



Источник излучения для медицинской
рентгенографии, основанный на использовании
излучения электронов при каналировании в
кристаллах

Полозов С.М.
Башмаков Ю.А.
Бондаренко Т.В.



ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Требуемая энергия излучения:

- 15 кэВ - маммография,
- 100-120 кэВ – рентгенография грудной клетки,
- 33 кэВ – ангиография (энергия пика поглощения йодного контрастного вещества)
- Требуемый поток фотонов - 10^4 фотонов/(мм²·кадр) или 10^9 фотонов/кадр (поле до 300x300 мм²)



Установка для ангиографии



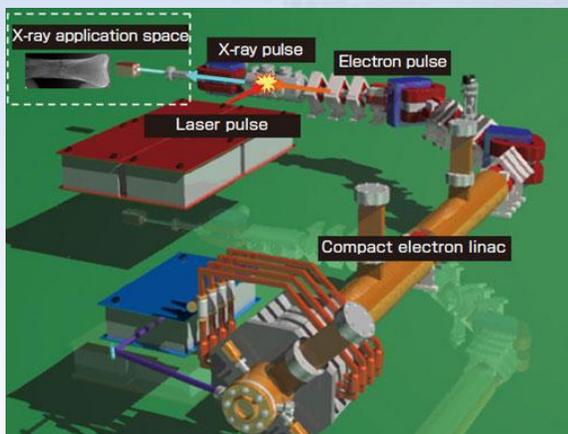
Рентгеновская трубка

ИСТОЧНИКИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

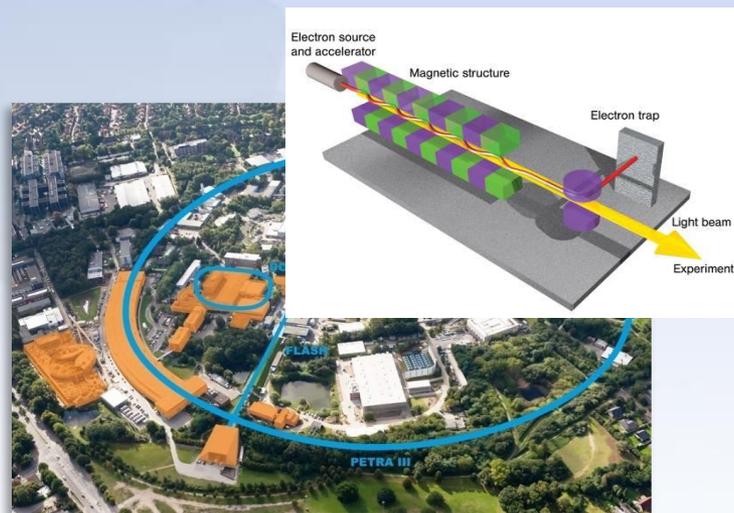
Монохроматическое излучение не может быть получено с использованием обычных рентгеновских трубок

Возможные методы получения монохроматического рентгеновского излучения:

- Синхротронное/ондуляторное излучение
- Комptonовское рассеяние
- Характеристическое излучение
- Излучение электронов в кристаллах



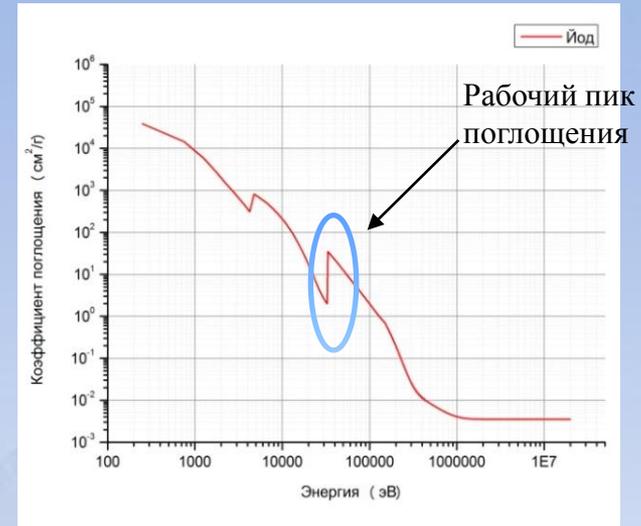
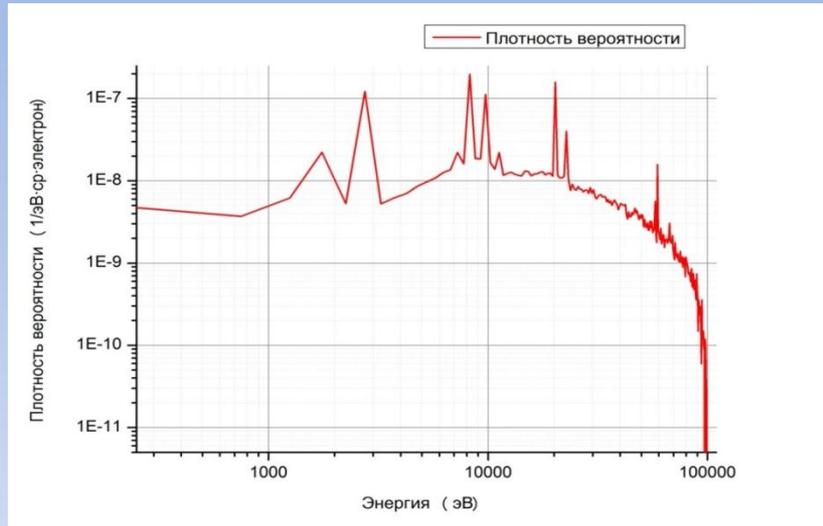
AIST (Комptonовское рассеяние)



X-FEL (ондулятор)



ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ



Спектр излучения трубки при 100 кэВ
с анодом из W/Re

Коэффициент поглощения йода

- Фотоны с энергией < 15 кэВ поглощаются в тканях \Rightarrow необходима фильтрация (Al/Be фильтры)
- Фотоны с энергиями > 40 кэВ дают основной вклад в дозу и уменьшают контрастность изображения \Rightarrow необходима специфическая система фильтрации

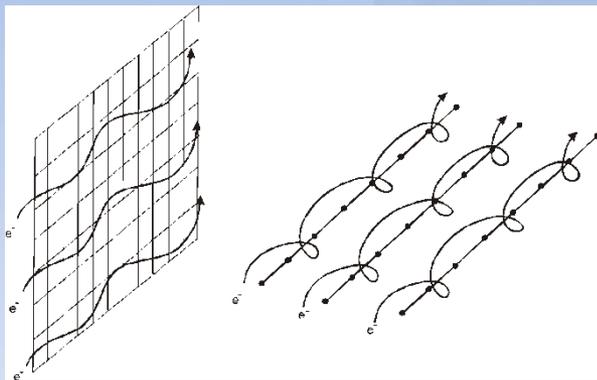
Энергия фотонов, кэВ	Мозаичный кристалл	Спиральный отражатель	Скользкая оптика	Многослойное зеркало	Поликапилляр
17	58	35	10	57	60
33	4,2	0,04	~0	10	40



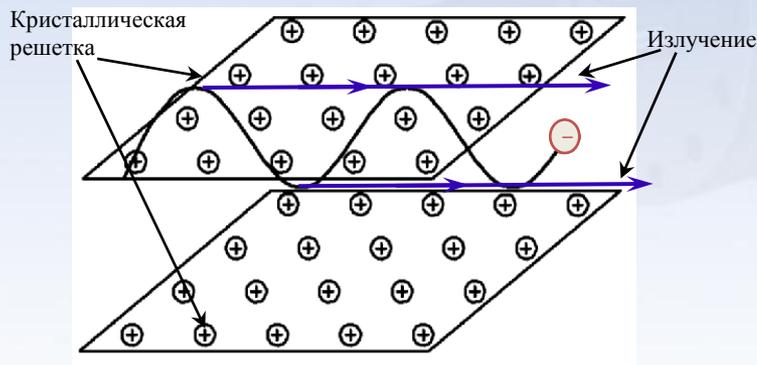
КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ



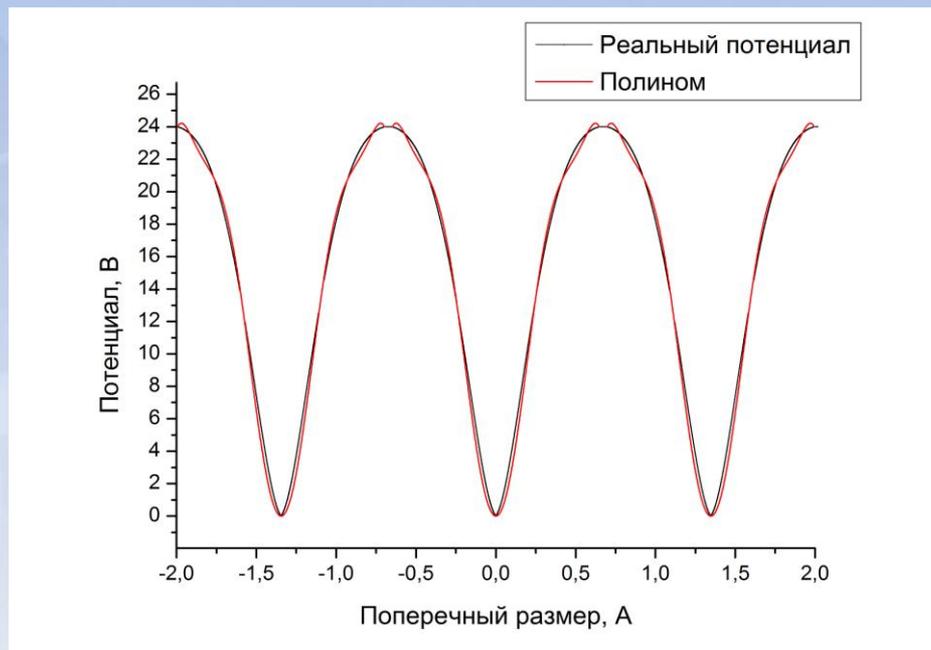
Излучение при каналировании: ЭМИ, возникающее при движении заряженной частицы в кристалле вдоль одной из кристаллографических плоскостей симметрии.



Плоскостное и аксиальное каналирование



Движение электрона между двумя плоскостями



Распределение потенциала вдоль плоскости $\langle 110 \rangle$ в кристалле алмаза и его полиномиальные аппроксимации



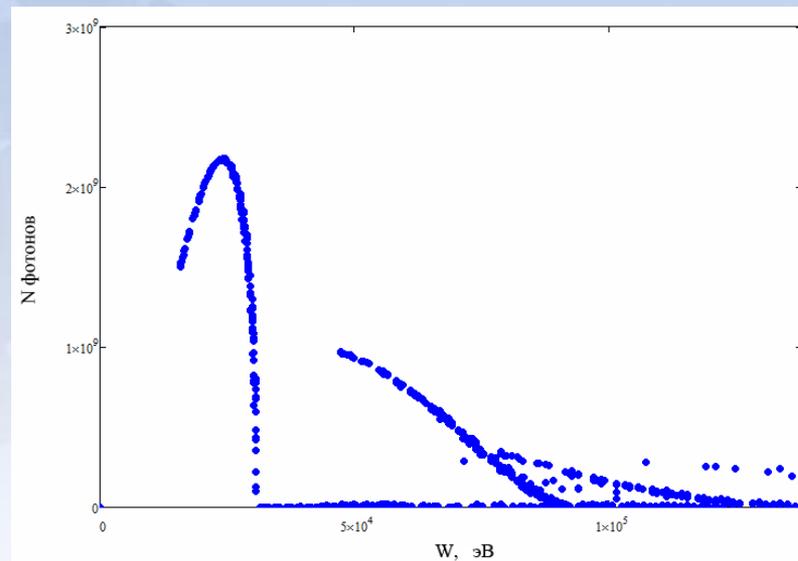
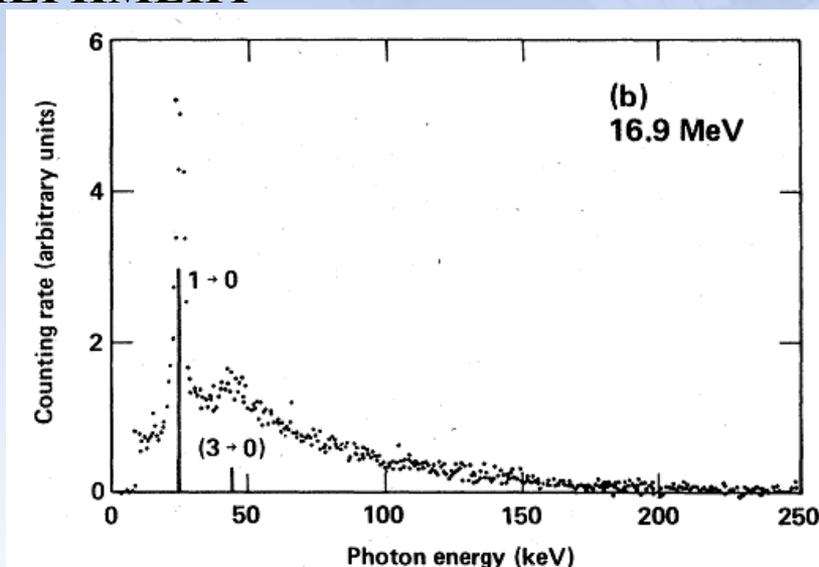
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



ТЕОРИЯ

- Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц // УФН 99 с. 249-296 (1969)
- Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Черенков П.А. Излучение релятивистских электронов в магнитном ондуляторе // УФН 157 с. 389–436 (1989).
- Bashmakov Yu.A., Bessonov E.G., On certain features of particle radiation in natural undulators-crystals, Rad. Eff. 1982. V. 66, p. 85-94

ЭКСПЕРИМЕНТ



Экспериментальный спектр КИ* и спектр BEAMDULAC-CR

*R.K. Kein, J.O. Kephert, R.H. Pantell, et al. Electron channeling radiation from diamond / Physical review B vol. 31, N 1, 1985, p. 68 – 92



КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА



$$\Omega_n = \sqrt{2} \cdot \Omega_0 \quad \Omega_0 = \frac{c}{d} \sqrt{\frac{2eU_0}{\varepsilon}}$$
$$\omega_k = \frac{2k\Omega\gamma^2}{1+\theta^2\gamma^2} \quad P = \frac{2e^2 \langle E^2 \rangle \gamma^2}{3mc^2}$$

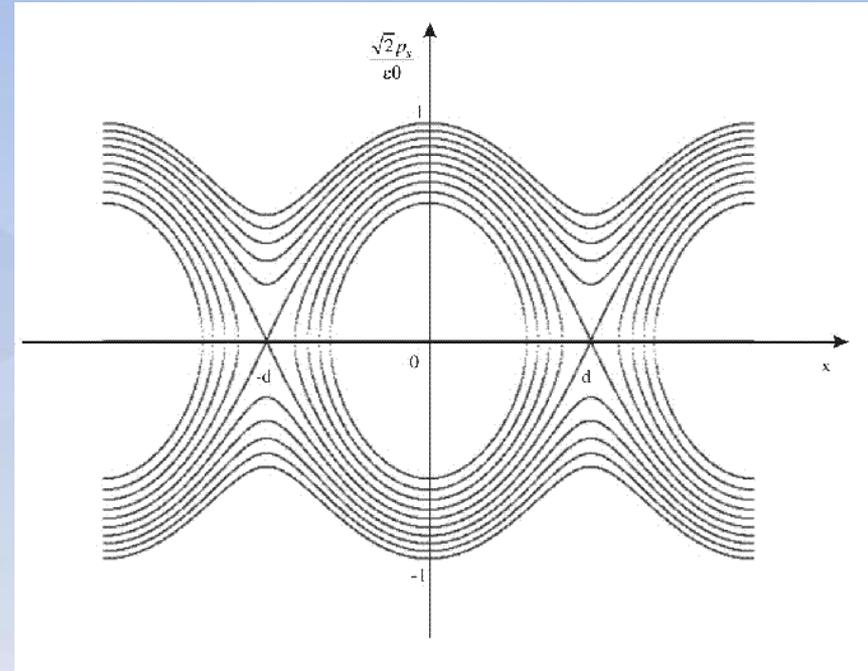
$$\frac{d\gamma}{dt} = 0,$$

$$\frac{dz}{dt} = v_z,$$

$$\frac{dv_x}{dt} = -e \frac{\partial U(x)}{\partial x}, \quad U(x) = U_0 \sum_{n=0}^N a_n \left(\frac{x}{d} \right)^n$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x.$$

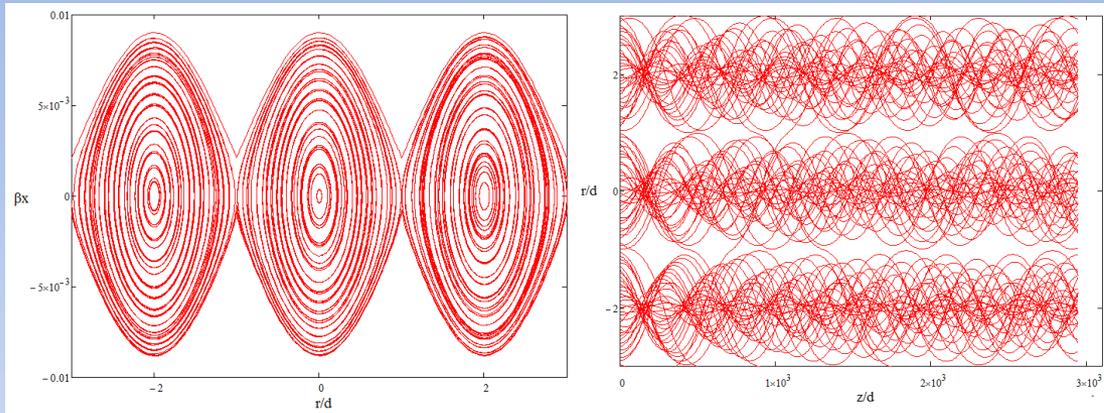
$$|x| < d$$



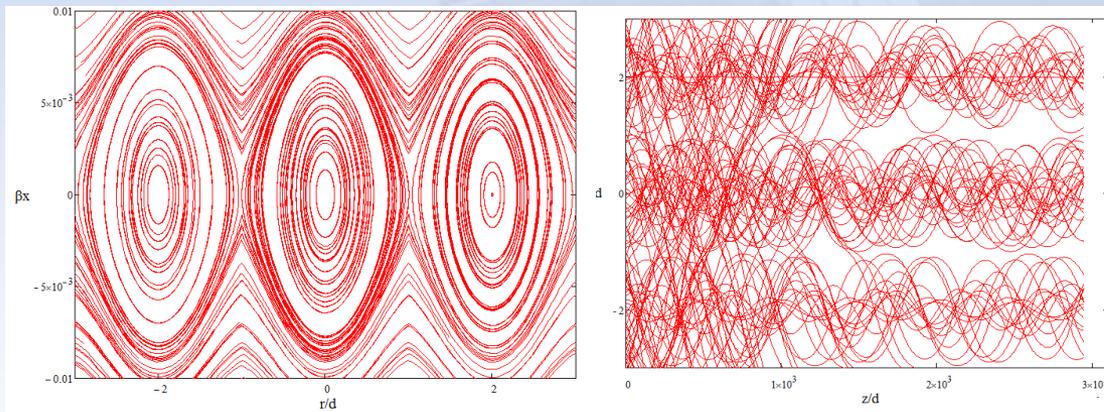
Yu.A. Bashmakov, E.G. Bessonov
// Rad. Eff. 66. 1982. P. 85.



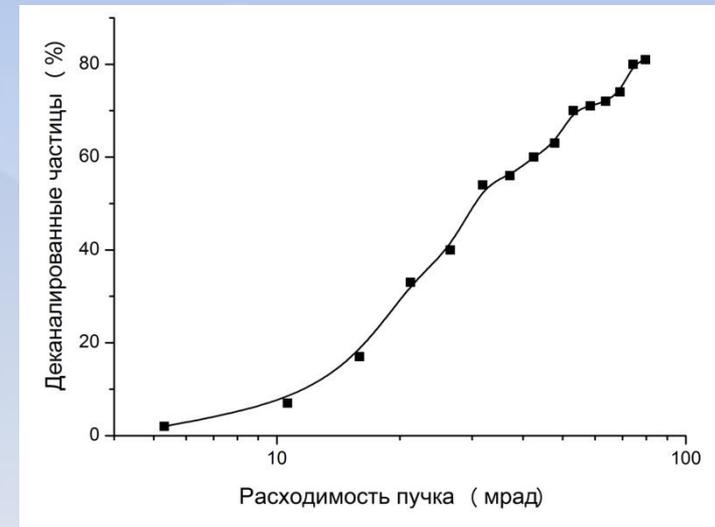
КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА



Фазовые траектории и зависимость поперечных координат частиц от продольной координаты (энергия 21 МэВ, расходимость 10 мрад, $\delta E/E=1\%$)



Фазовые траектории и зависимость поперечных координат частиц от продольной координаты (энергия 23 МэВ, расходимость 30 мрад, $\delta E/E=1\%$)



Зависимость деканализованных частиц от расходимости пучка электронов (23 МэВ)

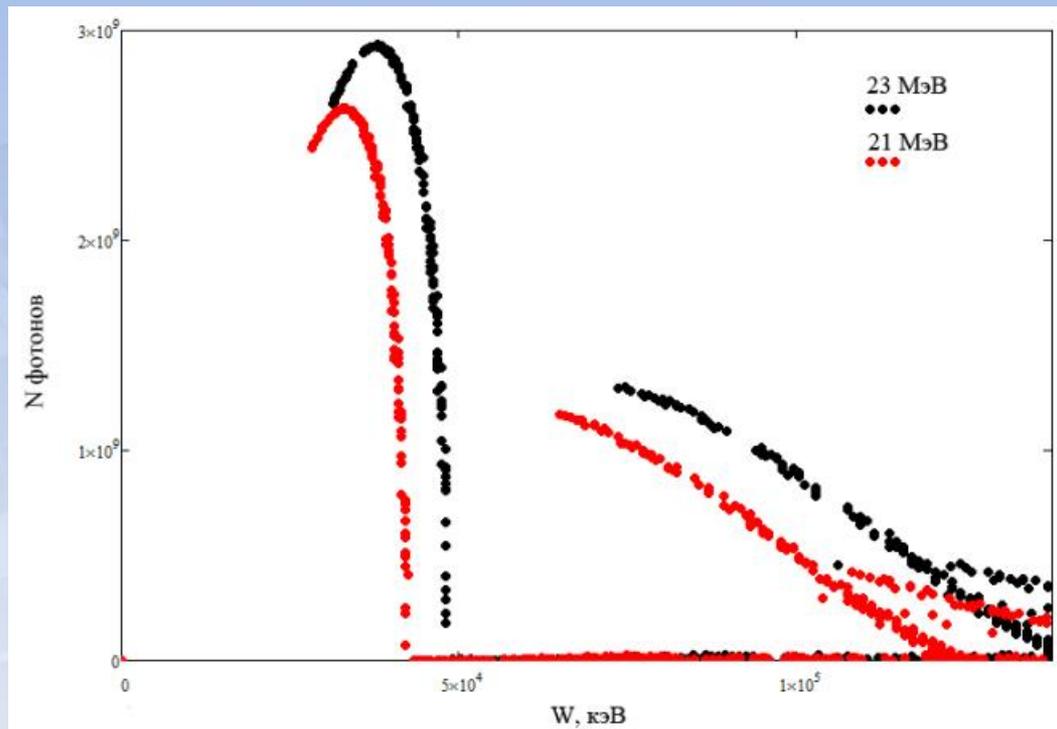


ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ



Излучение при каналировании представляет собой конус с углом раствора $\Theta \sim \gamma^{-1}$

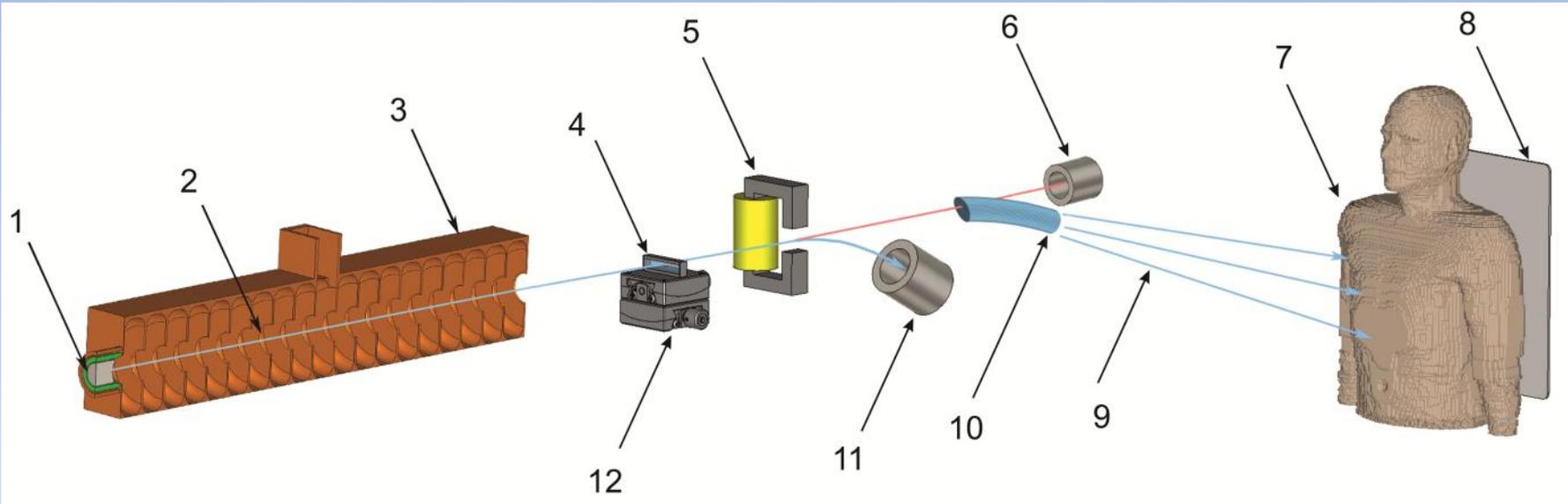
Спектр основной гармоники КИ:
 $33 \pm 2,4$ кэВ (21 МэВ)
 $37 \pm 2,9$ кэВ (23 МэВ)



Спектры излучения при каналировании при токе пучка 10 мА, импульс 10 мкс



ИСТОЧНИК КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ



Принципиальная схема установки для генерации рентгеновского излучения

- 1 – источник электронов
- 2 – траектория пучка электронов
- 3 – линейный ускоритель
- 4 – кристаллическая мишень
- 5 – отклоняющий магнит
- 6 – нагрузка для высокоэнергетического излучения
- 7 – пациент

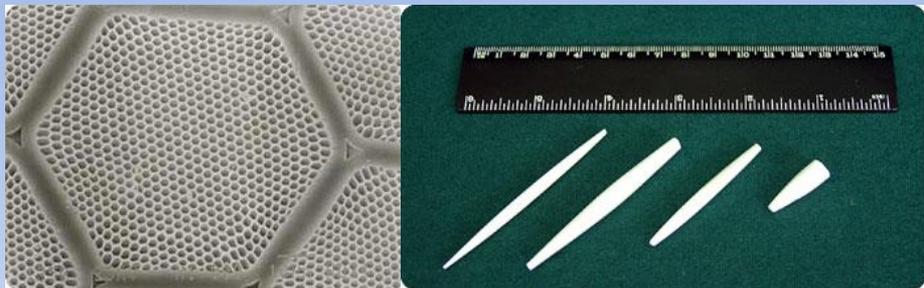
- 8 – детектор
- 9 – квазимонохроматическое рентгеновское излучение
- 10 – рентгеновская оптика
- 11 – нагрузка для пучка электронов
- 12 – гониометр с фиксатором кристаллической мишени



РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА И ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ



РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА

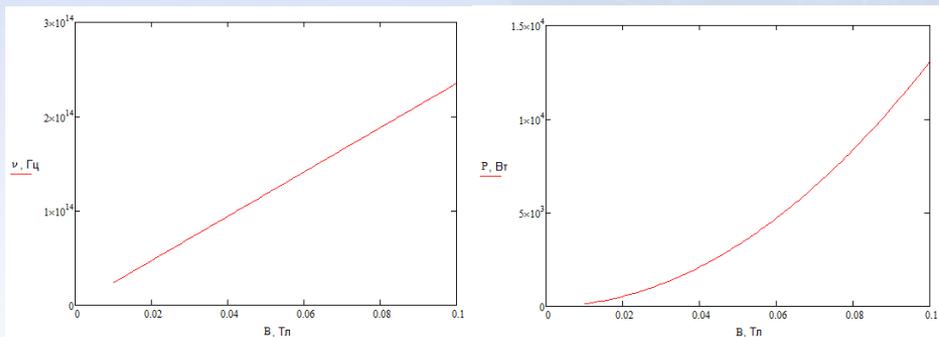


Рентгеновская поликапиллярная линза*

- Энергия излучения: <40 кэВ
- Угол захвата: 2 градуса
- Длина линзы: 10 см
- Угол поворота излучения: 10-15 градусов
- Радиус капилляра: 1 мкм
- КПД линзы: 40 %

*Kumakhov M.A., Komarov F.F. Multiple reflection from surface X-ray optics // Physics reports (Review section of physics letters) 1991, No. 5 (1990) 289-350. North Holland

ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ

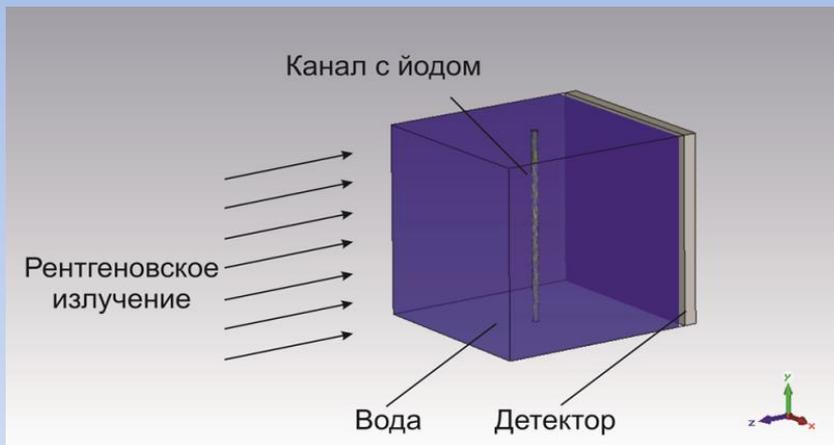


Зависимость частоты (слева) и мощности (справа) синхротронного излучения от индукции отклоняющего поля

- Размеры полюсов: 5x5 см
- Угол поворота пучка: 45 градусов (23 МэВ)
- Индукция магнитного поля: 24 мТл
- Частота синхротронного излучения: $5,6 \cdot 10^{13}$ Гц
- Мощность излучения: 10,7 Вт (100 мА)

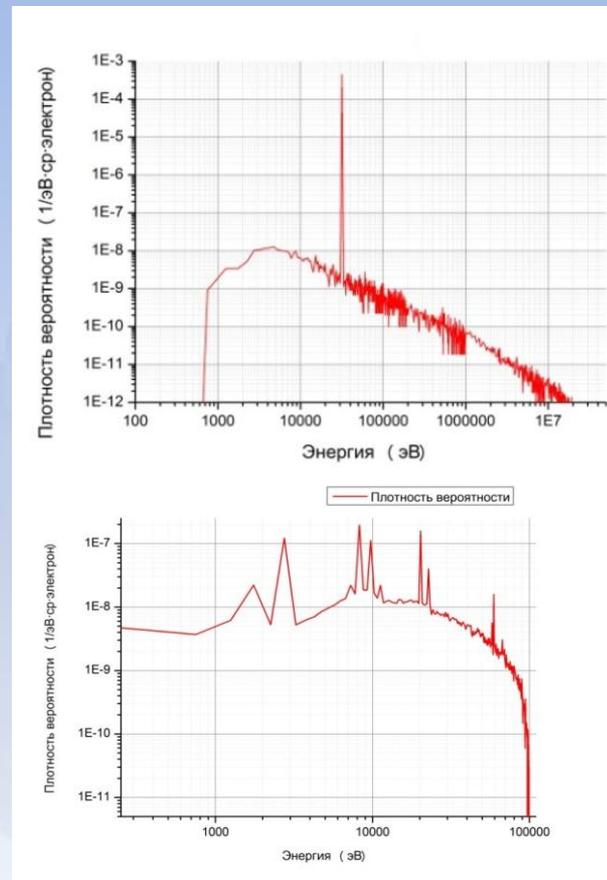


ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК



Модель тканеэквивалентного фантома

- Материал – вода
- Размеры – 30x30x30 см
- Контрастное вещество – раствор йода 10%
- Диаметр канала с контрастом – 1 мм



Спектры КИ и рентгеновской трубки с учетом тормозного излучения, рассчитанного в RuPENELoPE



ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК



$$I_{\text{пр}} = \sum_{W_i} K \cdot I(W_i) \cdot W_i \cdot e^{-\mu/\rho(W_i) \cdot \rho \cdot l}$$

$$I_{\text{погл}} = \sum_{W_i} K \cdot I(W_i) \cdot W_i \cdot (1 - e^{-\mu/\rho(W_i) \cdot \rho \cdot l})$$

$$D = \frac{\sum_{W_i} K \cdot I(W_i) \cdot W_i \cdot (1 - e^{-\mu/\rho(W_i) \cdot \rho \cdot l})}{m}$$

$I_{\text{пр}}$ – интенсивность прошедшего излучения, $I_{\text{погл}}$ – поглощенная интенсивность излучения, D – поглощенная доза, K – число электронов от источника, W_i – энергия фотонов, $I(W_i)$ – вероятность излучения фотонов, $\mu/\rho(W_i)$ – коэффициент поглощения вещества, ρ – плотность вещества, l – путь, проходимый излучением в объекте, M – масса облучаемого объекта



ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК



Дозовые нагрузки и контрастность источников при пересчете
на 10^{12} электронов в сгустке

Спектр излучения	Число фотонов	Энергия излучения, Дж	Поглощенная доза, Зв	Контрастность
Источник КИ, 21 МэВ				
Полный спектр	$6,40 \cdot 10^{11}$	0,13	$2,30 \cdot 10^{-3}$	-
15 кэВ – 21 МэВ	$6,40 \cdot 10^{11}$	0,13	$2,30 \cdot 10^{-3}$	-
15 – 40 кэВ (оптика)	$2,28 \cdot 10^{11}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	1,11
Источник КИ, 23 МэВ				
Полный спектр	$1,01 \cdot 10^{12}$	0,13	$2,40 \cdot 10^{-3}$	-
15 кэВ – 23 МэВ	$1,01 \cdot 10^{12}$	0,13	$2,40 \cdot 10^{-3}$	-
15 – 40 кэВ (оптика)	$3,78 \cdot 10^{11}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$8,12 \cdot 10^{-5}$	4,10
Рентгеновская трубка				
Полный спектр	$2,67 \cdot 10^{10}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-6}$	-
15 кэВ – 100 кэВ	$2,22 \cdot 10^{10}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$5,60 \cdot 10^{-6}$	1,38



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

