n \cdot D} \cdot R(E, E_{dep}) \cdot E_{dep} dE dE_{dep}$$

Прозрачность K объекта — отношение доз:

$$K(T, Z, nD) = C(T, Z, nD) / C(T, Z, 0)$$



Монохроматические пучки фотонов

Однаковой прозрачностью K могут обладать объекты из разных веществ, с разными плотностями и толщинами:

$$\sigma_1(E, Z_1) \cdot n_1 \cdot D_1 = \sigma_2(E, Z_2) \cdot n_2 \cdot D_2 = -\ln(K_1) = -\ln(K_2)$$

Оценить значения двух неизвестных величин Z и nD можно сопоставляя значения двух прозрачностей K_1 и K_2 измеренных при двух различающихся энергиях фотонов E_1 и E_2 .

Отношение логарифмов прозрачностей:

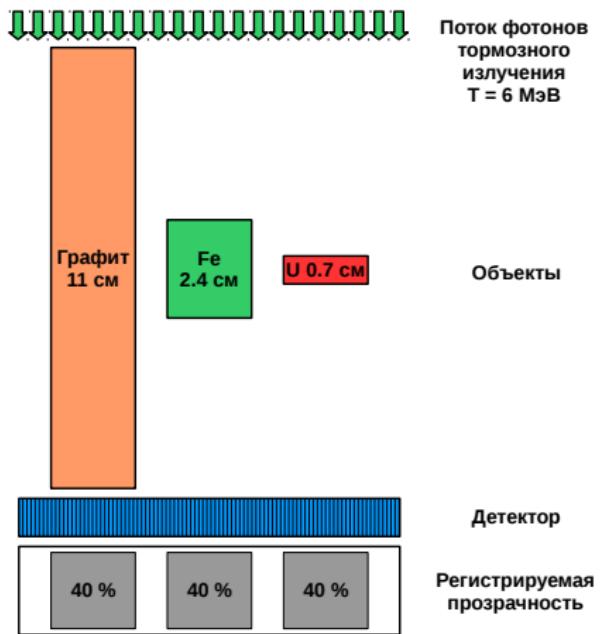
$$R(E_1, E_2, Z) = \frac{\ln(K_2)}{\ln(K_1)} = \frac{-\sigma(E_2, Z) \cdot n \cdot D}{-\sigma(E_1, Z) \cdot n \cdot D} = \frac{\sigma(E_2, Z)}{\sigma(E_1, Z)}$$

Количество атомов:

$$nD = -\frac{\ln(K_1)}{\sigma(E_1, Z)} = -\frac{\ln(K_2)}{\sigma(E_2, Z)}$$



Тормозное излучение



$$C(T_1) \div C(T_2) \Rightarrow Z, nD$$



Литература. Радиоактивные источники

- ▶ Volumetric fraction measurement in oil-water-gas multiphase flow with dual energy gamma-ray system / Li Dong-hui, Wu Ying-xiang, Li Zhi-biao, Zhong Xing-fu // Journal of Zhejiang University SCIENCE. — 2005. — no. 6A(12). — P. 1405–1411
- ▶ Study on Material Discrimination by Atomic Number Using Dual Energy Gamma-Rays / Y.M. Gil, Y.S. Lee, H.S. Lee et al. — 2005. — http://psl.postech.ac.kr/publication/dom_conference_env/kns_2005_f_ymgil.pdf
- ▶ Zhang W., Li X., Xu Z. Feasibility study on application of ct using gamma-ray with doubleenergy to container security inspection // Procedia Engineering. — No. 7. — 2010. — P. 203–208

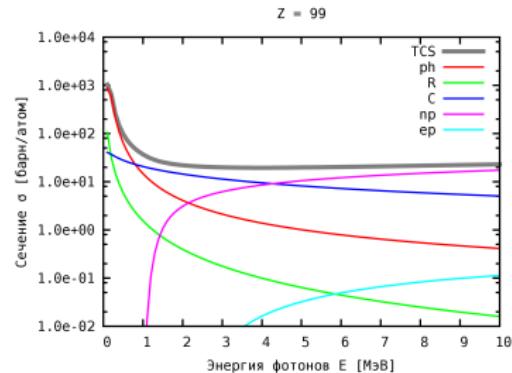
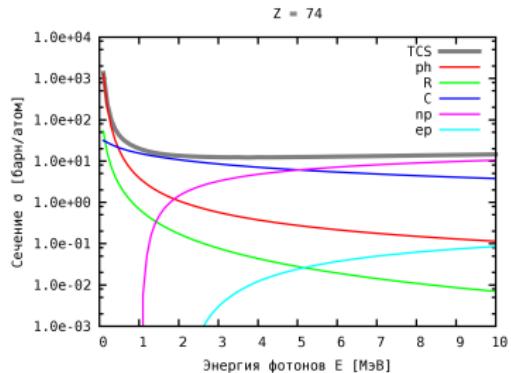
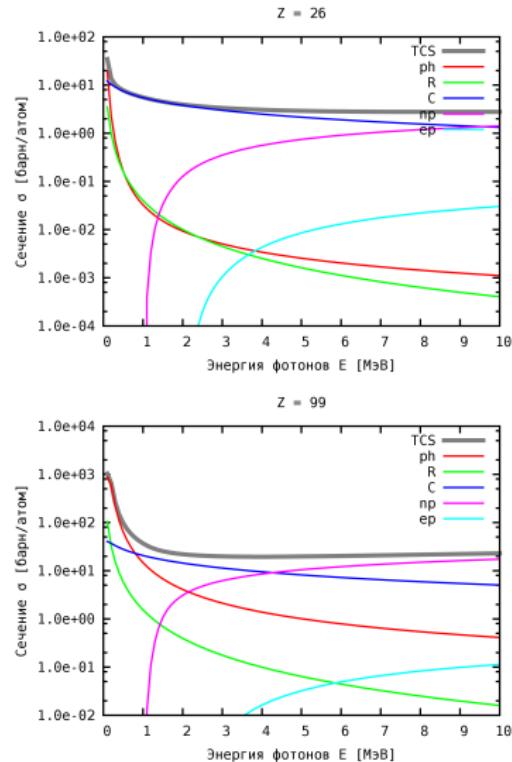
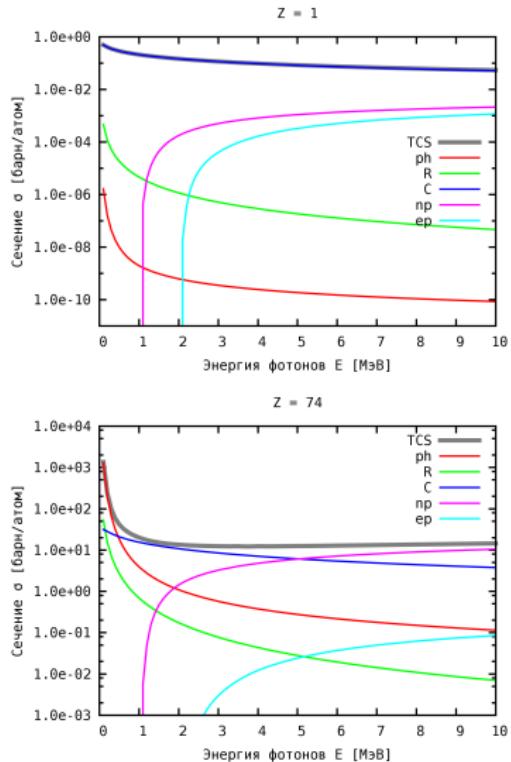


Литература. Тормозное излучение

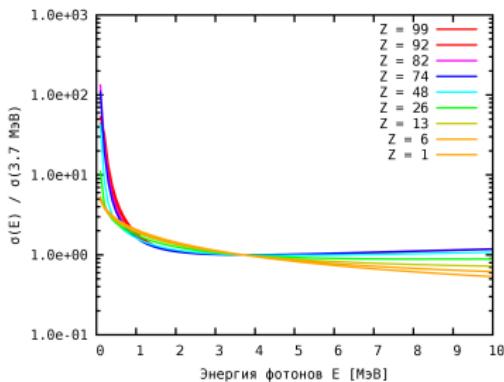
- ▶ Ogorodnikov S., Petrunin V. Processing of interlaced images in 4-10 mev dual energy customs system for material recognition // Physical review special topics - accelerators and beams. — 2002. — Vol. 5
- ▶ Bjorkholm P. Wmd detection // Cargo Security International. — 06/07 2005
- ▶ ООО "Сканtronик Системс". Реализованные проекты. — 2013. — <http://scantronicsystems.com/projects>



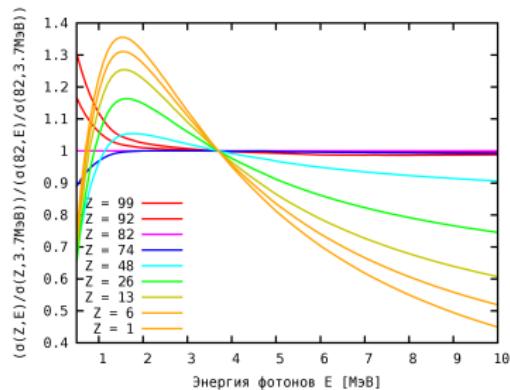
Вклады сечений основных процессов в полное сечение



Нормированные полные сечения



$$\sigma'(E, Z) = \sigma(E, Z) / \sigma(3.7, Z)$$



$$\sigma'(E, Z) = \frac{\sigma(E, Z) / \sigma(3.7, Z)}{\sigma(E, 82) / \sigma(3.7, 82)}$$



Характерное поведение сечений

0.5 – 1.25 МэВ:

- ▶ сечения для малых Z представляют собой сечение эффекта Комптона с масштабным коэффициентом $\sim Z$
- ▶ больше Z – быстрее, из-за фотоэффекта, убывает сечение

1.25 – 3.7 МэВ:

- ▶ основным процессом является эффект Комптона

>3.7 МэВ:

- ▶ рождение пар для малых Z приводит к отличию сечений
- ▶ для больших Z основным процессом является рождение пар – характерное поведение полных сечений для больших Z является почти одинаковым



Выводы

- ▶ для того чтобы отличать друг от друга различные вещества необходимо как минимум две разных энергии фотонов
- ▶ для того чтобы отличать друг от друга вещества с малым Z необходимо чтобы одна из энергий была больше чем ~ 1.5 МэВ
- ▶ для того чтобы отличать друг от друга вещества с большим Z необходимо чтобы одна из энергий была меньше чем ~ 1.5 МэВ
- ▶ наиболее оптимальными значениями энергий фотонов можно считать 0.5, 1.5, 3.7 и 10 МэВ



Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Радиоактивные источники Cs-137 и Со-60

Тормозное излучение

Моделирование на GEANT4

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации



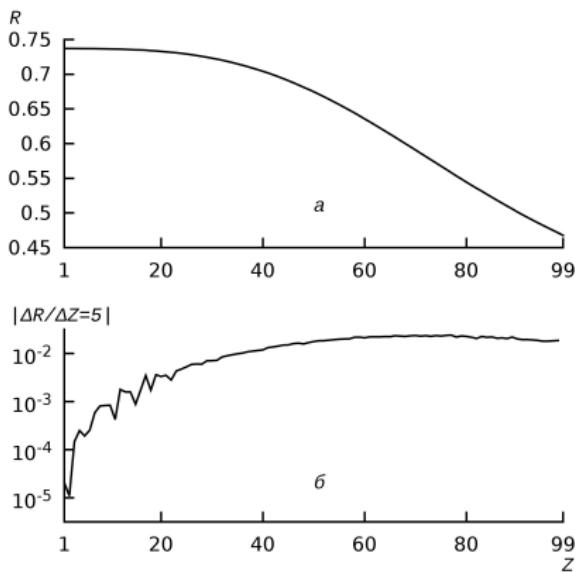
Выбор изотопов — источников гамма-квантов

- ▶ периоды полураспада $3 \lesssim T_{1/2} \lesssim 100$ лет
- ▶ энергии γ -квантов $E > 100$ кэВ
- ▶ вероятности испускания γ -квантов $I_\gamma > 15\%$

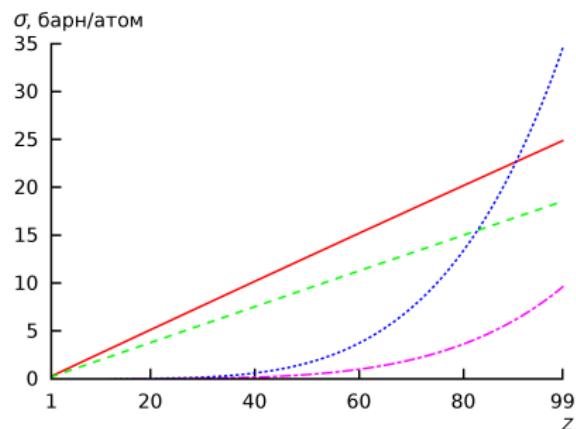
Источник	$T_{1/2}$, лет	E , кэВ; (I_γ , %)
Ti-44	63	511 ($\lesssim 200$), 1157 (99.9)
Co-60	5.3	1173.2 (100), 1332.5 (100)
Ba-133	10.5	302.9 (18.3), 356 (62.1)
Cs-137	30.1	661.7 (85.1)
Eu-152	13.5	121.8 (28.6), 344.3 (26.5), 1408 (21)
Bi-207	31.6	569.7 (97.7), 1063.7 (74.5)



Соотношение R в случае Cs-137 и Co-60



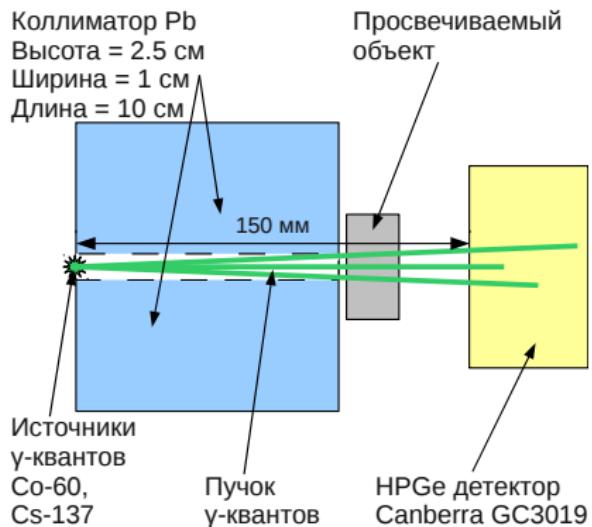
Отношение $R(Z)$ полных сечений и ΔR для веществ отличающихся на $\Delta Z = 5$.



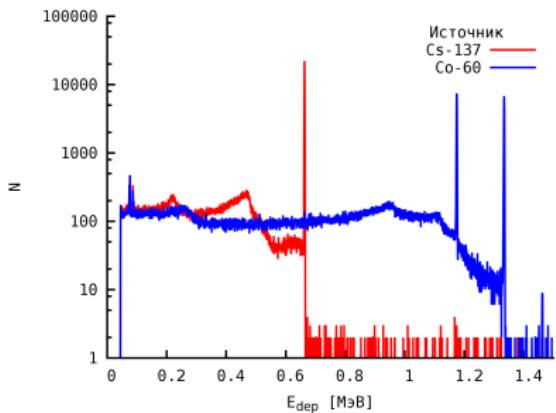
Сечения фотоэффекта и
эффекта Комптона.



Описание эксперимента

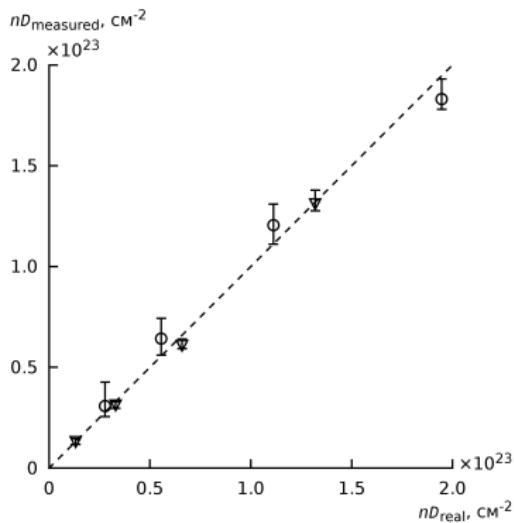
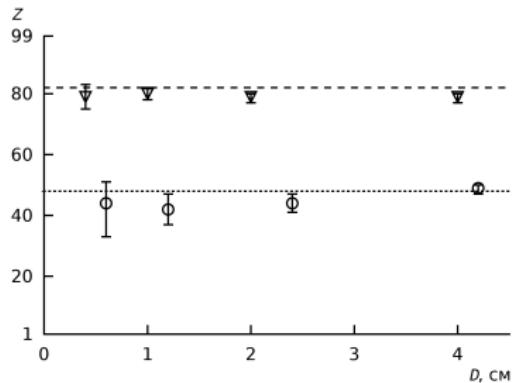


Источника γ -квантов,
свинцового коллиматора,
просвечиваемого объекта и
детектора γ -излучения.



Спектр зарегистрированных
энергий γ -квантов
провзаимодействовавших с
детектором.

Результаты эксперимента и выводы

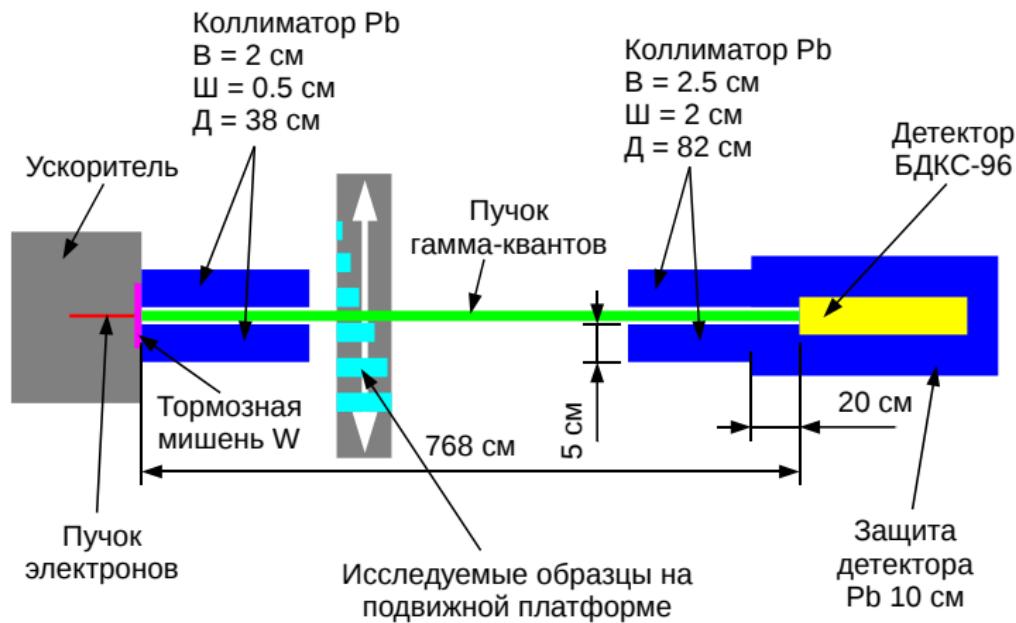


Образцы использовавшиеся в эксперименте:

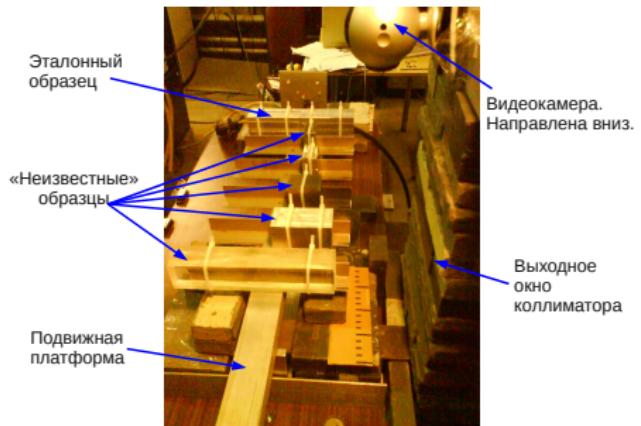
Вещество	Z	D, см
Свинец	82	0.4, 1, 2, 4
Кадмий	48	0.6, 1.2, 2.4, 4.2



Схема эксперимента



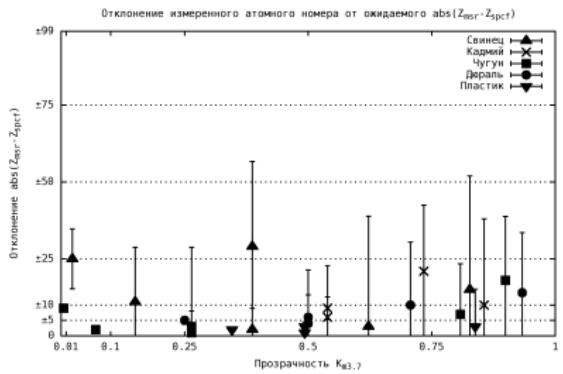
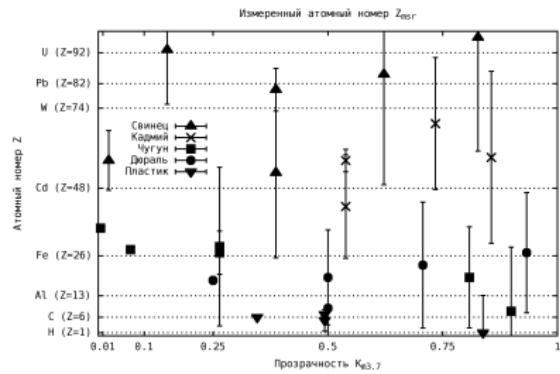
Тестовые образцы



Вещество	Z	D , см					
Свинец	82	8	4	2	1	0.4	
Кадмий	48	2	1	0.5			
Чугун	~ 26	20	10	5	0.8	0.4	
Дюраль	~ 13	16	8	4	0.8		
Оргстекло	~ 4	30	20	5			

Результаты эксперимента и выводы

Измерения проводились при четырёх значениях энергии ускорителя $T \approx 7.3, 6.2, 5.5, 3.5$ МэВ.



Измеренные значения Z в целом совпадают с ожидаемыми. Наблюдаемые отклонения измеренных значений атомных номеров от ожидаемых и величины погрешностей обусловлены дрейфом энергии ускорителя.

Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

geant4

Установка для интроскопии крупногабаритных объектов

Тормозное излучение

Оптимальный детектор

Отклик детектора

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации



geant4

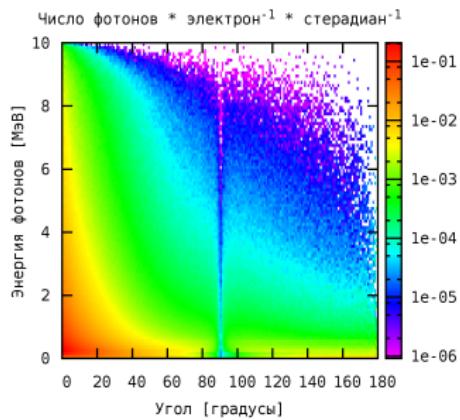
- ▶ GEANT4 — пакет программ для моделирования прохождения частиц через вещество на основе методов Монте-Карло.
- ▶ Включает в себя инструменты для описания геометрии, используемых веществ и материалов, силовых полей.
- ▶ Содержит множество физических моделей процессов взаимодействия частиц с веществом.



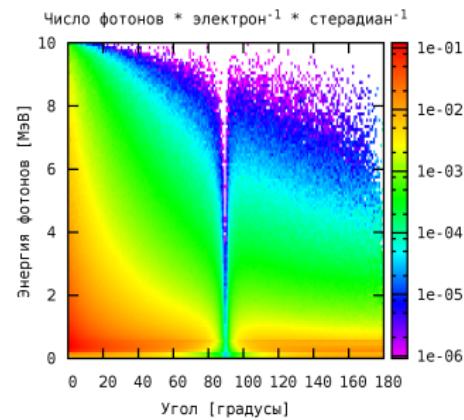
Установка для интроскопии крупногабаритных объектов



Оптимальная тормозная мишень: W 1.5 мм



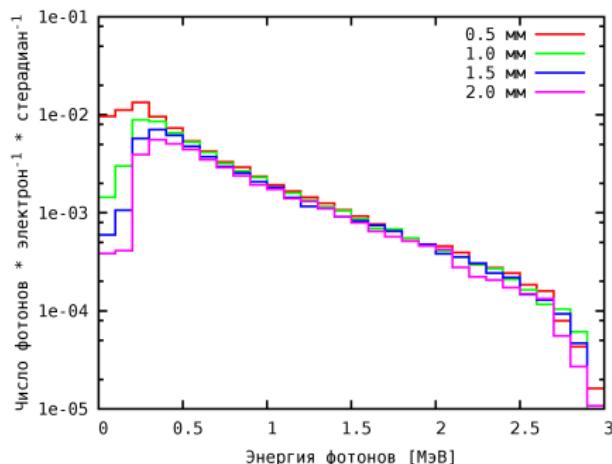
Толщина мишени 0.5 мм



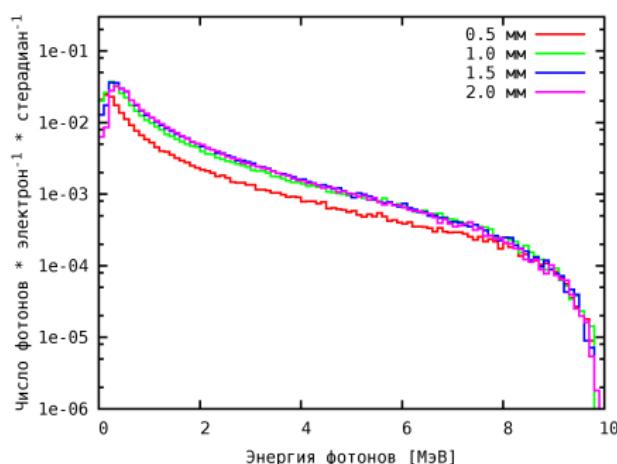
Толщина мишени 2.0 мм



Оптимальная тормозная мишень: W 1.5 мм



$30-31^\circ$

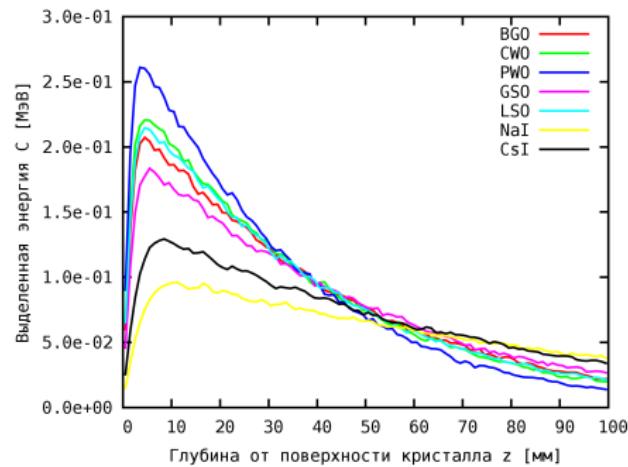
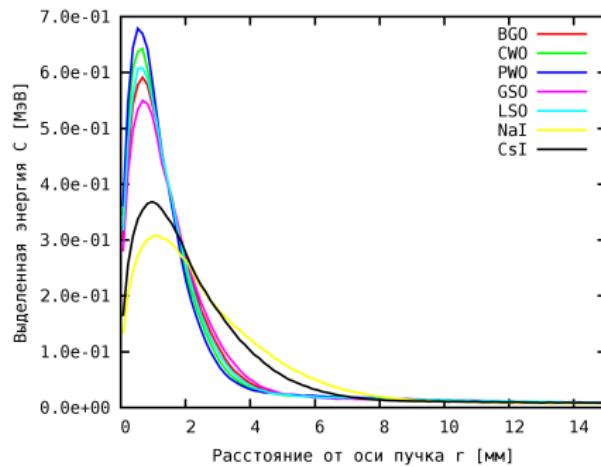


$30-31^\circ$

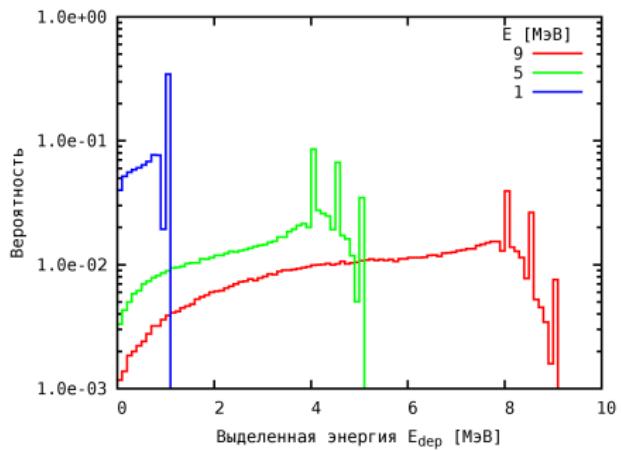


Оптимальный детектор PWO $5 \times 5 \times 50$ мм 3

Энерговыделение от радиуса и глубины детектирующего элемента.
Энергия фотонов 10 МэВ.



Отклик детектора



Отклик детектора при некоторых энергиях фотона.

Видны пики полного поглощения, одиночного и двойного вылета, а также т.н. комптоновская подложка.



Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Тормозное излучение с двумя энергиями

Тормозное излучение с тремя энергиями

Измерение Z в каждом пикселе

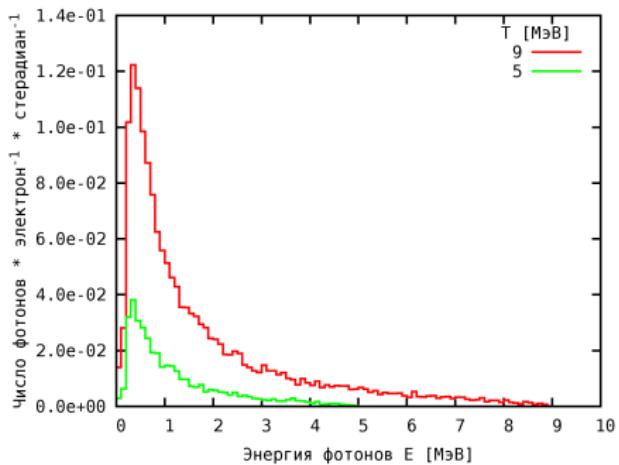
Выбор оптимальных энергий

Сравнение в широком динамическом диапазоне

Основные результаты, полученные в диссертации



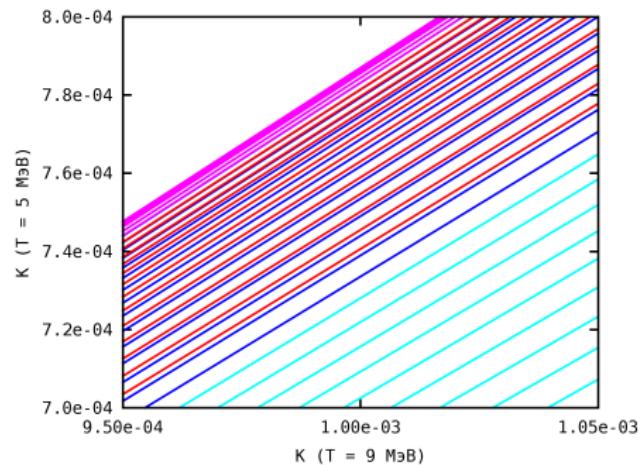
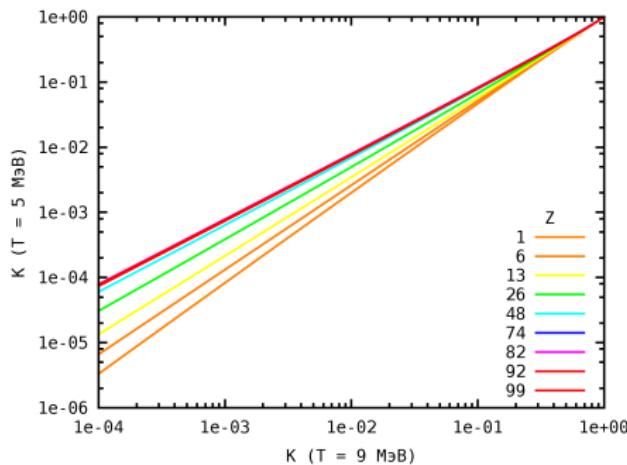
Тормозное излучение с двумя энергиями



- ▶ Энергетические спектры тормозного излучения.
- ▶ Энергии электронного пучка T равны 9 и 5 МэВ.
- ▶ Число первичных электронов при моделировании составляет 10^7 .
- ▶ Тормозная мишень — вольфрам толщиной 1.5 мм.
- ▶ Диапазон углов регистрации фотонов составляет $0\text{--}1^\circ$.



Двухмерное пространство прозрачностей



- При изменении параметра nD одновременно изменяются обе прозрачности.
- Линии соответствующие $Z \leq 61$ следуют одна за другой без пересечений и наложений, а линии соответствующие $Z \geq 62$ пересекаются с линиями из другого диапазона Z .



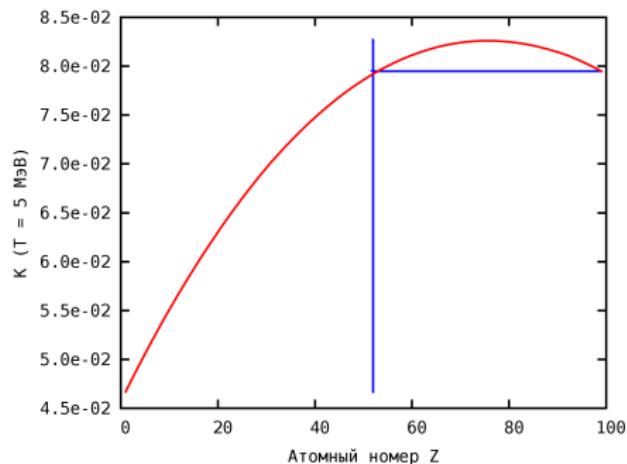
"Эквивалентные" поглотители

Материал	Z	Толщина D [см]
Графит	6	201.5
Алюминий	13	116.3
Железо	26	34.68
Кадмий	48	28.09
Вольфрам	74	11.03
Свинец	82	18.03
Уран	92	10.30

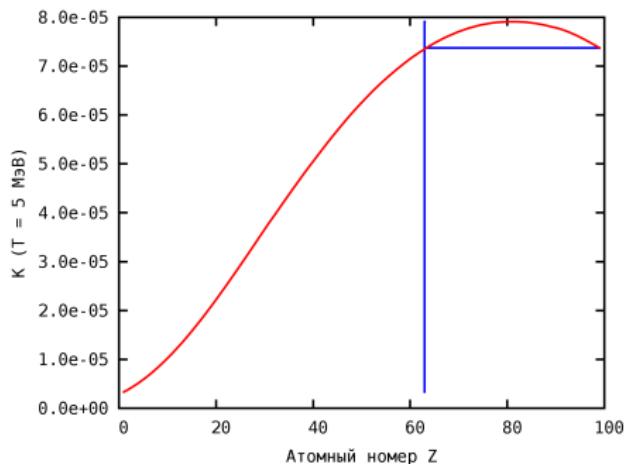
Толщины D поглотителей ослабляющих узкий пучок тормозного излучения с энергией $T = 9$ МэВ в 10^4 раз.



Неоднозначность



$$K(T = 9 \text{ МэВ}) = 10^{-1}$$

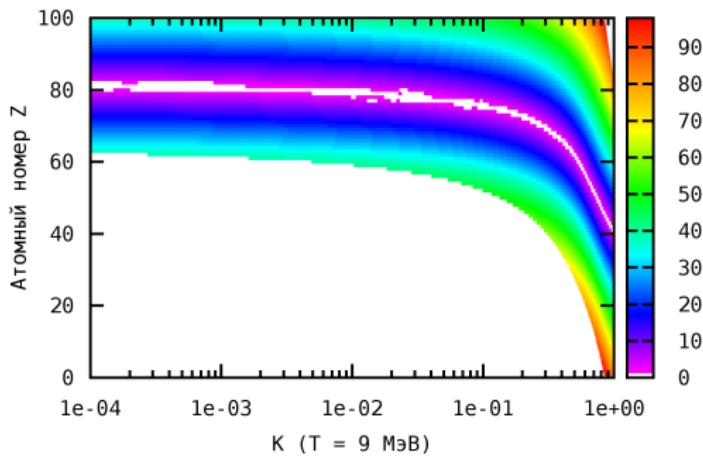


$$K(T = 9 \text{ МэВ}) = 10^{-4}$$

- Граница области неоднозначности обозначена вертикальной синей линией.
- Видно что справа от неё одному значению $K(T = 5 \text{ МэВ})$ соответствуют два разных Z .



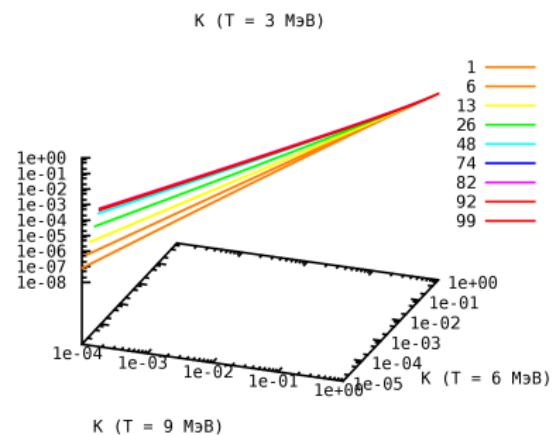
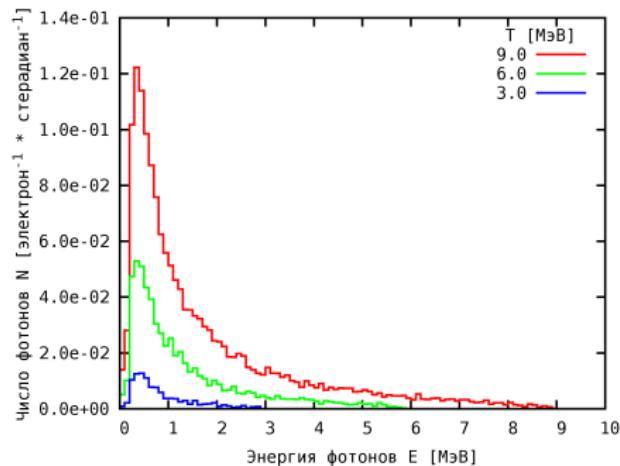
Ошибки из-за неоднозначности



Абсолютная максимально возможная ошибка измерения атомного номера в диапазоне прозрачностей $10^{-4} < K(T = 9 \text{ МэВ}) < 1$ для $1 \leq Z \leq 99$.



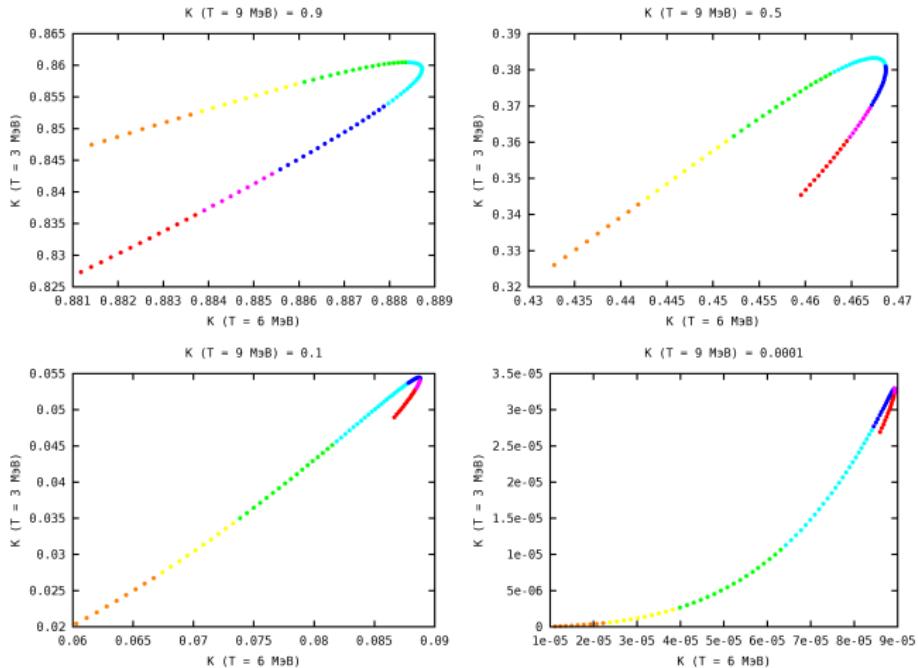
Тормозное излучение с тремя энергиями



- ▶ Семейство параметрических кривых описывает изменение трёх прозрачностей объектов из различных веществ (H, C, Al, Fe, Cd, W, Pb, U, Es).
- ▶ Параметром задающим совместное изменение всех трёх прозрачностей K является количество вещества nD .



Срезы параметрических кривых

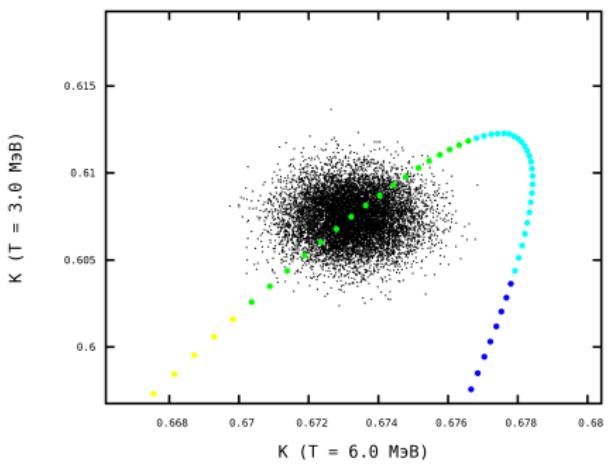
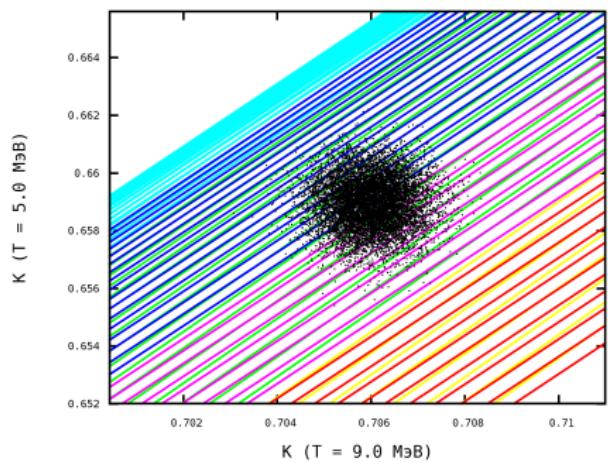


Параметры сравнения

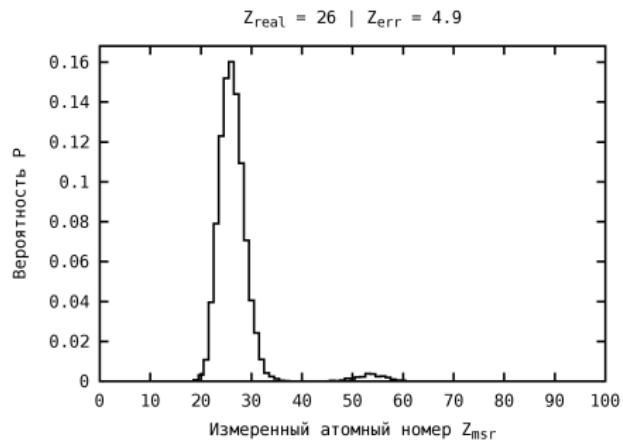
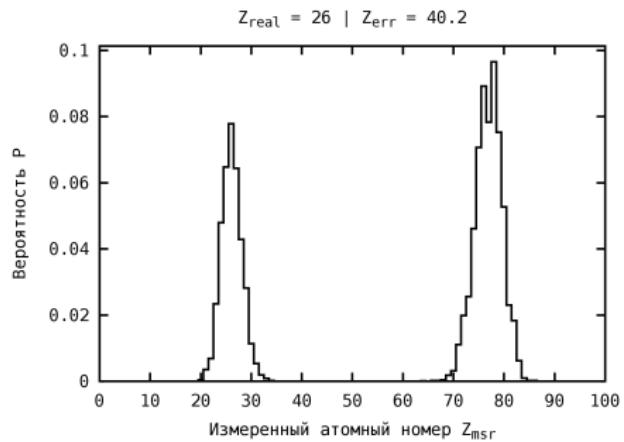
- ▶ $T = 9$ и 5 МэВ $T = 9, 6$ и 3 МэВ.
- ▶ Средняя суммарная мощность пучка электронов для всех энергий 5 кВт, что эквивалентно среднему току 500 мкА электронов с кинетической энергией 10 МэВ.
- ▶ Количество первичных электронов обратно пропорционально их энергии.
- ▶ Частота переключения энергий ускорителя - 200 и 300 Гц соответственно.
- ▶ Расстояние от тормозной мишени до линейки детекторов - 11 м.
- ▶ Детектор — линейка PbWO₄ размером $5 \times 4 \times 50$ мм³ установленных с шагом 5 мм.
- ▶ Число испытаний 10000 .



Железо толщиной 1 см

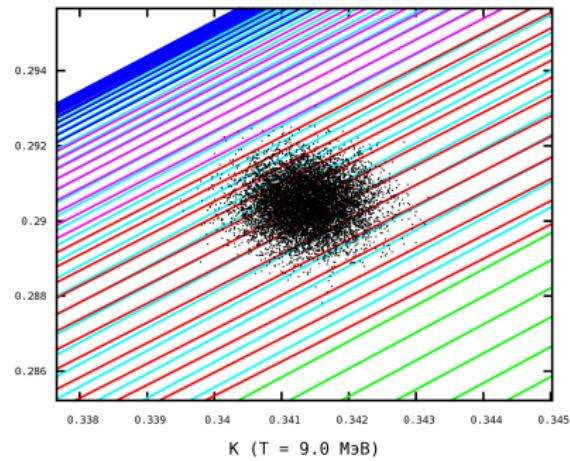


Железо толщиной 1 см

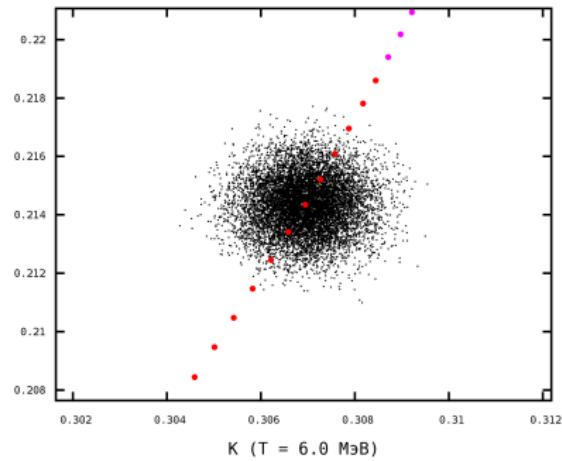


Уран толщиной 1 см

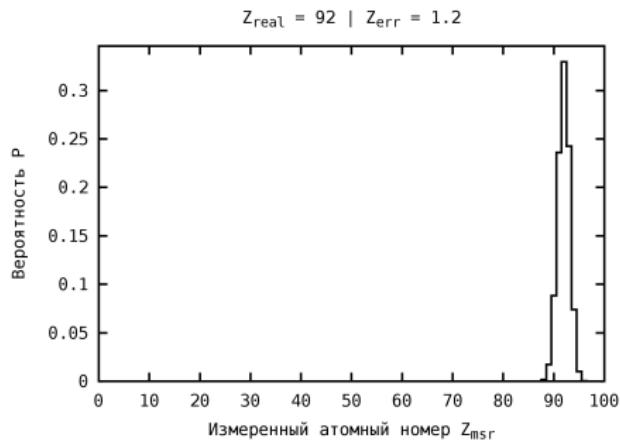
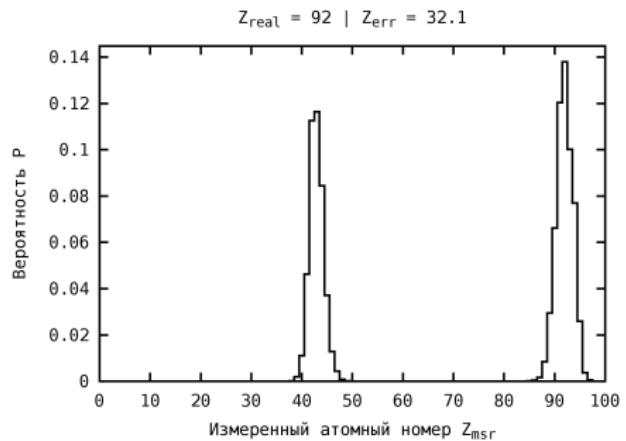
$K (T = 5.0 \text{ МэВ})$



$K (T = 3.0 \text{ МэВ})$

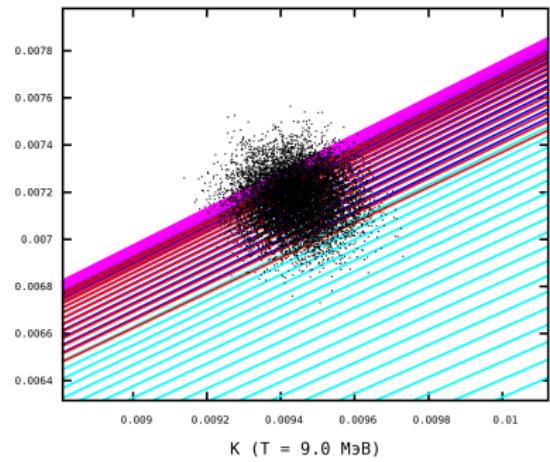


Уран толщиной 1 см

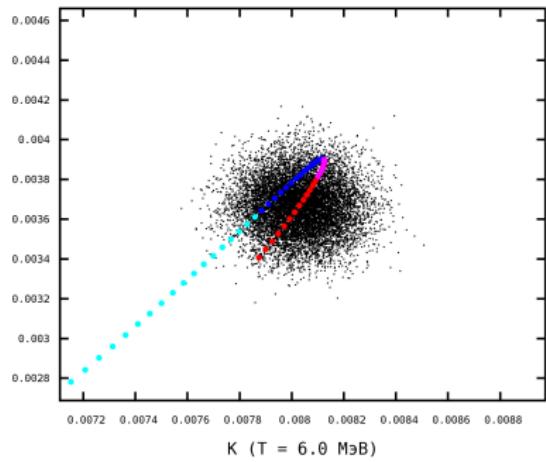


Уран толщиной 5 см

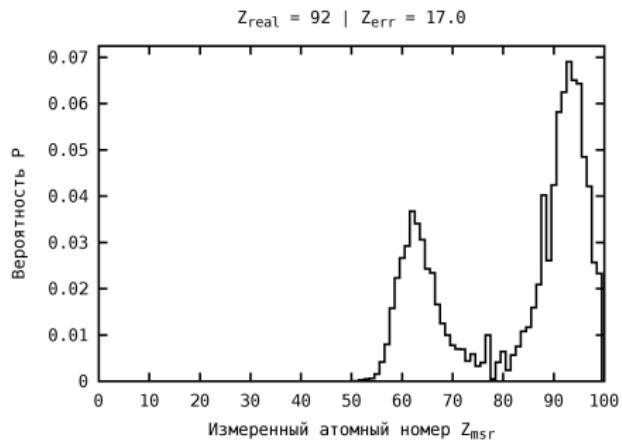
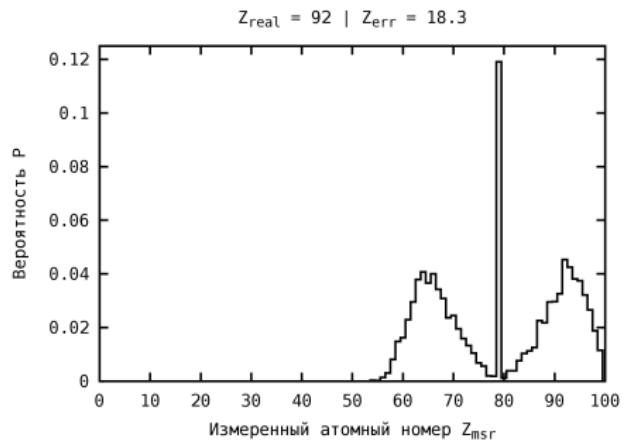
$K (T = 5.0 \text{ MeV})$



$K (T = 5.0 \text{ MeV})$



Уран толщиной 5 см



Критерии оптимальности

В качестве критерия точности используем среднеквадратичное отклонение Z_{err} измеренных значений Z_{msr} от истинного атомного номера Z_{real} вещества из которого изготовлен просвечиваемый объект.

$$Z_{\text{err}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Z_i - Z)^2}{m - 1}}$$

где: m - количество испытаний. Чем меньше Z_{err} тем лучше.

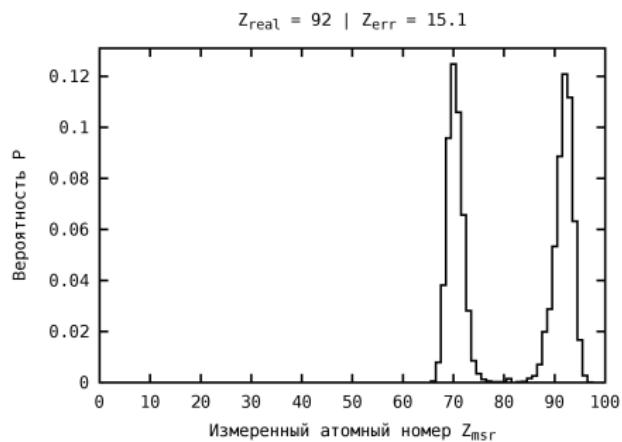


Параметры сравнения

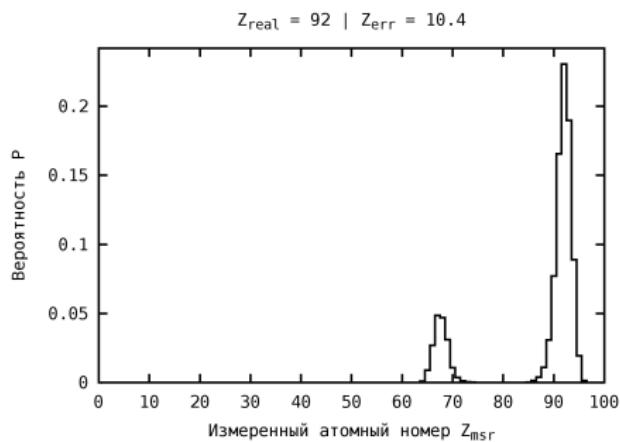
- ▶ В качестве тестового объекта выберем куб со стороной 10 см из урана.
- ▶ Ослабление тормозного спектра с верхней границей 9 МэВ при прохождении слоя урана толщиной 10 см составляет $\sim 10^4$.
- ▶ Средняя мощность пучка электронов для всех энергий выбрана равной 5 кВт, что эквивалентно среднему току 500 мкА электронов с кинетической энергией 10 МэВ.
- ▶ Количество первичных электронов обратно пропорционально их энергии.
- ▶ Измеренные в каждом пикселе значения прозрачностей усредняются по площади боковой грани куба, что уменьшает статистический разброс измеренных прозрачностей в 20 раз т.к. площадь боковой грани куба в 400 раз больше площади одного пикселя.



До оптимизации



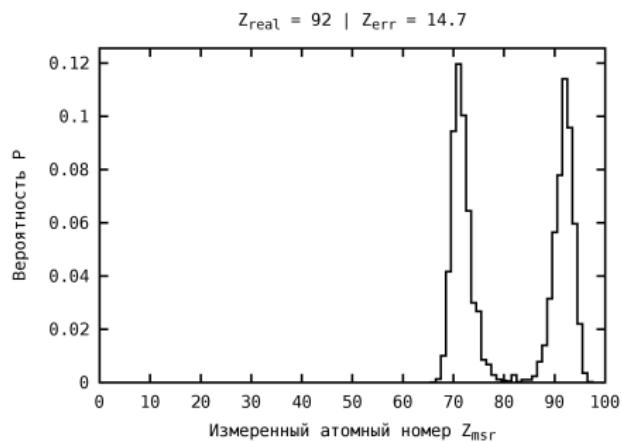
$T = 9,5 \text{ МэВ}$



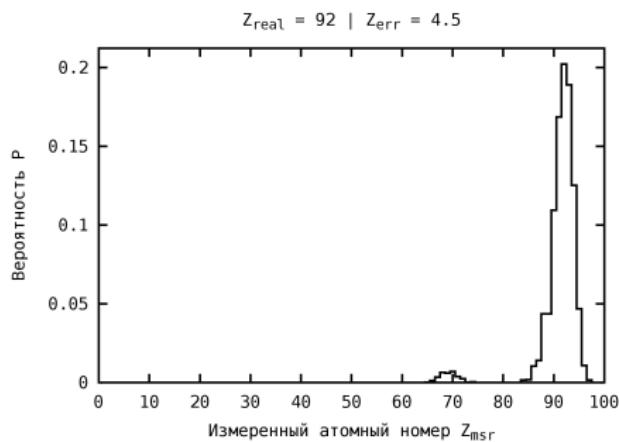
$T = 9,6,3 \text{ МэВ}$



После оптимизации



$T = 10, 5.5 \text{ МэВ}$



$T = 10, 5.5, 2 \text{ МэВ}$

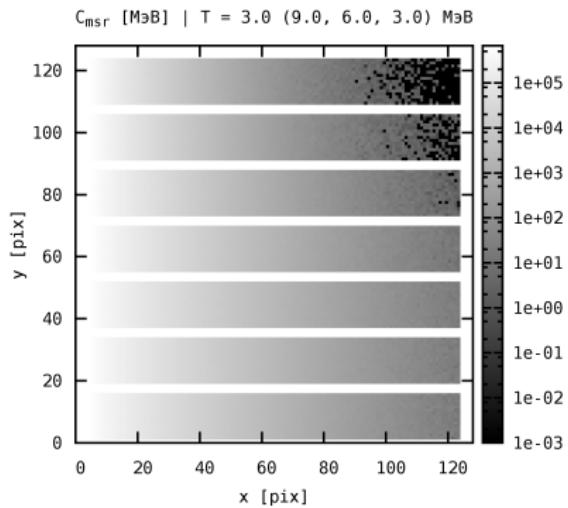
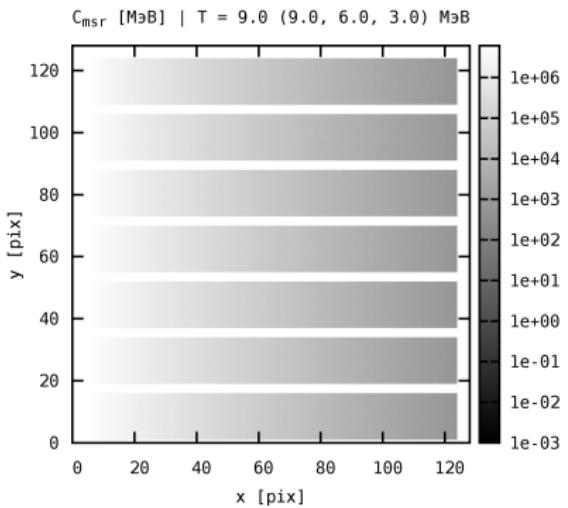


Тестовые объекты

- ▶ Минимальная толщина каждого клина равна 0.
- ▶ Материалы и максимальные толщины [см]: графит 201.5 (верхний объект), алюминий 116.3, железо 34.68, кадмий 28.09, вольфрам 11.03, свинец 18.03, уран 10.30 (нижний объект).
- ▶ Атомный номер объектов на изображении увеличивается сверху вниз.
- ▶ Толщина объектов на изображении увеличивается слева направо.
- ▶ Минимальная прозрачность всех объектов для спектра 9 МэВ составляет 10^{-4} .

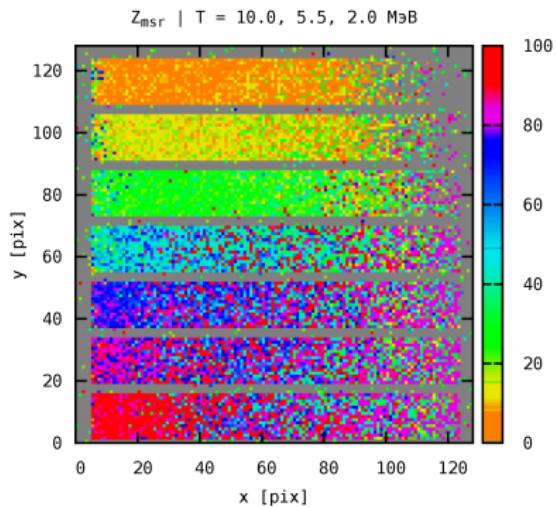
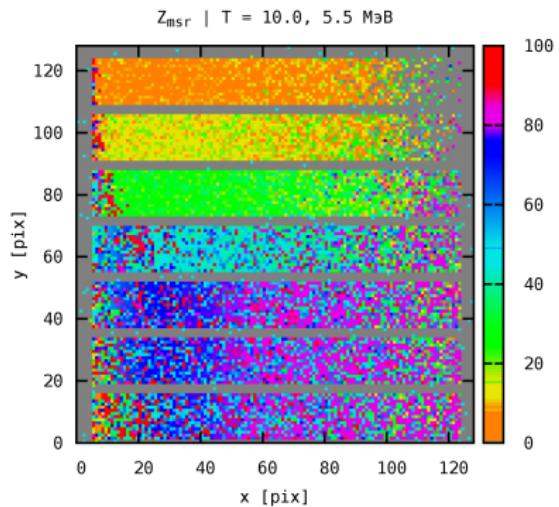


Тестовые объекты

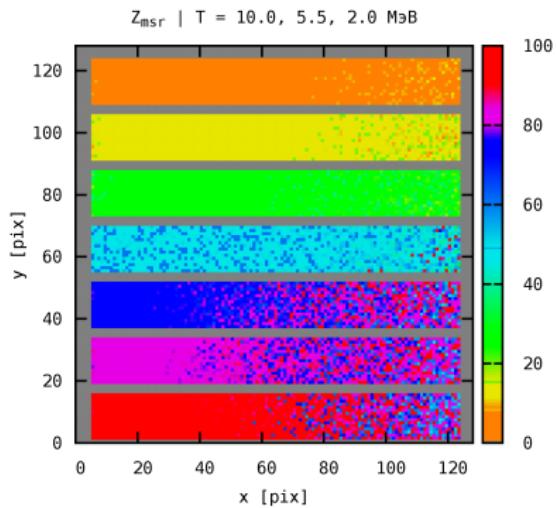
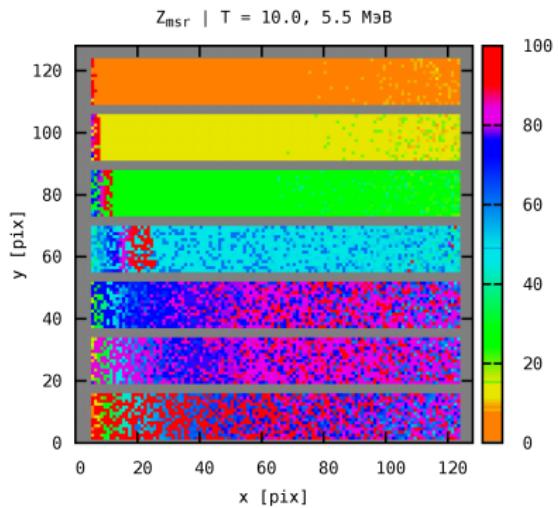


Изображение суммарной энергии выделенной в каждом пикселе детектора фотонами прошедшими через тестовые объекты.

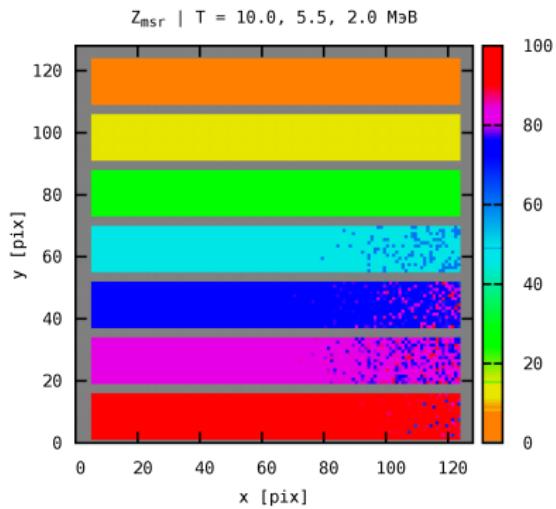
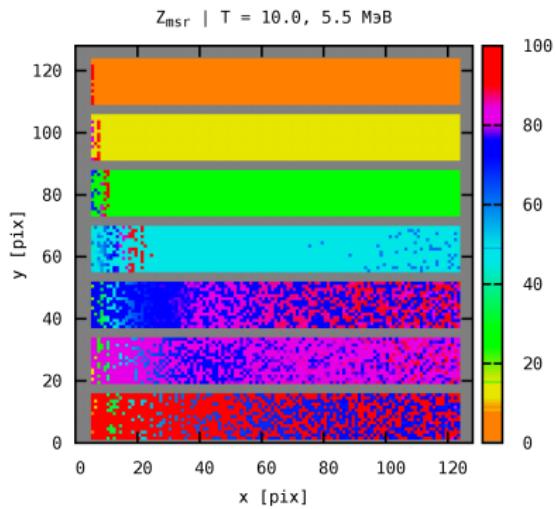


$P = 100 \text{ Вт}$ 

$$P = 10 \text{ } \kappa B_T$$



$$P = 1 \text{ MBT}$$



Введение

Взаимодействие фотонов с веществом

Экспериментальные измерения атомного номера объектов

Моделирование на GEANT4

Сравнение методов и оптимизация их параметров

Основные результаты, полученные в диссертации

1 – 2

3 – 5

6 – 7

Кратко



Основные результаты, полученные в диссертации

1. В результате анализа поведения сечений фотоэффекта, когерентного и некогерентного рассеяния, эффекта рождения электрон-позитронных пар, а также полных сечений взаимодействия фотонов с энергиями от 0.5 до 10 МэВ с атомами и атомными ядрами в зависимости от энергии фотона E и от атомного номера Z химического элемента, вкладов сечений отдельных процессов в полные сечения было установлено, что для определения элементов с Z меньше железа необходимо чтобы одна из энергий фотонов была >1.5 МэВ, а для определения элементов с Z больше вольфрама необходимо чтобы одна из энергий фотонов была <1.5 МэВ.
2. Впервые показано, что в области энергий фотонов от 0.5 до 10 МэВ наиболее характерные особенности поведения полных сечений наблюдаются при энергиях 0.5, 1.5, 3.7 и 10 МэВ. Следовательно, для определения среднего эффективного атомного номера Z вещества неизвестных объектов, посредством сравнения величин ослабления пучков монохроматических фотонов, целесообразно использование не более четырёх значений энергии фотонов. Показана необходимость использования не менее трёх энергий фотонов для однозначного определения Z .



Основные результаты, полученные в диссертации

3. Показано, что при использовании радиоактивных изотопов Cs-137 и Co-60 в качестве источников монохроматических фотонов, отношение логарифмов прозрачностей для различения веществ с $Z < 5$ необходимо измерять в 100 - 1000 раз точнее, чем для различия веществ с $Z > 40$.
4. Впервые проведено экспериментальное измерение среднего эффективного атомного номера вещества тестовых образцов, посредством сравнения величин ослабления пучков тормозного излучения при четырёх энергиях ускорителя электронов с перестраиваемой энергией - 7.3, 6.2, 5.5 и 3.5 МэВ. Согласие измеренных и ожидаемых значений Z подтверждает необходимость использования как минимум трёх энергий ускорителя электронов.
5. Впервые определены области атомных номеров Z и величин ослабления $1/K$ объектов, в пределах которых, при просвечивании тормозным излучением при двух энергиях ускорителя электронов, атомный номер измеряется однозначно. Определены величины отличий между измеренными и истинными значениями Z в области, в которой Z измеряется неоднозначно. Показано, что причиной возникновения неоднозначности является пересечение параметрических кривых в двухмерном пространстве прозрачностей K .



Основные результаты, полученные в диссертации

6. Впервые показана возможность однозначного измерения атомного номера объектов при просвечивании тормозным излучением при трёх энергиях ускорителя электронов. Проведено сравнение методов, использующих тормозное излучение с двумя и тремя энергиями. Показано, что использование трёх энергий позволяет в ряде случаев существенно улучшить результаты измерения Z .
7. Впервые получены оптимальные значения энергий ускорителя электронов, для методов с двумя и тремя энергиями, при которых достигается наилучшая точность измерения атомных номеров $Z > 74$, посредством сопоставления измеренных величин ослабления тормозного излучения. Впервые выполнено сравнение точностей методов измерения атомных номеров Z в широком диапазоне Z и радиоскопических прозрачностей K при различных мощностях, количествах и значениях энергий ускорителя электронов. Показано преимущество метода использующего три энергии.



Основные результаты, полученные в диссертации

1. установлено: $Z < 26 \Rightarrow E_\gamma > 1.5 \text{ МэВ}$, $Z > 74 \Rightarrow E_\gamma < 1.5 \text{ МэВ}$
2. впервые показано: оптимальные $E_\gamma = 0.5, 1.5, 3.7$ и 10 МэВ , $N_{\min} = 3$, $N_{\max} = 4$
3. показано для $R = \ln K_{Co} / \ln K_{Cs}$: $\Delta R(Z > 40) / \Delta R(Z < 26) \lesssim 10^3$
4. впервые проведено измерение на ускорителе с $N_T = 4$, $T_e = 7.3, 6.2, 5.5$ и 3.5 МэВ
5. впервые определены области Z и K при $N_T = 2$ в которых Z идентифицируется однозначно, определены ΔZ в области неоднозначности, показана причина неоднозначности
6. впервые показана возможность однозначной идентификации Z при $N_T = 3$, проведено сравнение $N_T = 2$ и $N_T = 3$
7. впервые получены оптимальные T_e , для $N_T = 2$ и $N_T = 3$, при которых $\Delta Z \rightarrow \min$ для $Z > 74$, впервые выполнено сравнение ΔZ в широком диапазоне Z и K при различных P , N_T и T_e , показано преимущество $N_T = 3$



Автор выражает благодарность

- ▶ научному руководителю, профессору Б.С. Ишханову за постоянную поддержку и помощь в проведении исследований, ценные замечания и советы
- ▶ профессору В.И. Шведунову за многочисленные консультации и помощь в работе



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

