



О различных типах контраста в синхротронной и нейтронной интроскопии

К.М. Подурец



НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Схема интроскопии

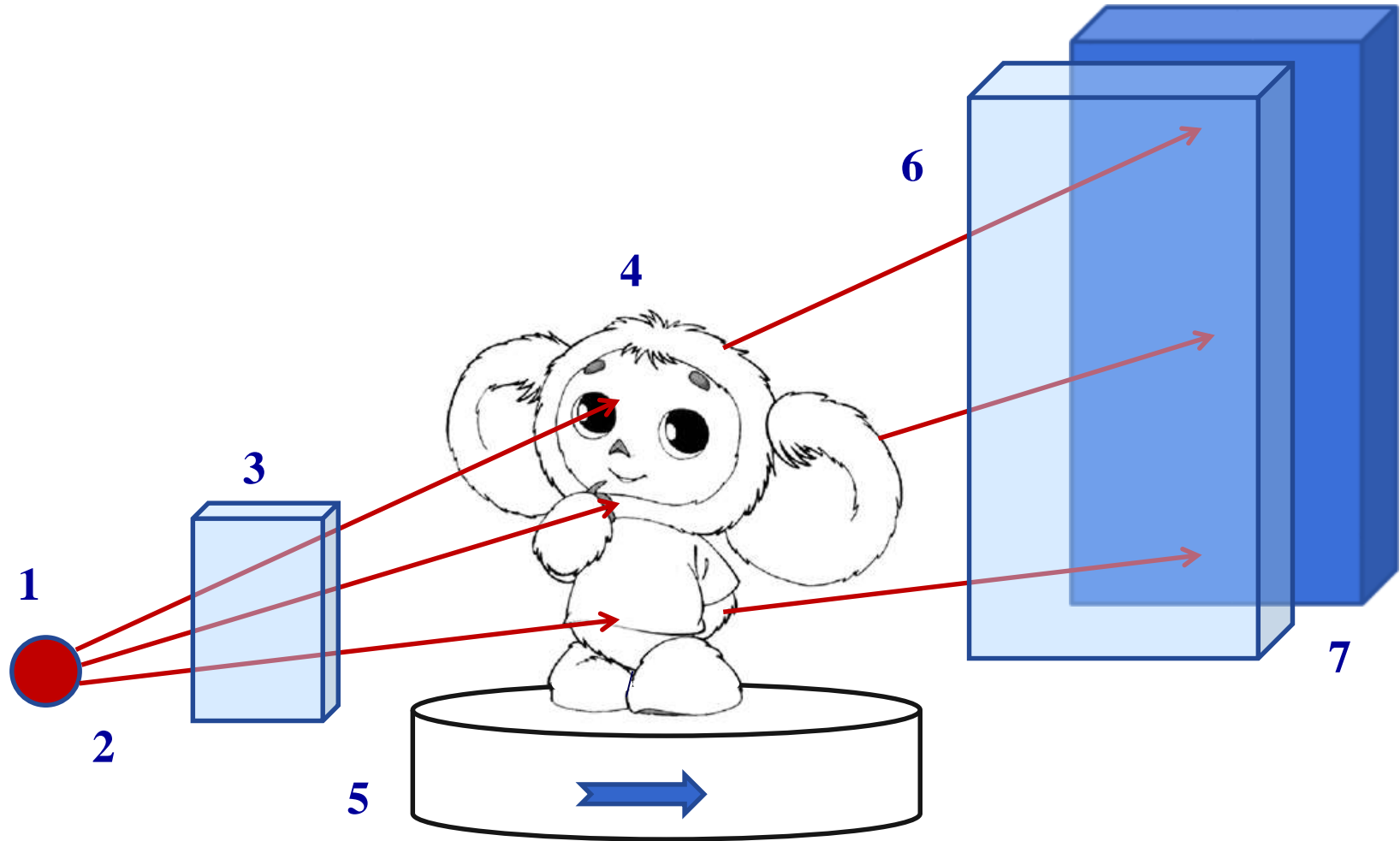


Схема интроскопического исследования: 1 – источник, 2 – излучение, 3 – формирователь, 4 – объект, 5 – поворотное устройство, 6 – анализатор, 7 – 2-D детектор.

Цель исследования

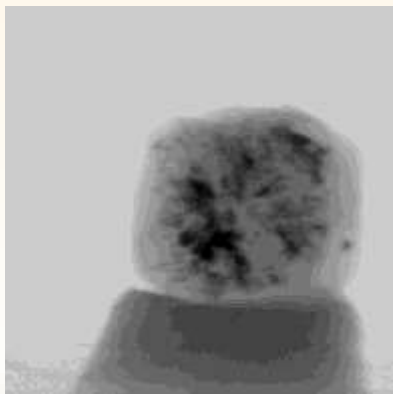
$$I(x) = I(0)e^{-\mu x}$$

$$\mu = \sigma_{tot} \frac{\rho N_A}{A}$$

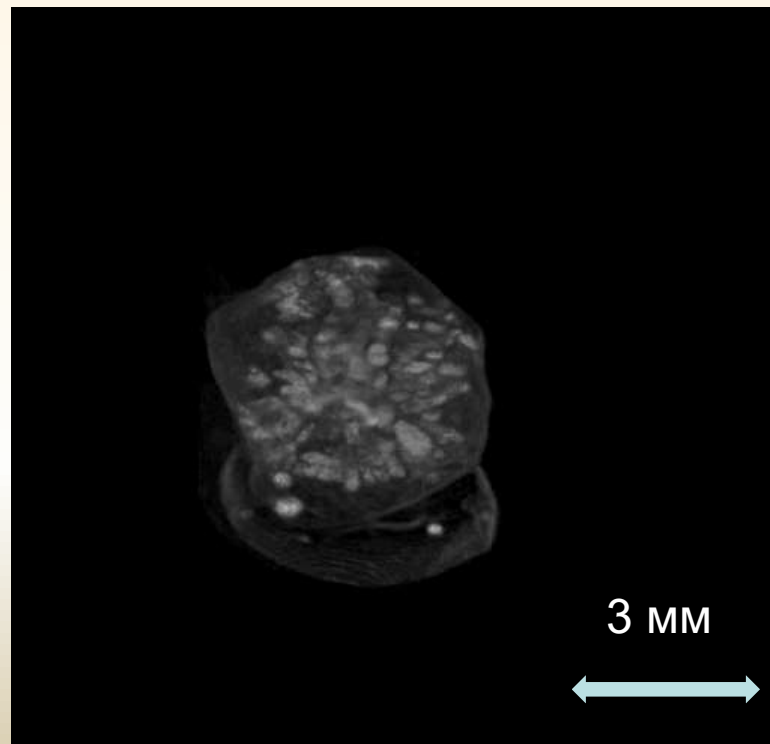
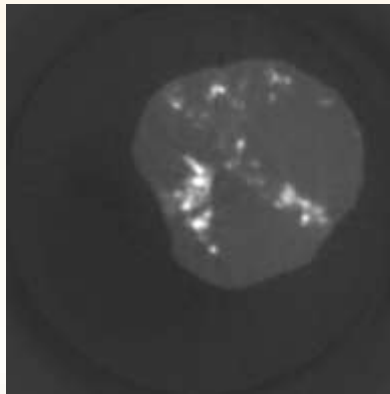
Цель: $\mu(x, y, z)$
 $\delta(x, y, z)$
 $?(x, y, z)$

3-D модель

Проекция



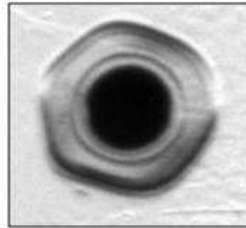
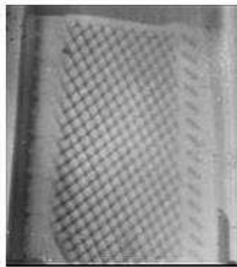
Срез



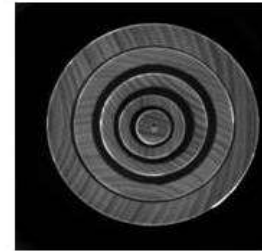
Кристалл алмаза с включениями (СИ)

Основные применения

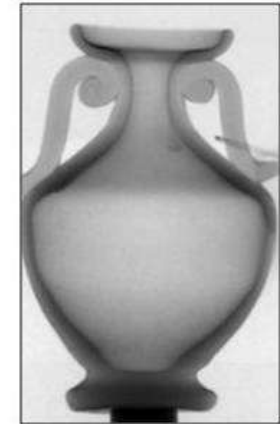
Турбинная лопатка



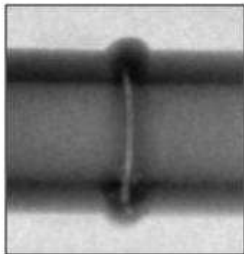
Микротвэл



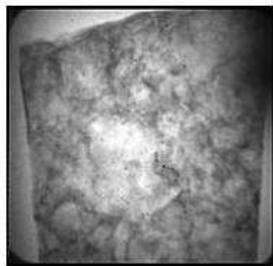
Матрешка



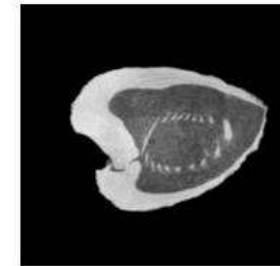
Сувенирная амфора



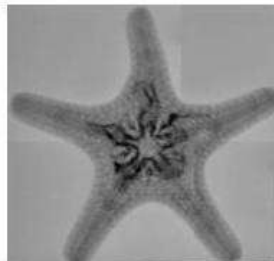
Сварной шов



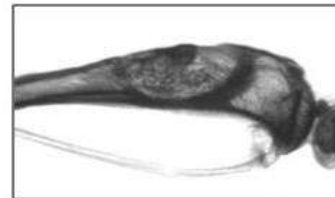
Железо-каменный метеорит



Ископаемая брахиопода



Морская звезда



Кость крысы после трансплантации



Бедро крысы со злокачественной опухолью

**Часто бывает, что абсорбционный
контраст при рентгеновском
просвечивании недостаточен.**

Что делать?

Разные типы излучения

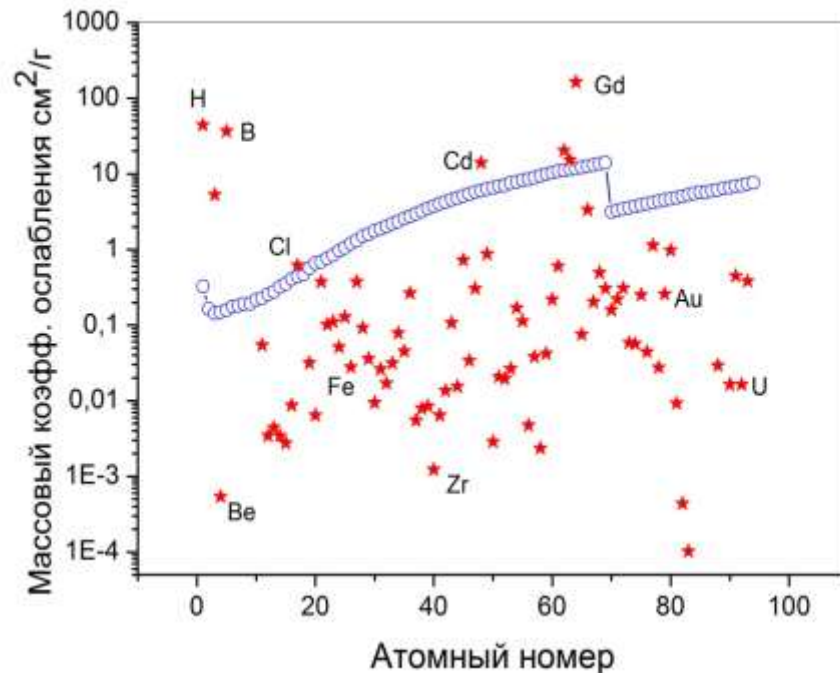
- ❑ Синхротронное излучение
- ❑ Нейтроны
- ❑ ...

Источники контраста и физические основы вариации контраста

- ❑ Поглощение (основной)
- ❑ Дифракция
- ❑ Фазовый сдвиг
- ❑ Малоугловое рассеяние

Виды излучения

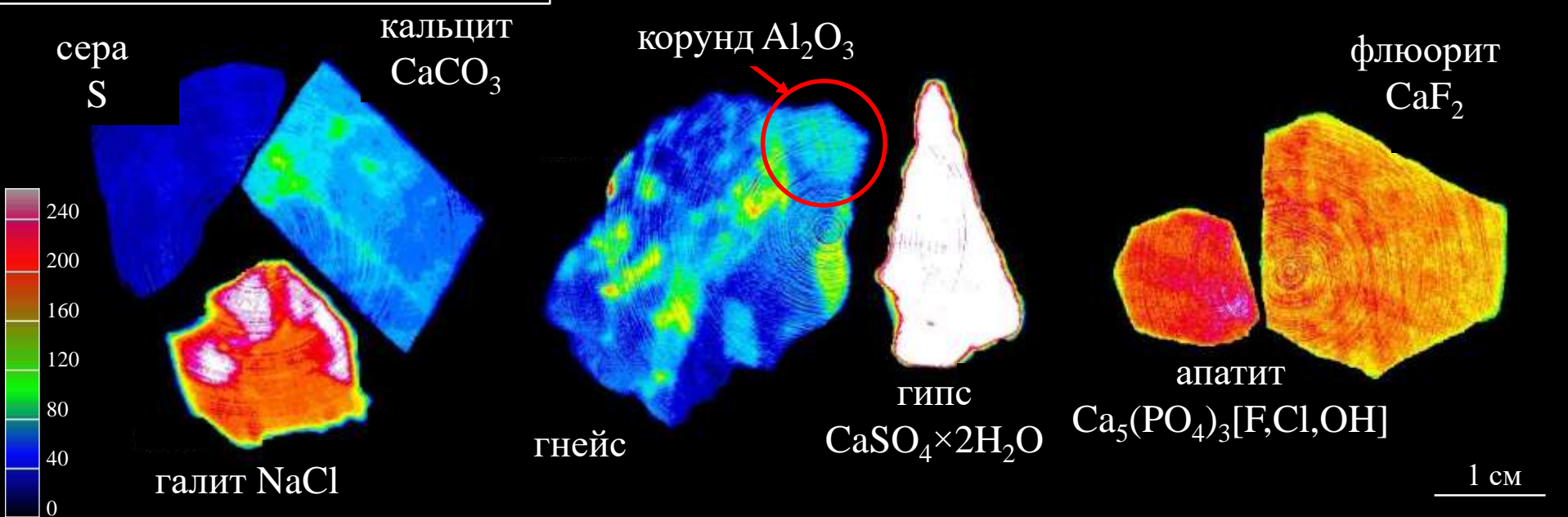
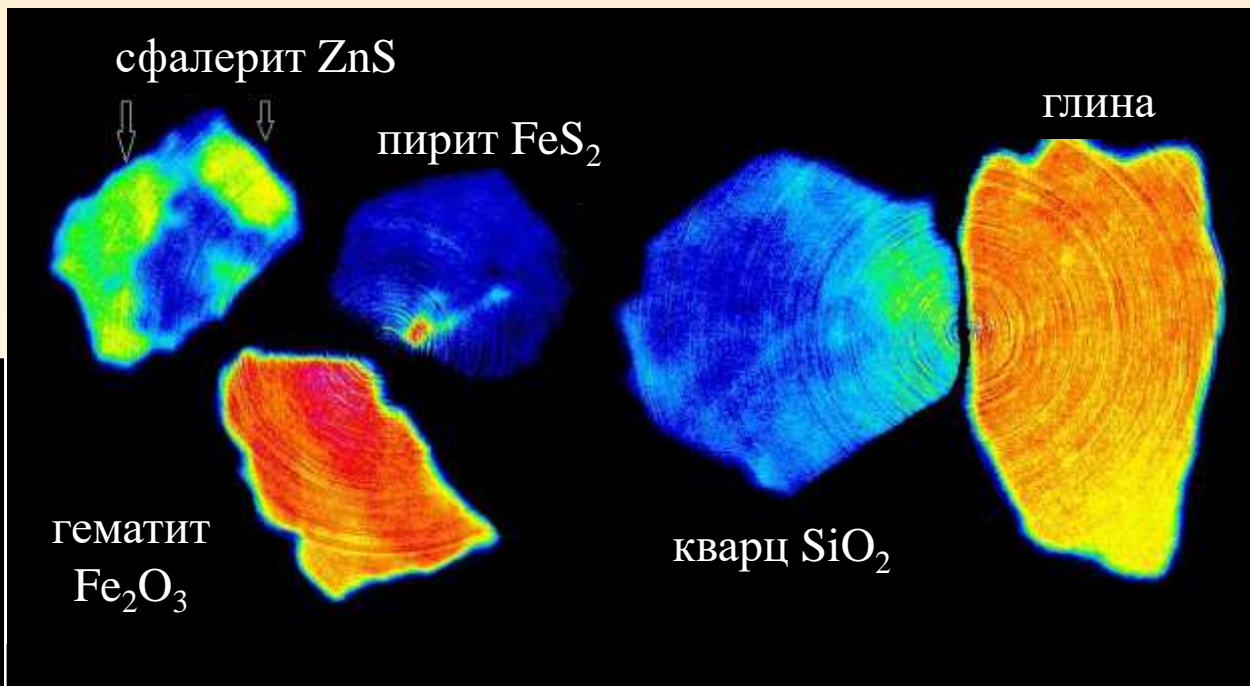
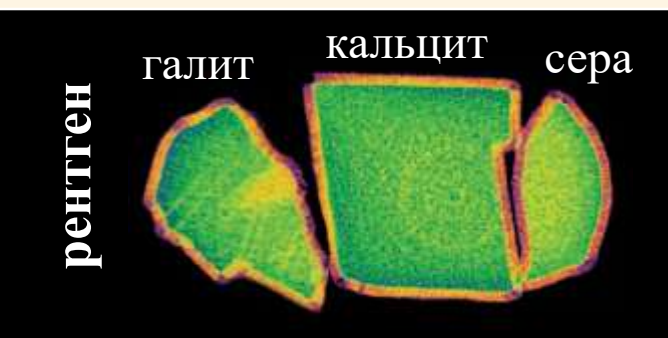
Рентген	Нейтроны
Э/м взаимодействие	Ядерное взаимодействие
Плавная зависимость величин взаимодействия от атомного номера	Нерегулярная зависимость величин взаимодействия от атомного номера
Высокое разрешение (<10 мкм)	Низкое разрешение (>100 мкм)
Быстро	Медленно
Не различает вещества близкой плотности	Различает вещества близкой плотности
Не различает легкие на фоне тяжелых	Различает легкие на фоне тяжелых



Зависимость массового коэффициента поглощения для тепловых нейтронов (звездочки) и рентгеновских лучей энергией 60 кэВ (кружки) от атомного номера элемента.

Поглощение: нейтроны vs рентген

Нейтронная томография групп минералов, горных и осадочных пород, которые неотличимы в стандартной рентгеновской томографии.



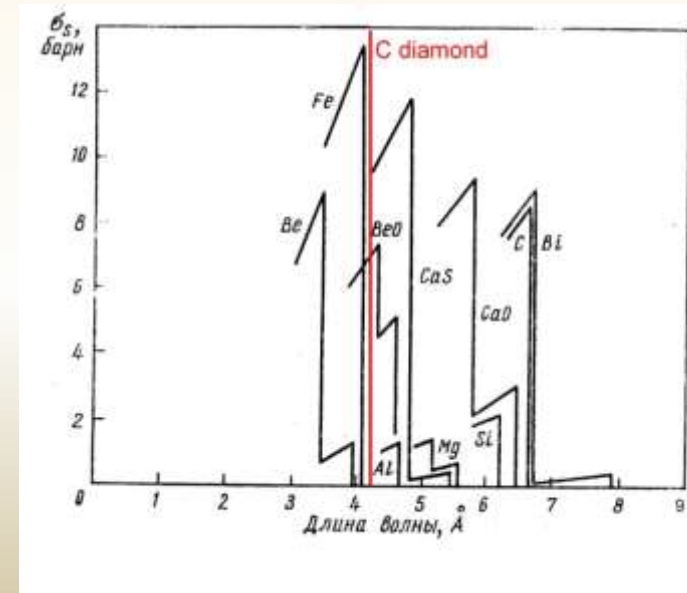
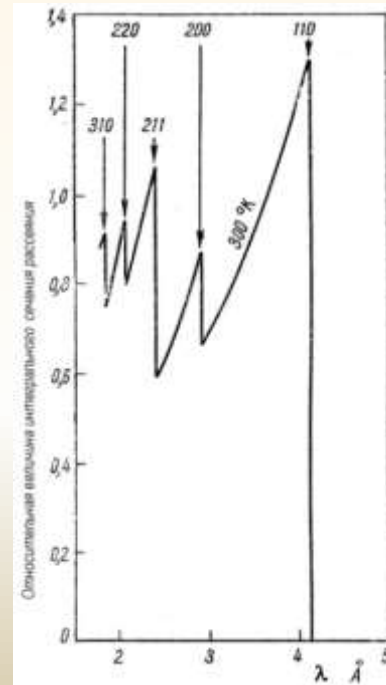
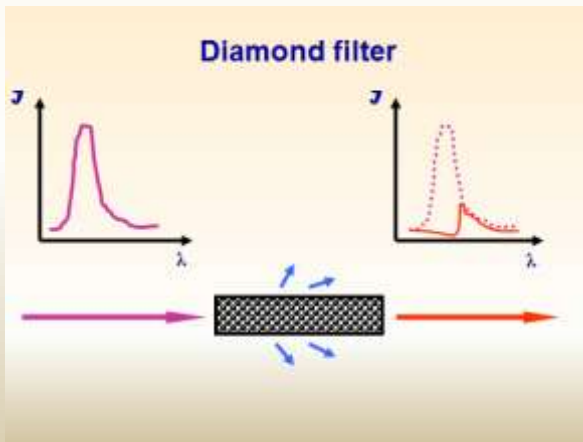
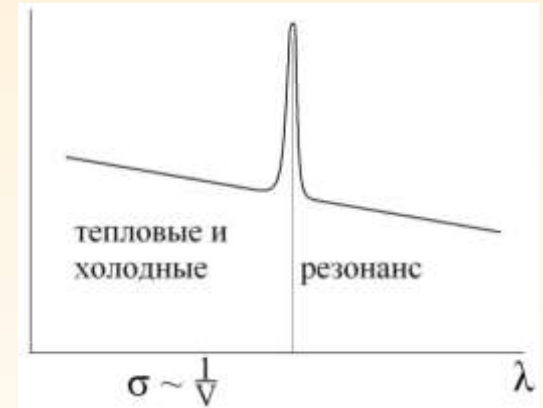
Энергетическая зависимость нейтронных сечений

поглощение

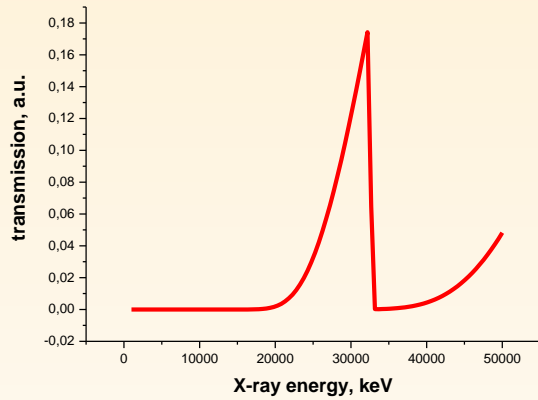
- Тепловые и холодные нейтроны
 - Резонансные нейтроны
- $\sigma \sim 1/V$ ($10^{-3} - 10^3$ барн)

дифракция

- Монохроматические
 - Фильтрованные нейтроны
- (10^{-1} барн)



Энергетическая зависимость рентгеновских сечений



К-край
иода

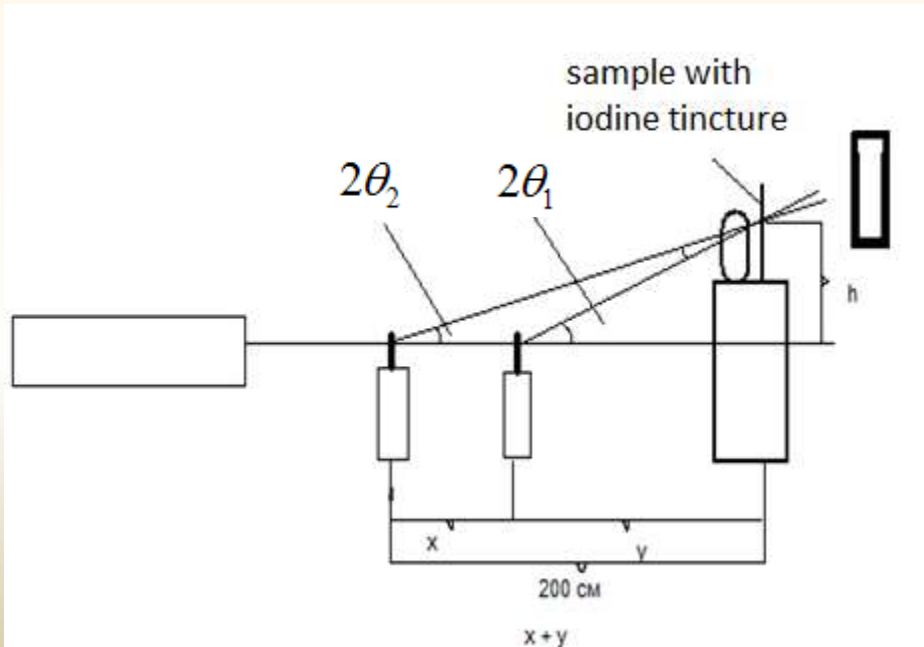
Картинка при $E_1=32,1$ keV



Картинка при $E_2=33,5$ keV

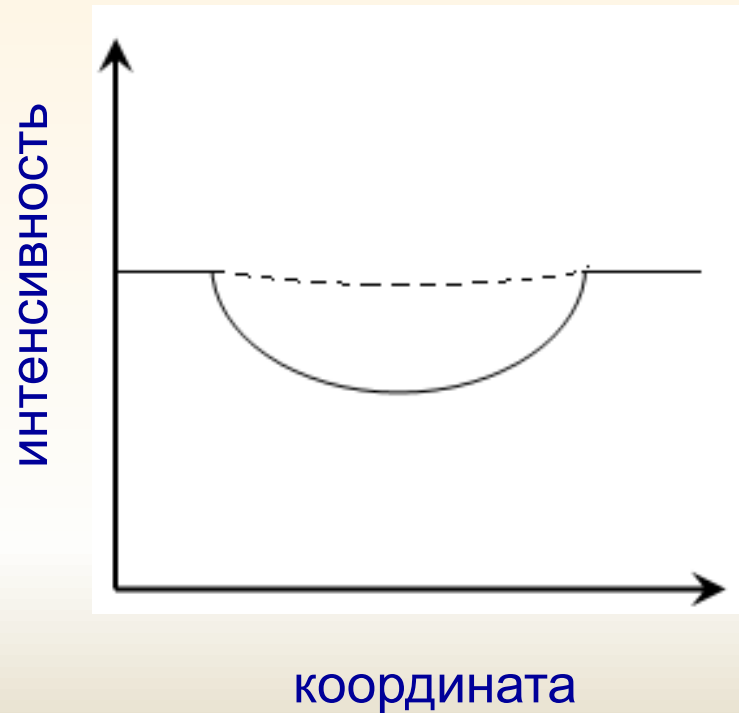
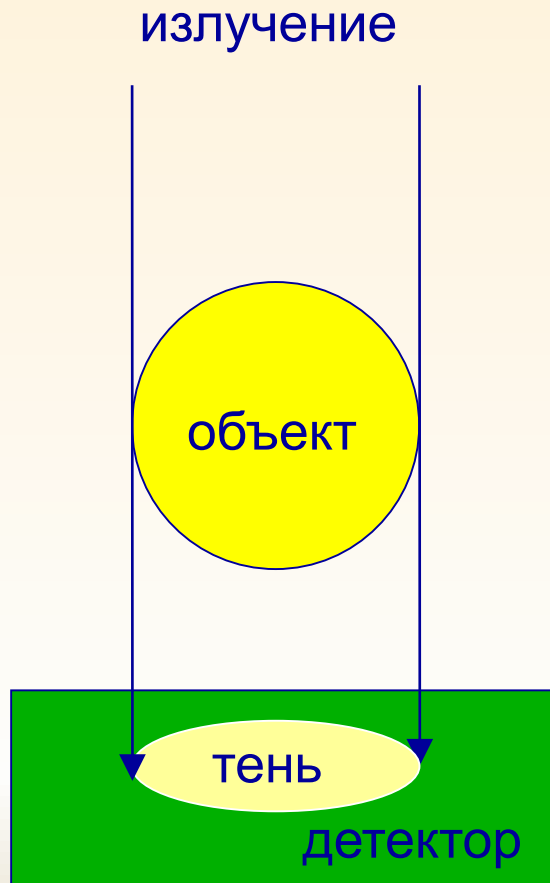


Результат цифрового вычитания



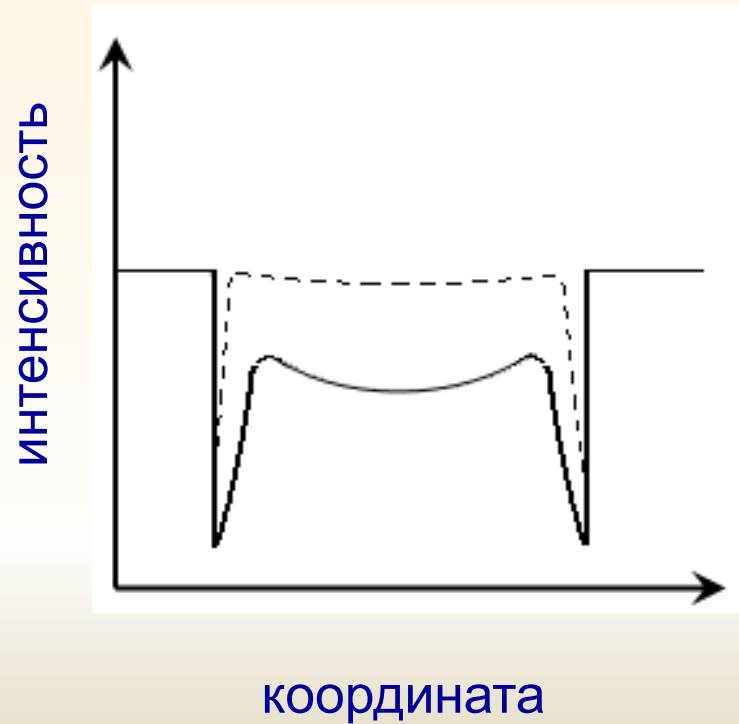
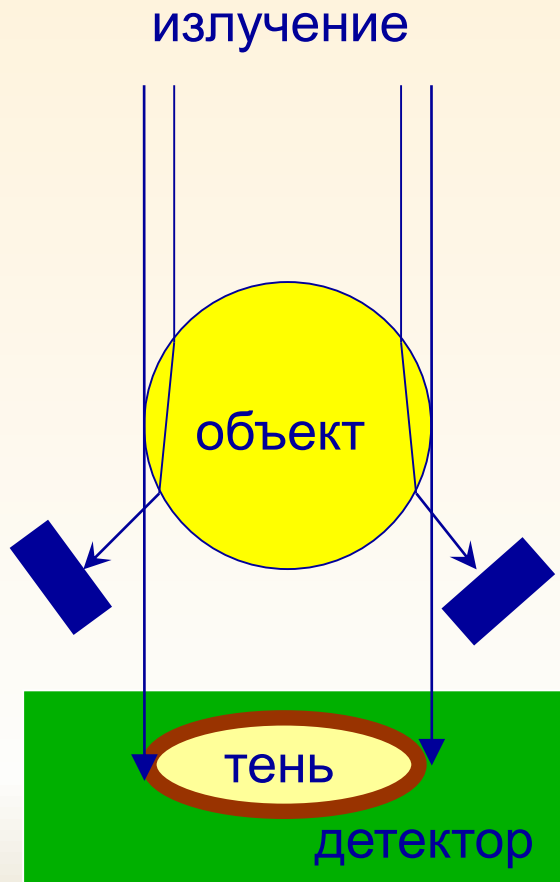
Вклад преломления

Абсорбционный контраст

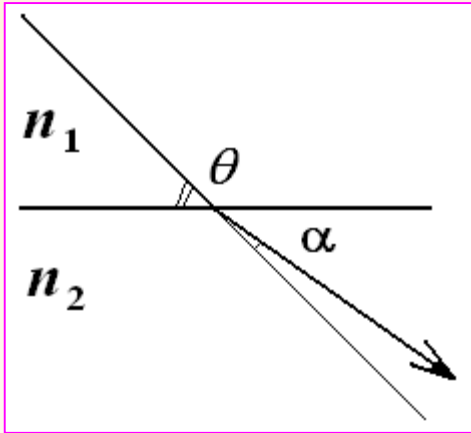


Вклад преломления

Рефракционный контраст



Вклад преломления



$$\alpha = \Delta n \cdot \text{ctg } \theta$$

$$n = 1 - \frac{\lambda^2 N_0 r_0 z \rho}{2\pi M}$$

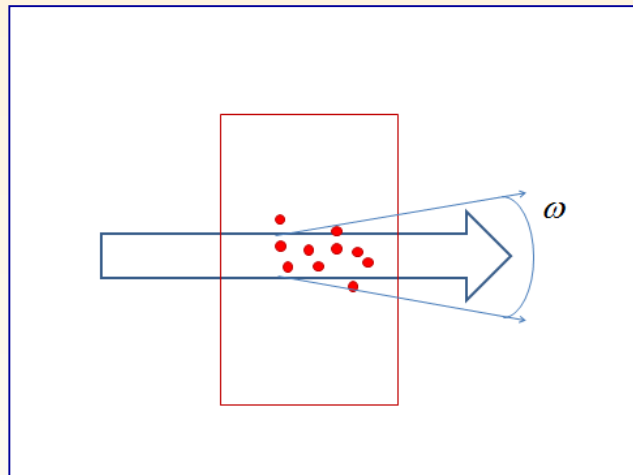
Для $\rho = 1$ г/см³ и $\lambda = 0.071$ нм ($E = 17.4$ кэВ)

$$1 - n = 7.6 \cdot 10^{-7},$$

$$\text{при } \theta \approx 5^\circ \quad \alpha \approx 1'' \approx 5 \cdot 10^{-6}.$$

Необходимо высокое угловое разрешение!!

Вклад малоуглового рассеяния



$$\omega \sim C \sqrt{N} \bar{\alpha}$$

N – число частиц на пути пучка
 α – среднее отклонение на одной частице

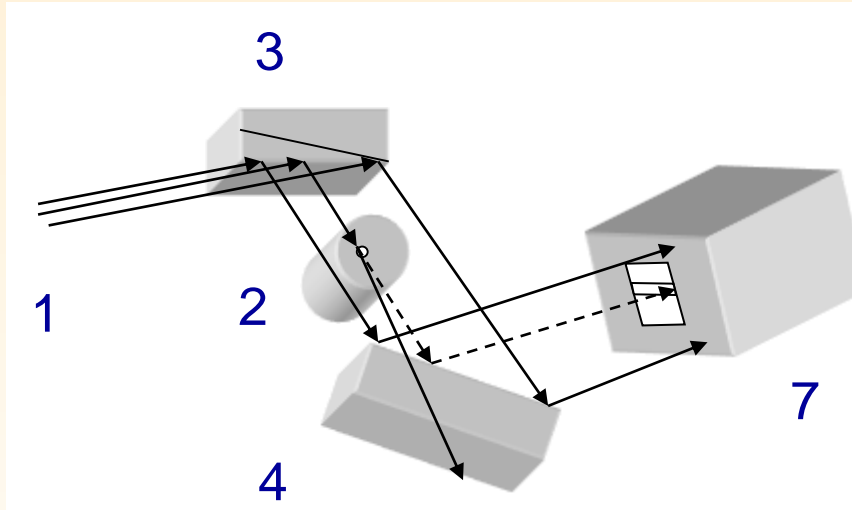
Порядок величины

$$\omega \sim 10^{-6} - 10^{-3}$$

Необходимо высокое угловое разрешение!!

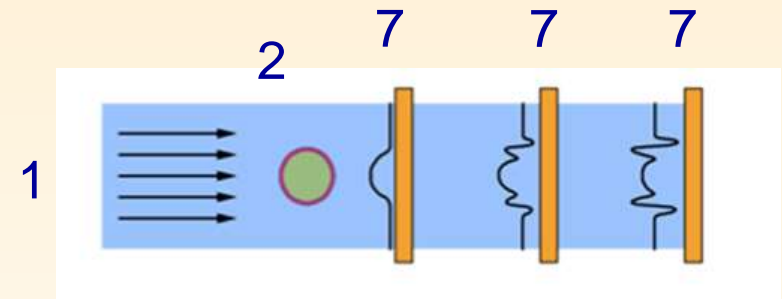
Методы высокого углового разрешения

$\omega = 1$ arc. sec.

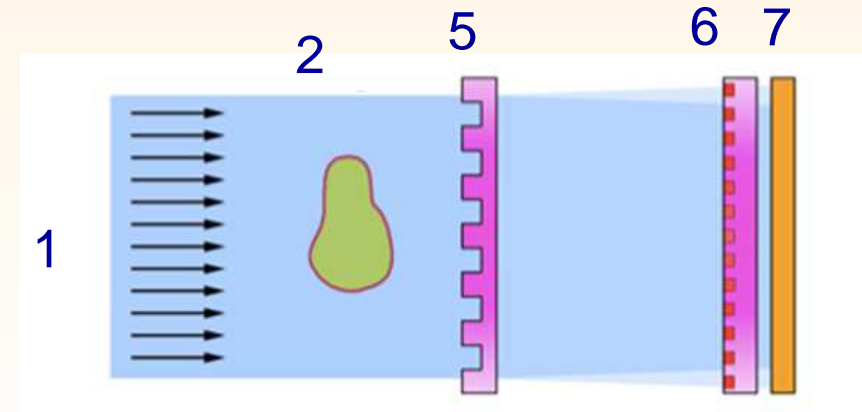


Двухкристальная схема

1- падающий пучок, 2- объект, 3- кристалл-монокроматор, 4- кристалл-анализатор, 5- фазовая решетка. 6- амплитудная решетка, 7- детектор

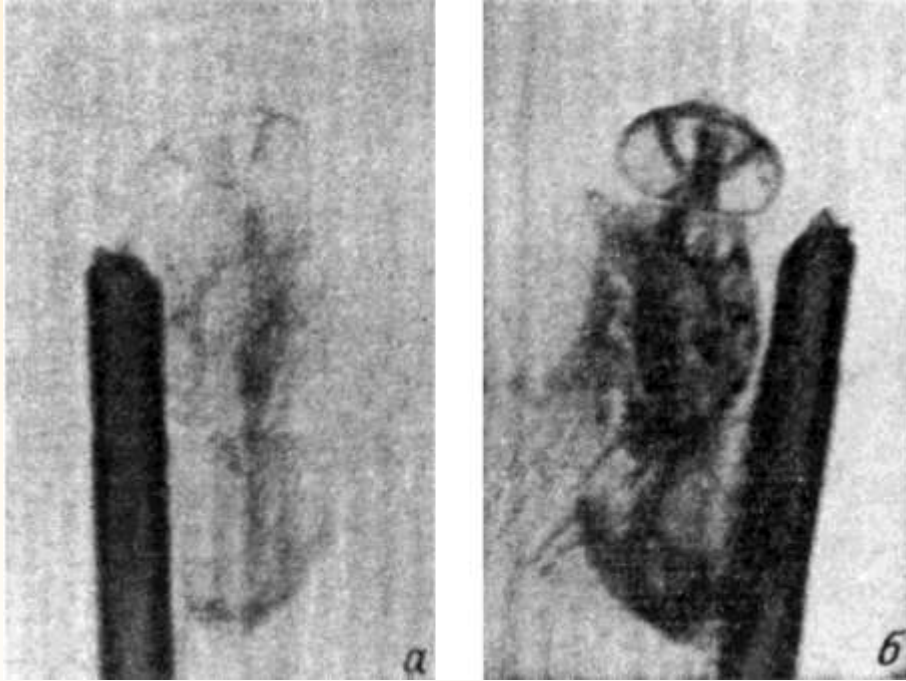


Осевая схема



Интерферометр Тальбо

Примеры рентгеновских изображений с рефракционным контрастом



Муха, съемка на пропускание (а) и рефракцию (б)



ЛИСТ

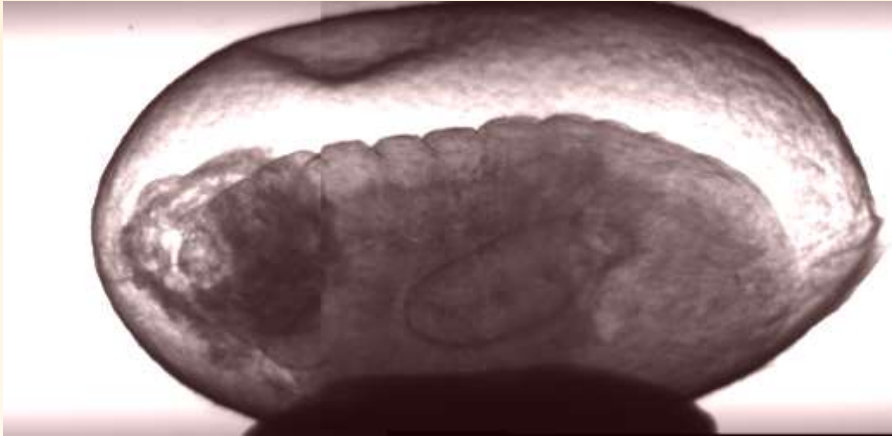


Насекомое в янтаре

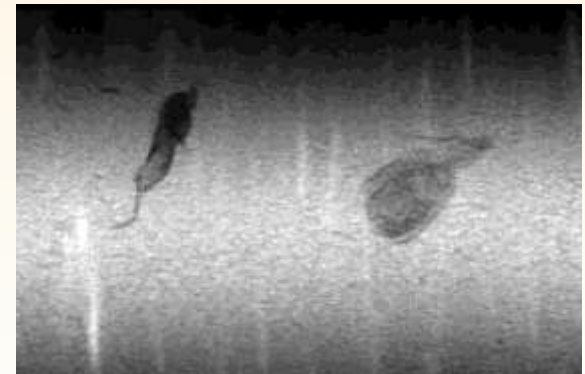
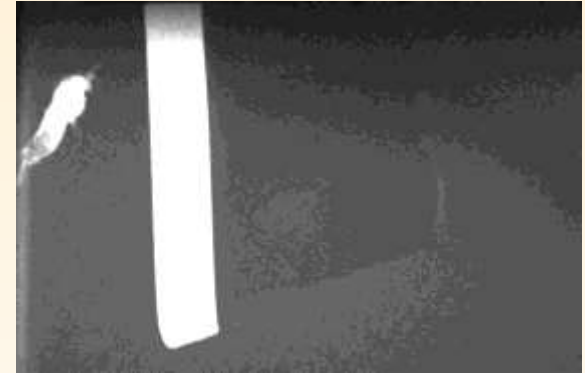
Соменков В.А., Ткалич А.К., Шильштейн С.Ш. Журнал технической физики » 1991, № 11 стр. 197

К.М.Подурец, Д.К.Погорельый, А.А.Манушкин, В.Г.Недорезов, В.А.Соменков, С.А.Щетинкин, Известия Академии наук; серия физическая. 2005 №2 с.196-198

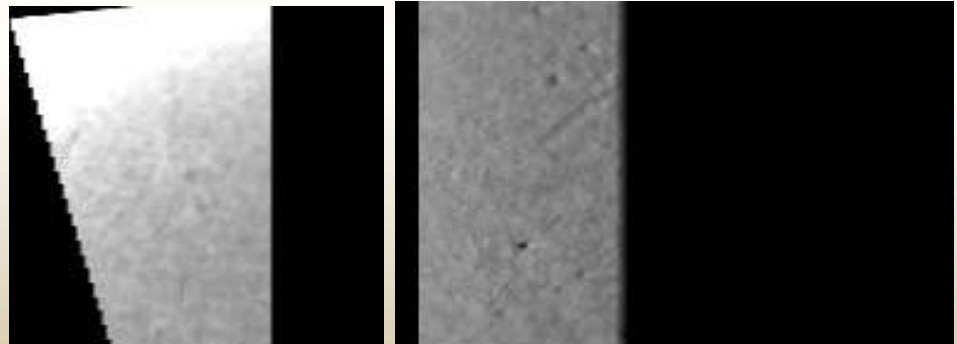
Примеры рентгеновских изображений с малоугловым контрастом



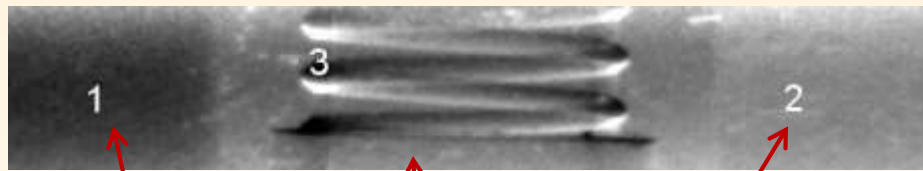
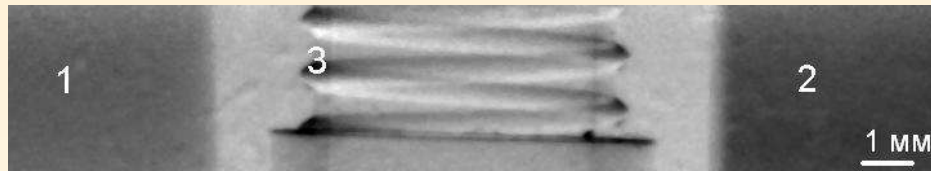
Кокон шелкопряда



Изображение янтаря с фрагментом растения без анализатора, в пике и томография в осевой схеме



Разделение ослабления, преломления и МУР

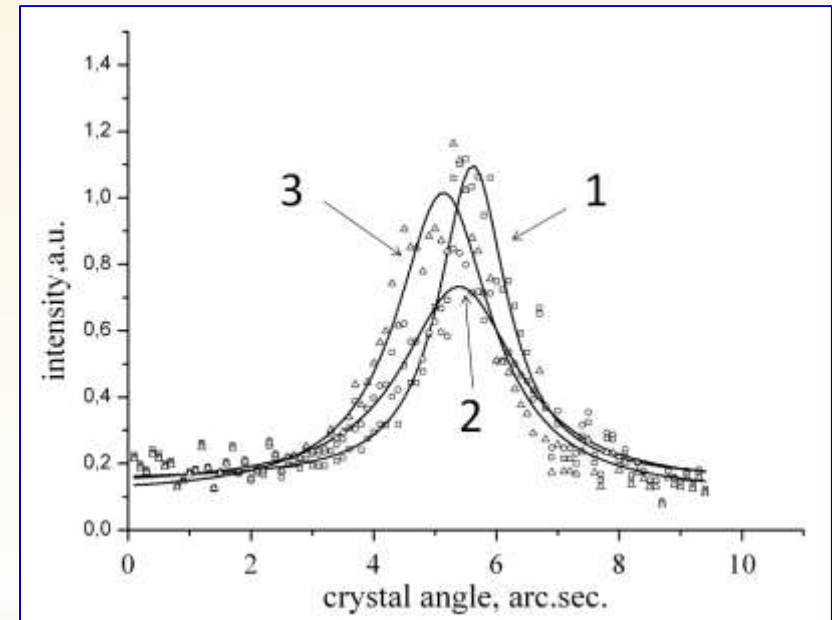


фольга

корпус шариковой ручки

бумага

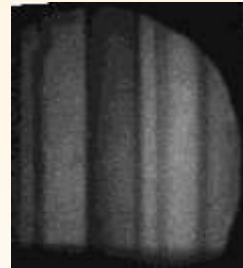
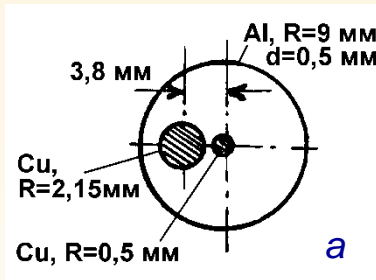
- Сканирование в широком диапазоне углов!



Изображения составного объекта на пике (верх), на склоне (низ), во всем диапазоне (справа), а также кривые рассеяния, построенные для фольги (1), бумаги (2), участка резьбы (3).

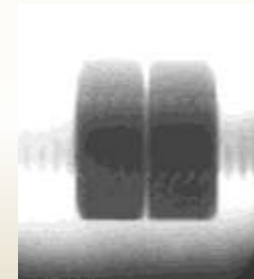
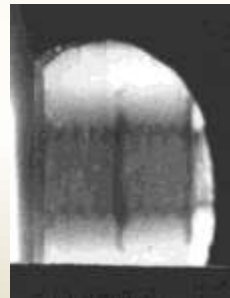
Примеры нейтронных изображений с рефракционным контрастом

$$n = 1 - \lambda^2 \left(\frac{\sum N_i b_i}{2\pi} \pm \frac{m\mu B}{4\pi^2 \hbar^2} \right)$$



Радиограммы модельного объекта (а) в условиях "рефракция + ослабление" (б) и "ослабление" (в).

Ядерное рассеяние



Радиограммы латунного болта с гайкой в условиях "рефракция + ослабление" (а) и "ослабление" (б).

Примеры нейтронных изображений с рефракционным контрастом

Магнитное рассеяние

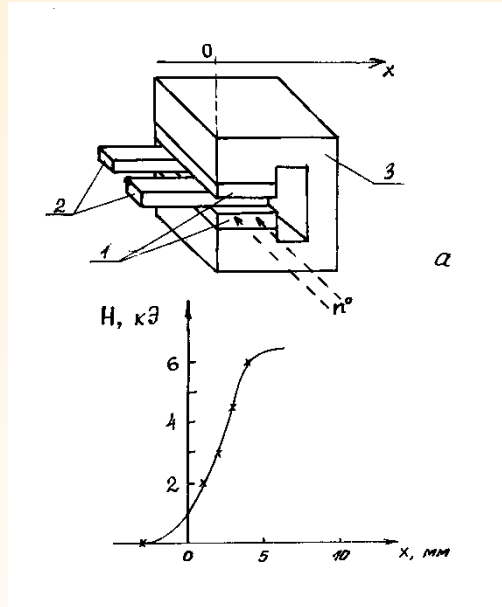
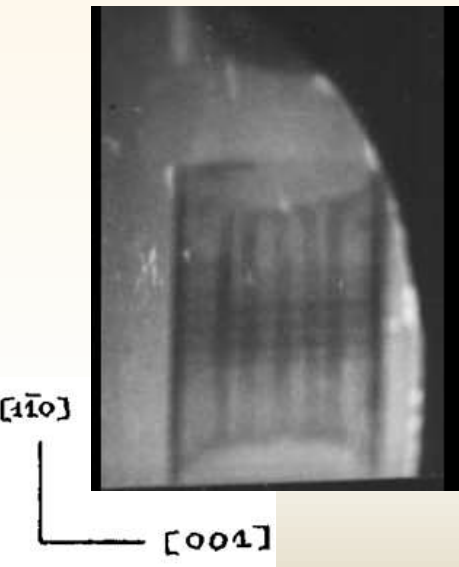
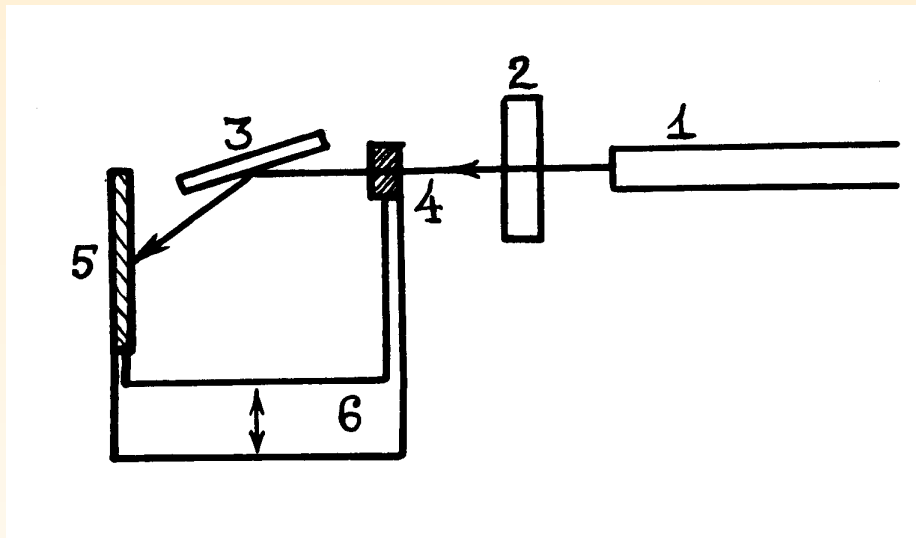


Схема эксперимента по визуализации градиента магнитного поля в зазоре постоянных магнитов (а) и изображения магнитов, рефракционное (б) и абсорбционное (с).

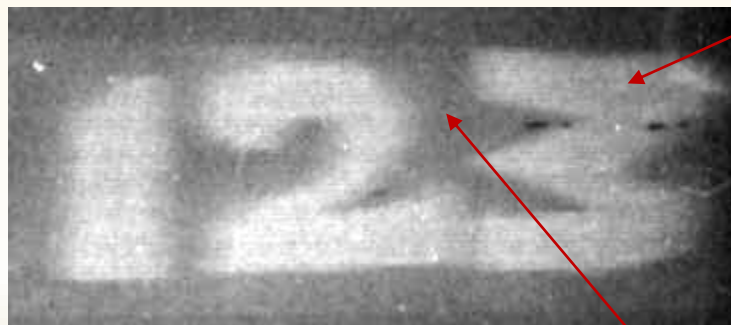


Изображение доменных стенок в монокристалла кремнистого железа

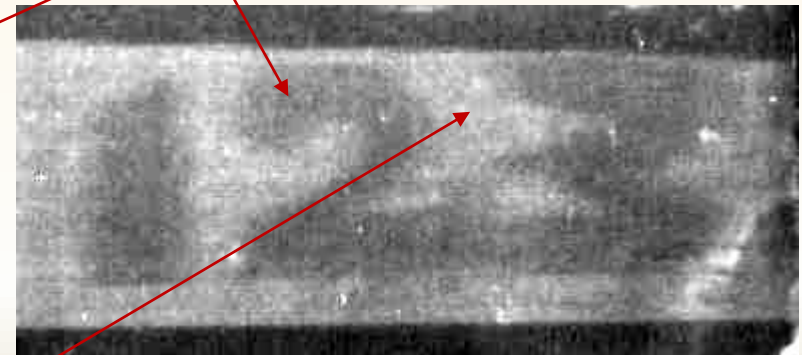
Нейтроны - деполяризаационный контраст



Эксперимент на спектрометре
СПН-1 реактора ИБР-2:
1- полярирующий
нейтроновод, 2- спин флиппер,
3- зеркальный анализатор, 4-
образец,
5- фильм, 6- узел сканирования



Флиппер
ВЫКЛЮЧЕН



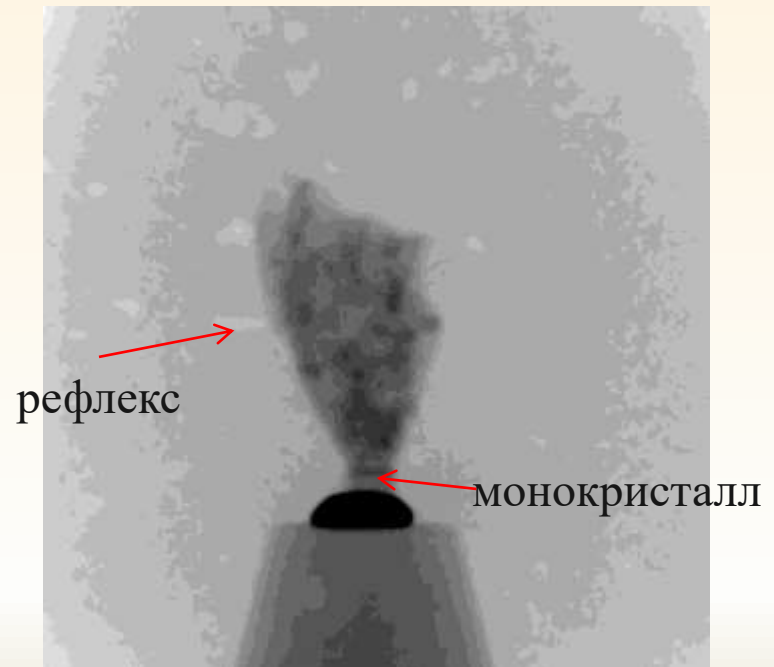
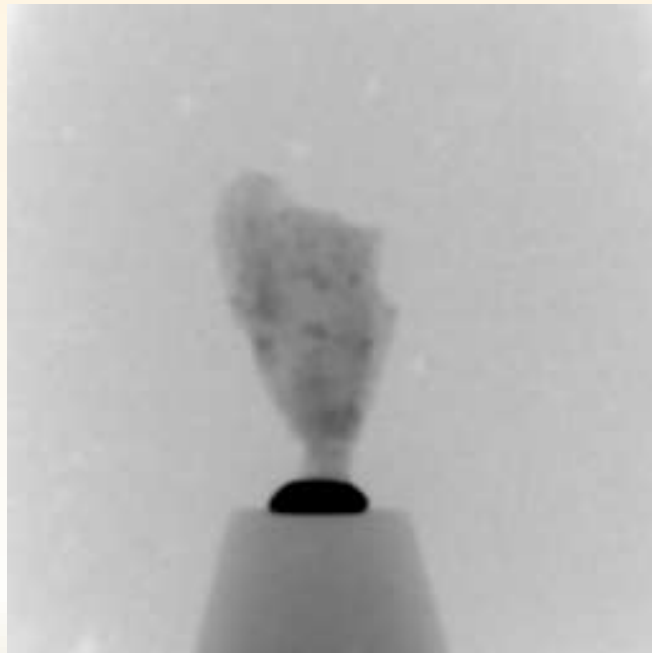
Флиппер
ВКЛЮЧЕН

Cu

Fe

Нейтроны - дифракционный контраст

Морская лилия *Ristnacrinus sp.*
Верхний ордовик, Эстония, ПИН РАН

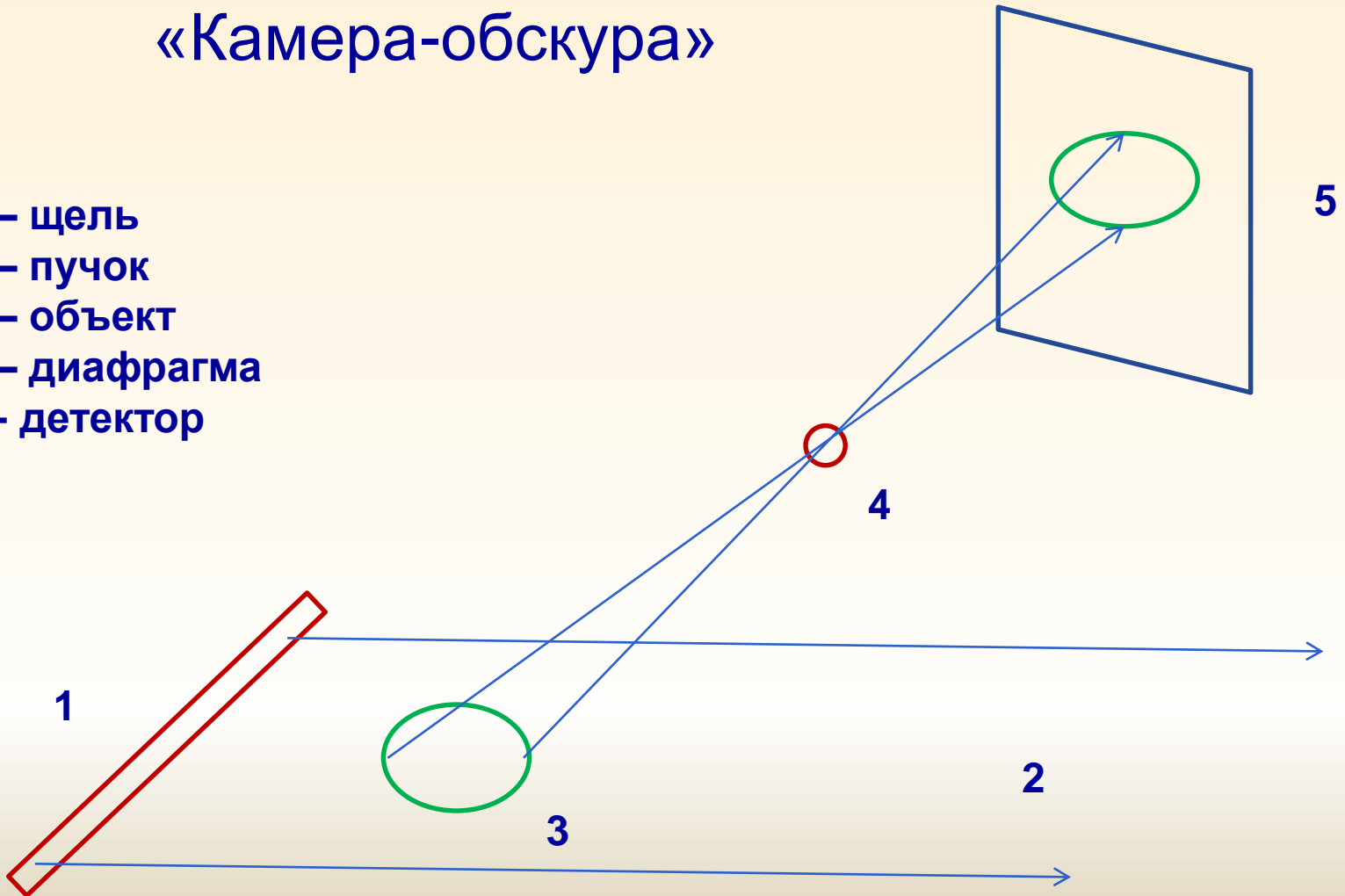


Монохроматические
нейтроны, проекции
через 1°

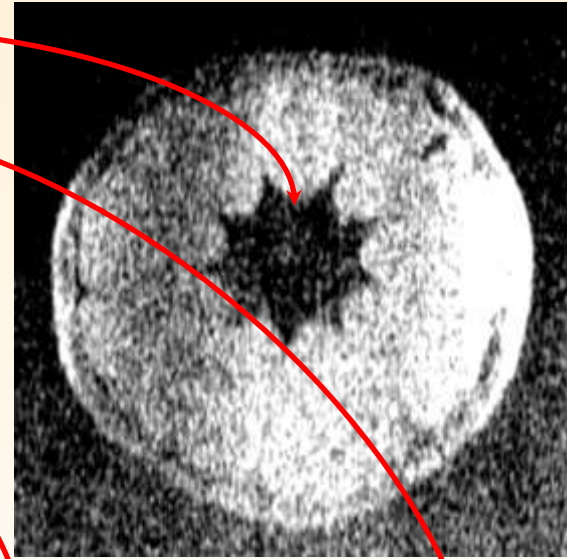
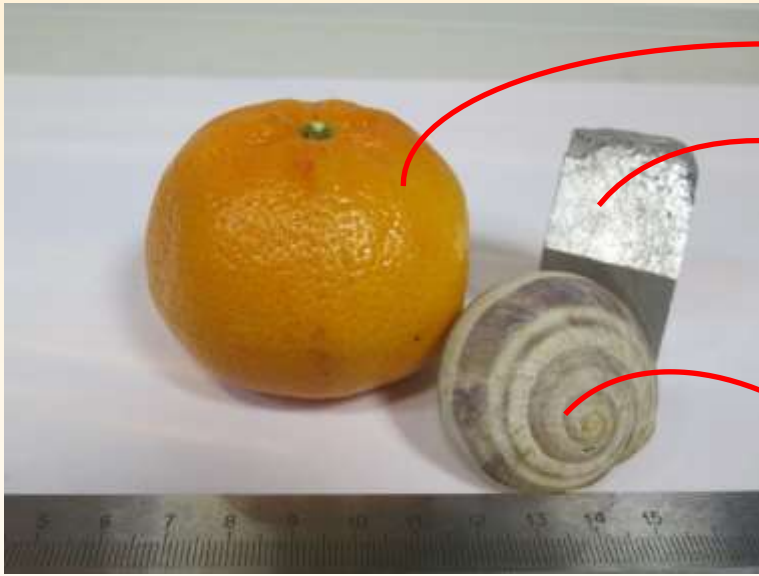
СИ - дифракционный контраст

«Камера-обскура»

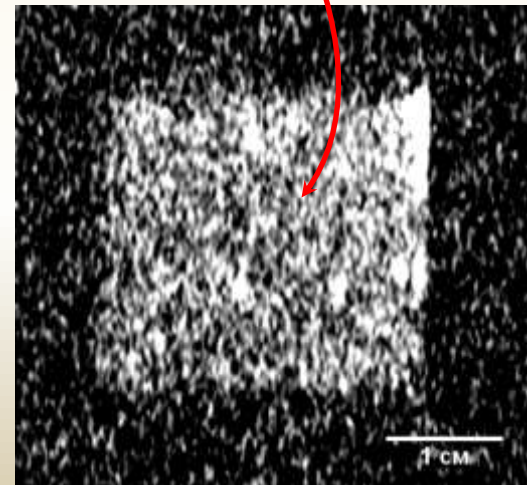
- 1 – щель
- 2 – пучок
- 3 – объект
- 4 – диафрагма
- 5 - детектор



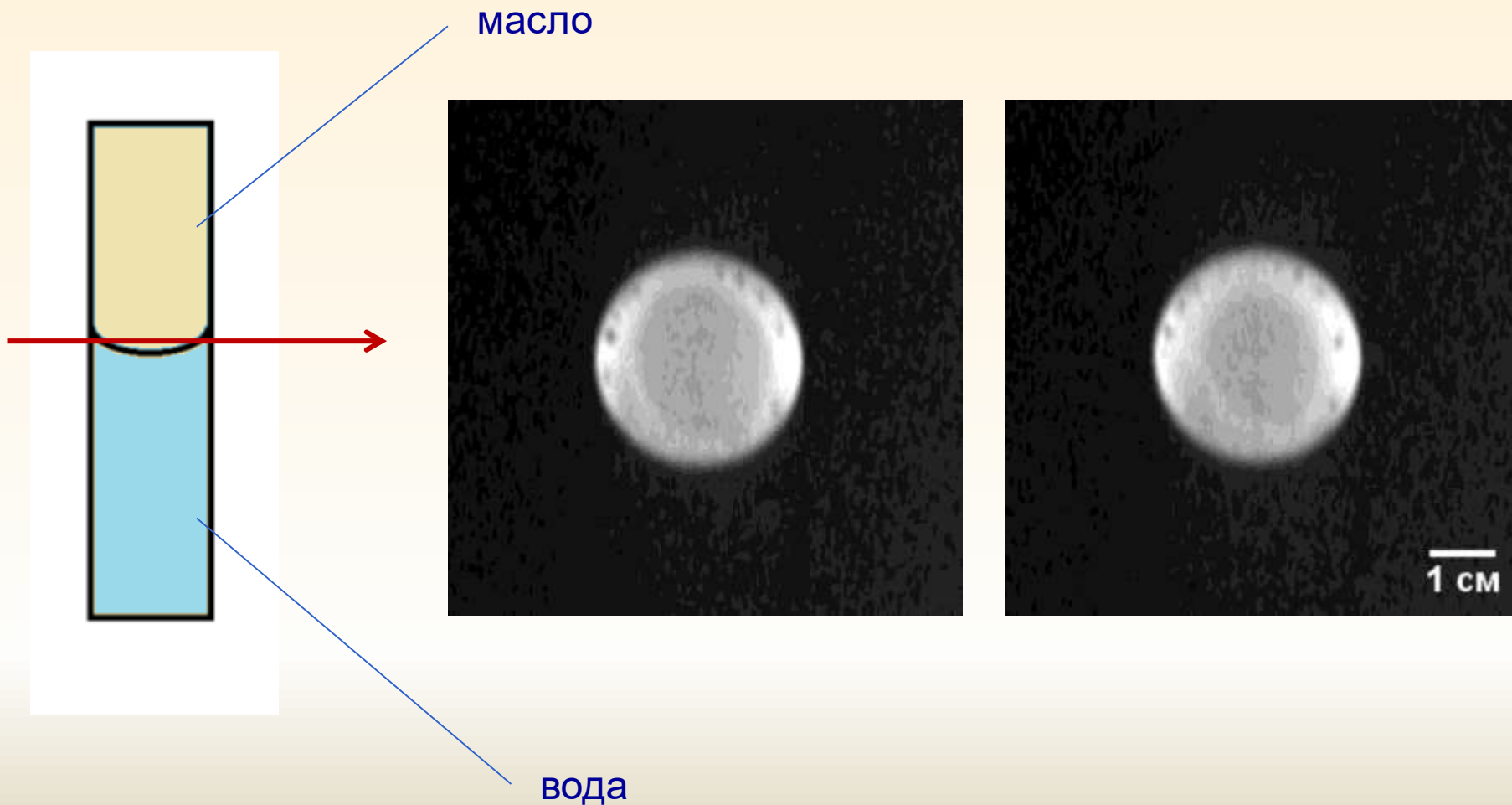
СИ - дифракционный контраст «Камера-обскура»



Изображения сечения
объектов пучком
и 3-D представление



СИ - дифракционный контраст «Камера-обскура»

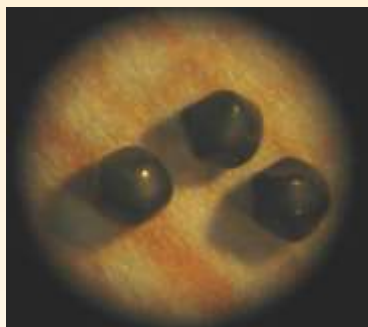


Вывод:

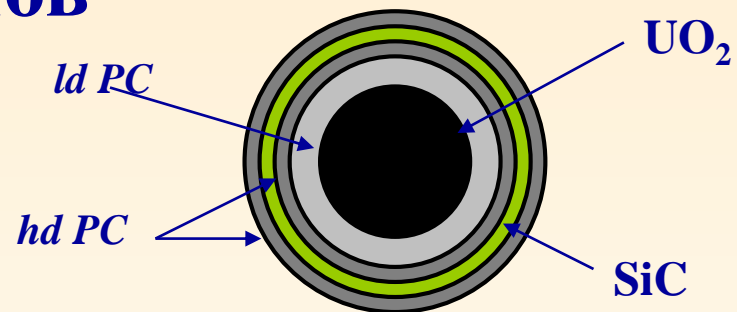
**Если рентгеновский абсорбционный
контраст недостаточен -
искать другие:
виды излучения;
источники контраста.
Для сложных объектов -
комплементарность**

Из результатов

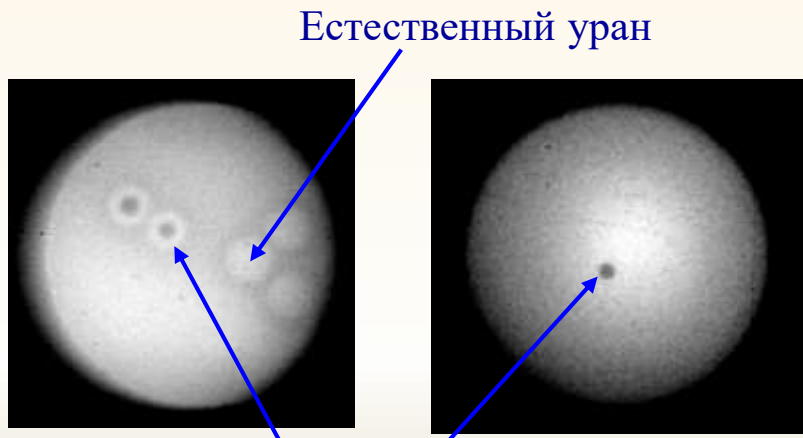
Нейтронно – синхротронная диагностика МИКРОТВЭЛОВ



нейтроны

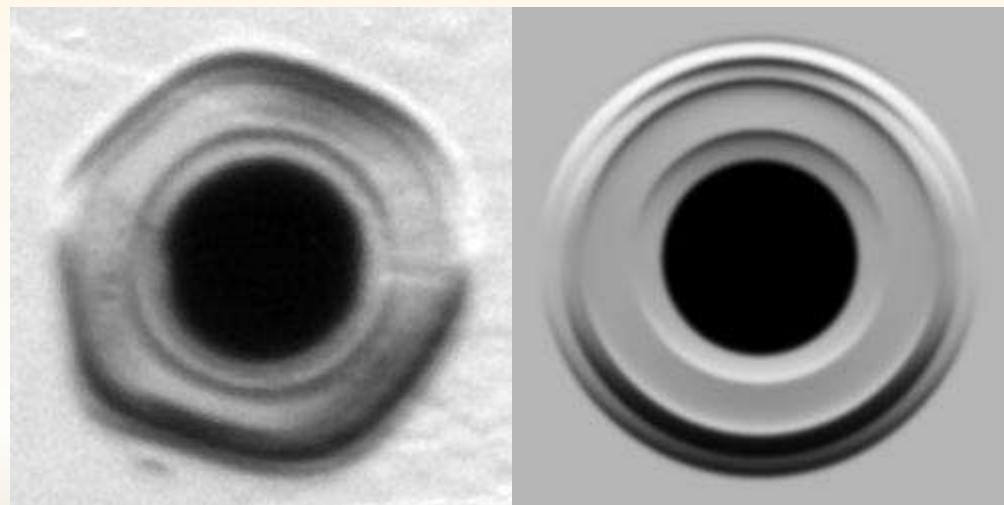


СИ, рефракция



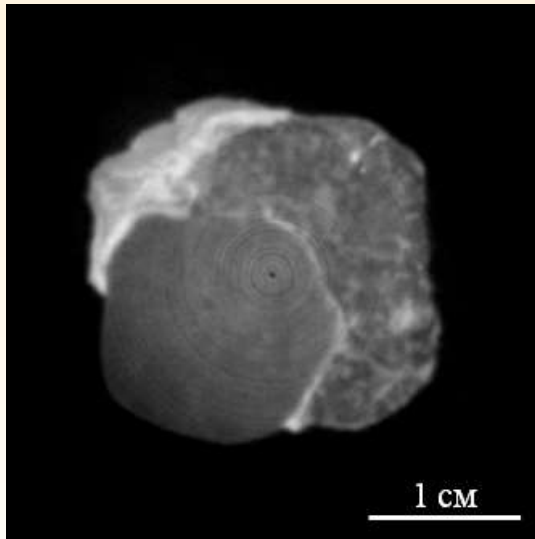
Обогащенный уран

Нейтроны: топливо

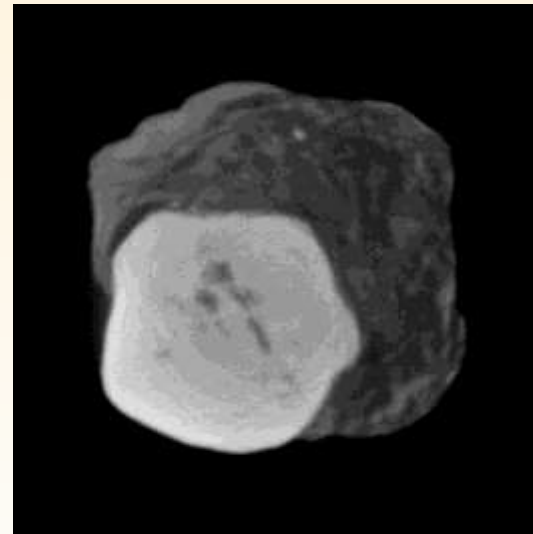


СИ: оболочки

Нейтронно – синхротронные исследования геологических объектов



нейтроны



СИ

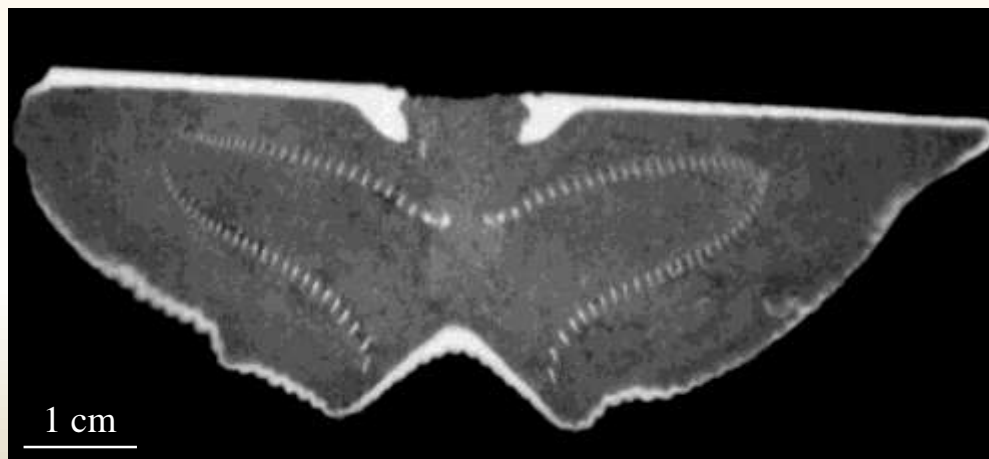
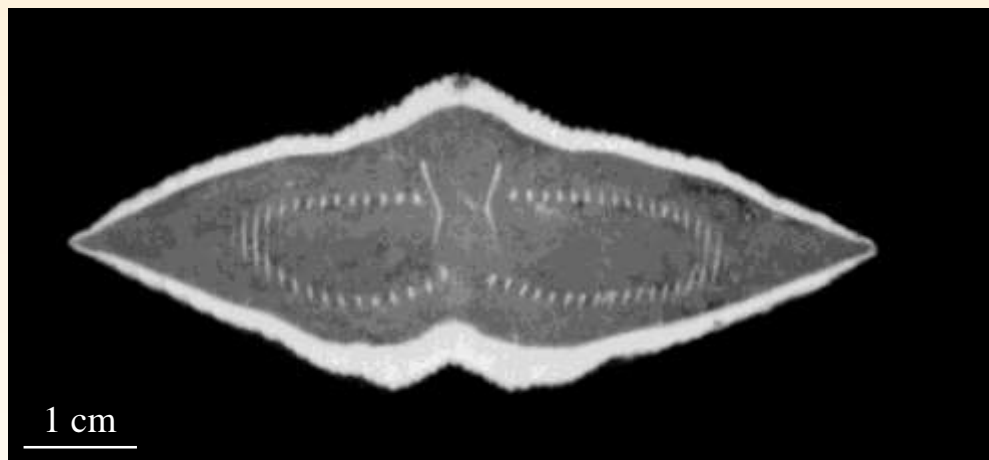
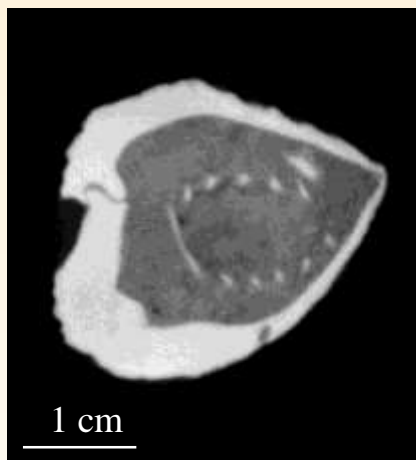
Кристалл граната в слюдяном сланце – нейтроны и СИ. На нейтронном изображении видна прослойка, по-видимому, водородсодержащих примесей вокруг граната.

Исследования палеонтологических объектов

Брахиопода *Kaninospirifer kaninensis* (Licharev, 1943, верхняя пермь, уржумский ярус, п-ов Канин, экз. ПИН РАН)



Фото



Восстановленные взаимно перпендикулярные сечения. Внутри каждого сечения отчетливо виден ручной аппарат.

Исследования палеонтологических объектов



1 cm

1 cm

Трехмерная модель ископаемой брахиоподы. Цветом помечены различные структуры объекта: красным – створки раковины, зеленым – ручной аппарат.

Исследования палеонтологических объектов

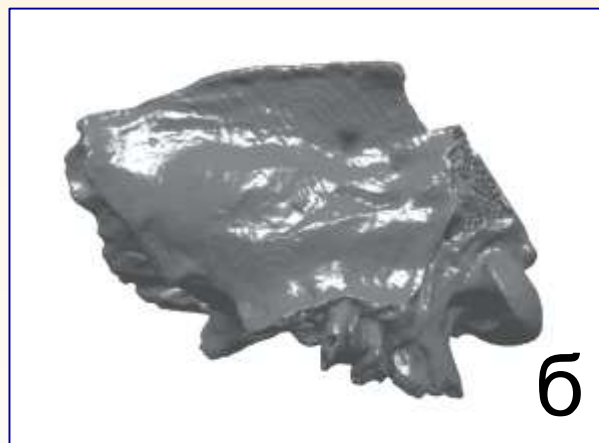
коллекция брахиопод *Kaninospirifer kaninensis* (?)

Палеонтологического музея им. Ю. А. Орлова



1 cm

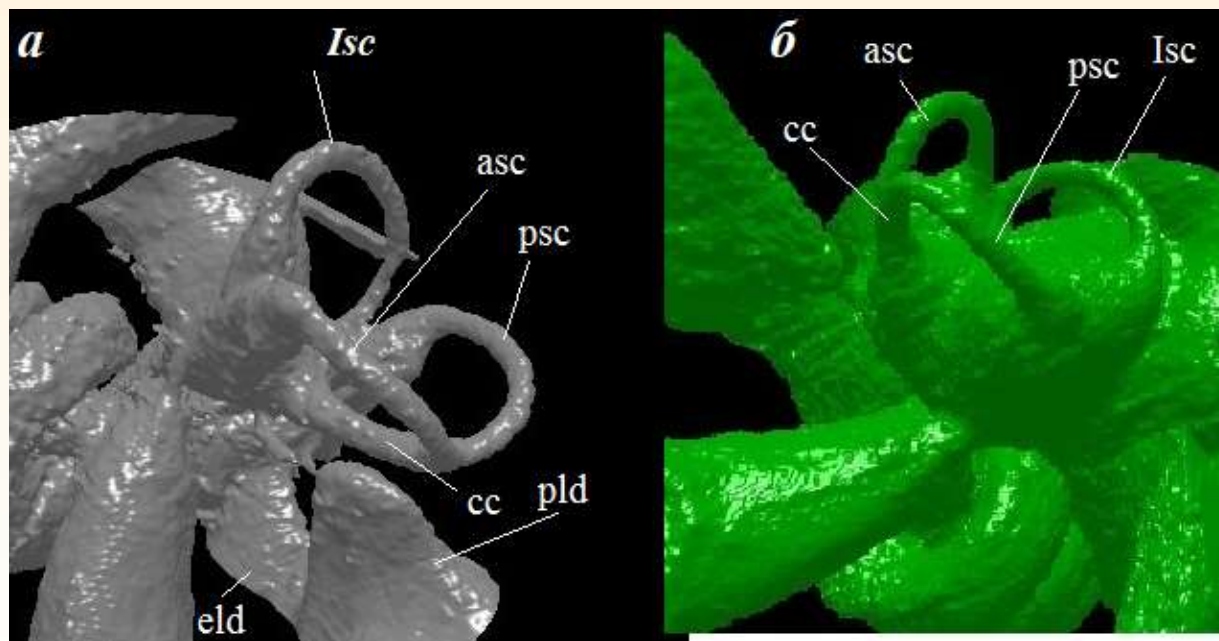
Исследования палеонтологических объектов



Томография черепа *Carnivora sp.* из коллекции акад. Вернадского: фото (а), 3-D представление черепа (б) и эндокрана (в)

Исследования палеонтологических объектов

Томографическое исследование лабиринта
каменистой кости слуховой капсулы
позднемиоценовых усатых китов Северо-Западного
Предкавказья



Трехмерная модель полукружных каналов *Kurdalagonus* (а) и *Zygiocetus* (б): *Isc* – латеральный полукружный канал; *asc* – передний полукружный канал; *psc* – задний полукружный канал; *cc* – общая перепончатая ножка; *eld* – эндолимфатический проток; *pld* – перелимфатический проток.

Исследования археологических объектов

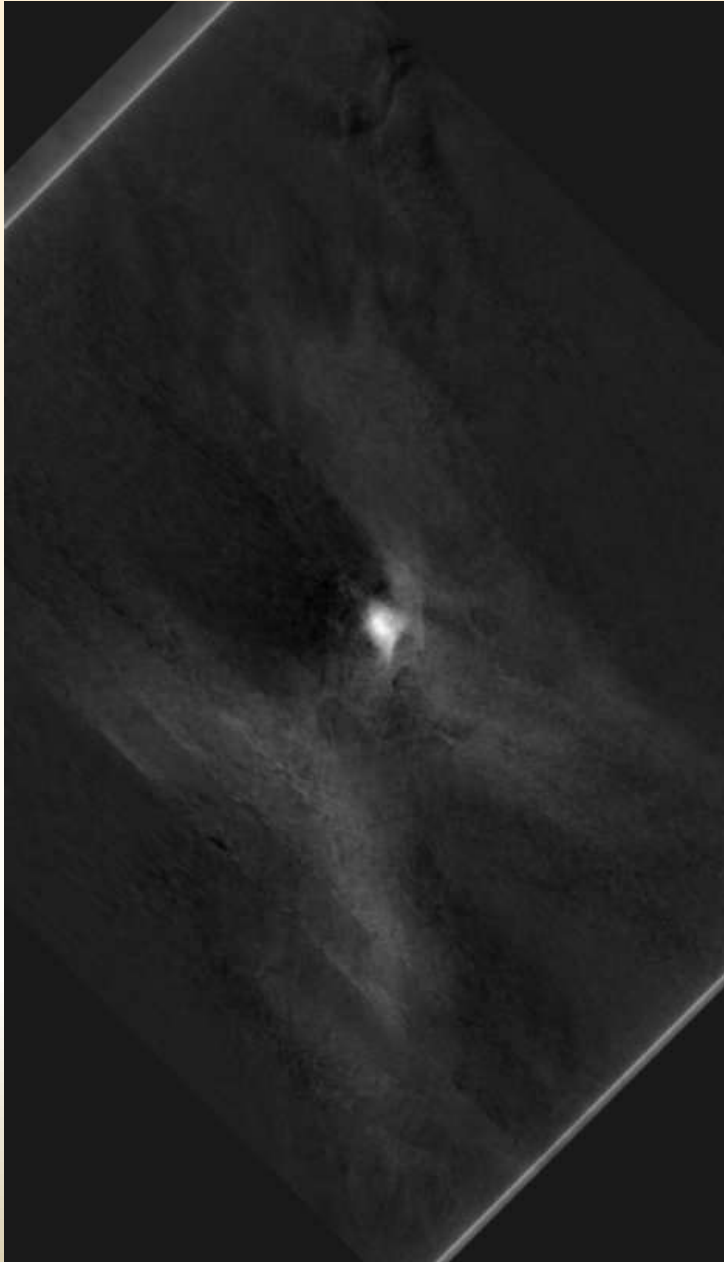
закрытый крест – энколпион

(12 - первая половина 13 века, Владимирская обл., Юрьев-Польской р-н, селище Сорогужино-2, археологические разведки ИА РАН)

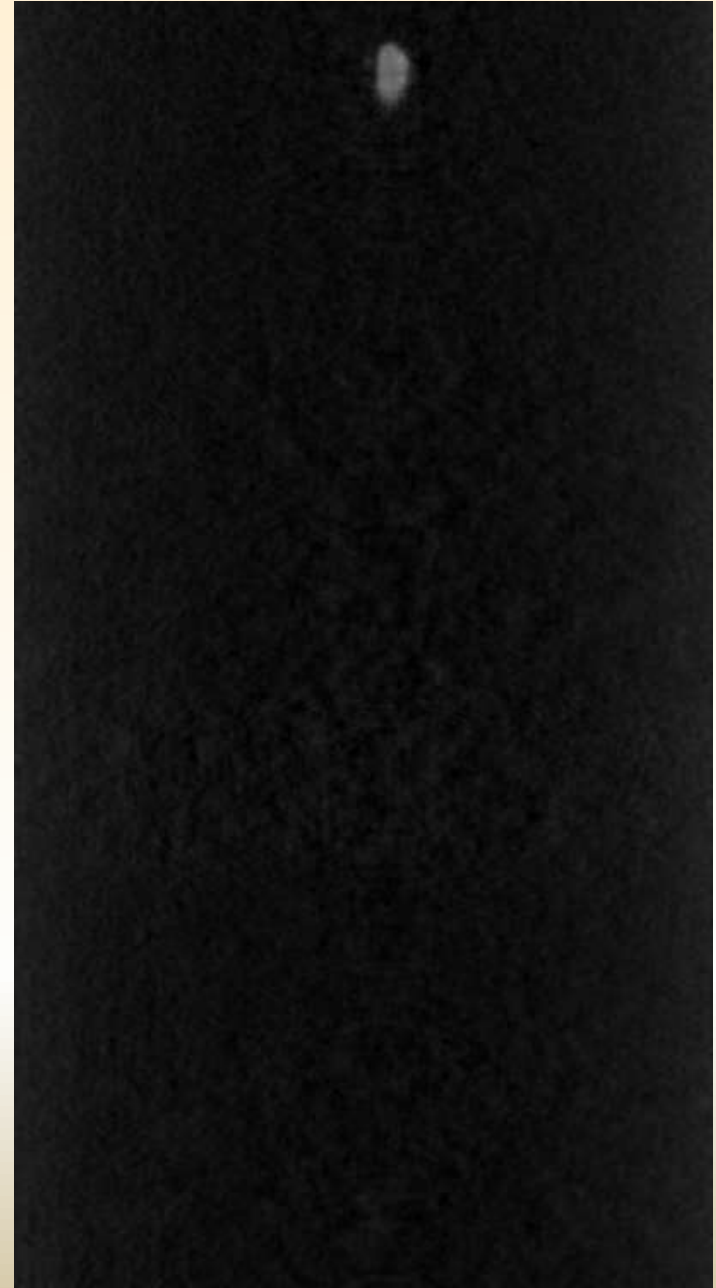


закрыты́й крест – энколпион

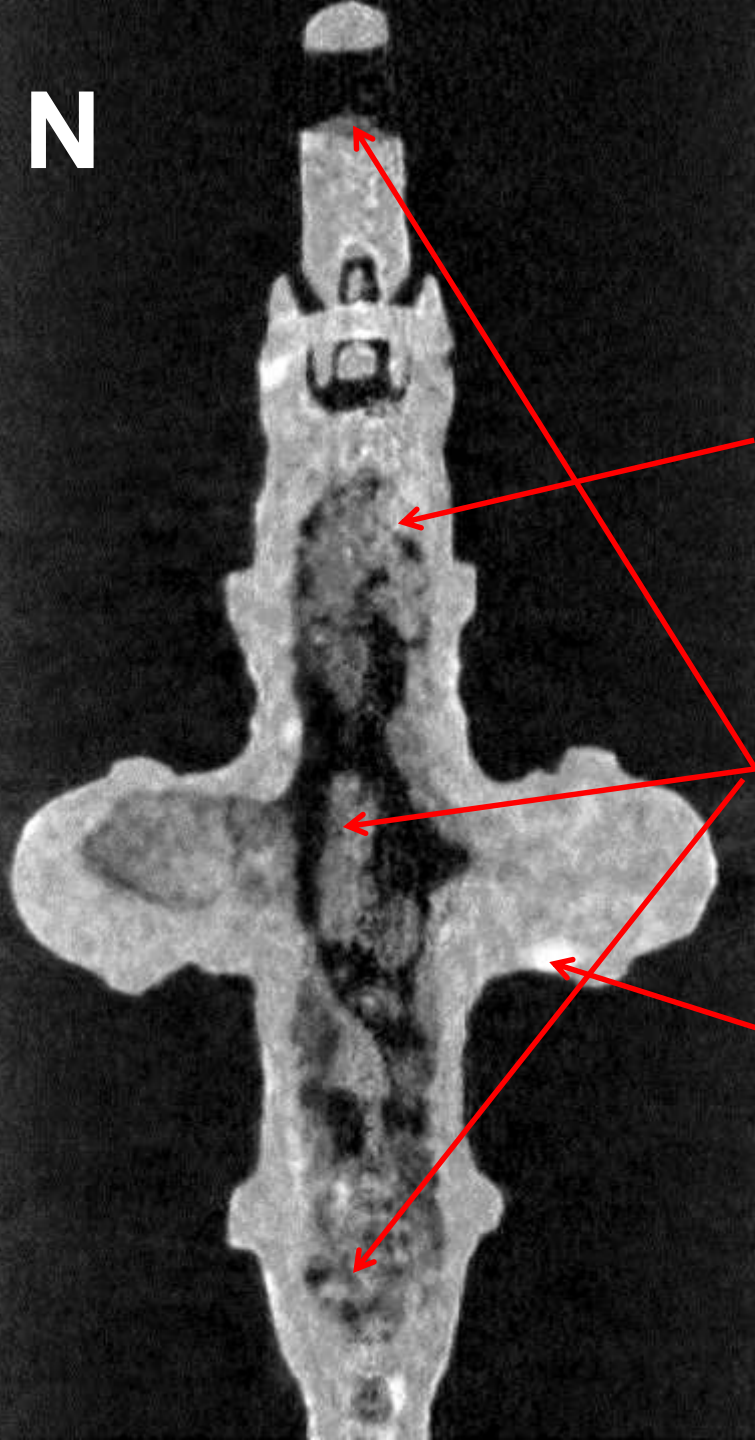
SR



N



N

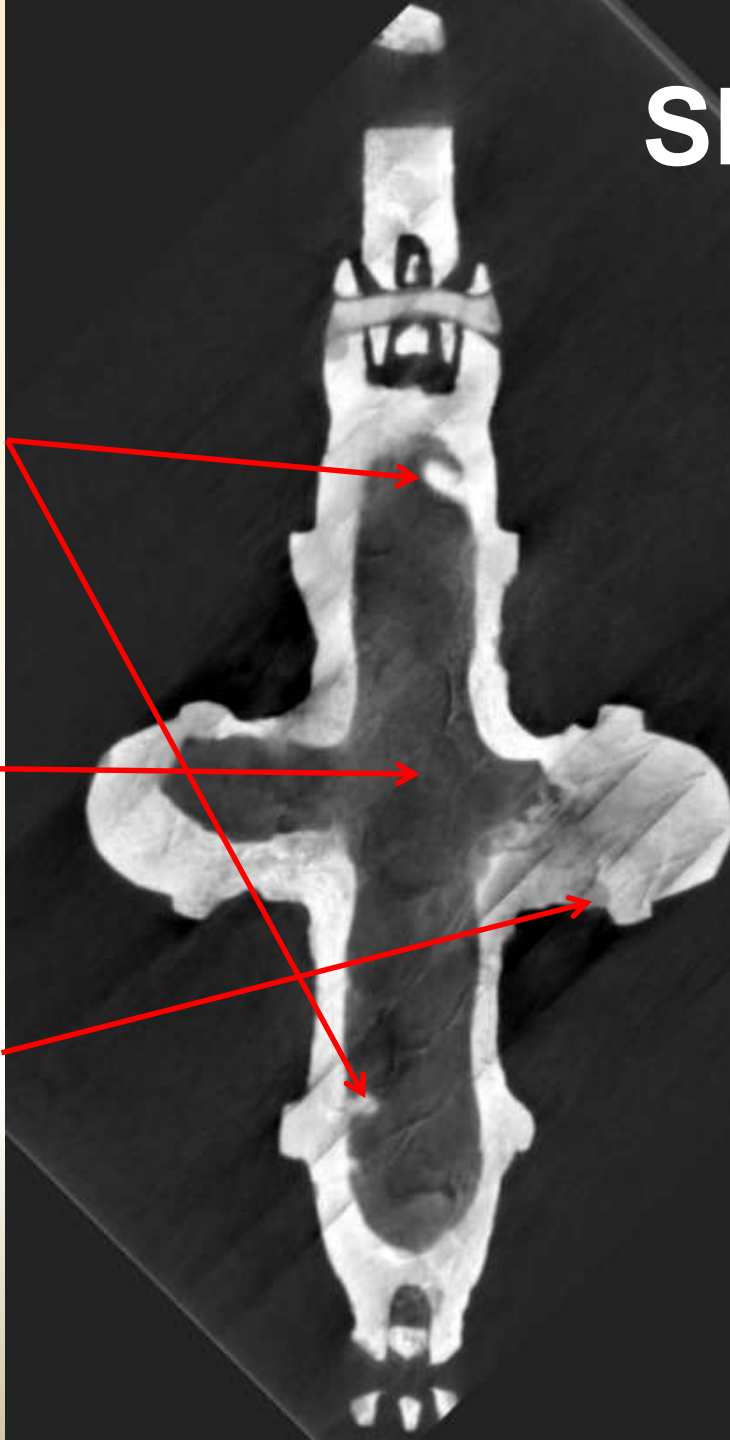


Технология
литья

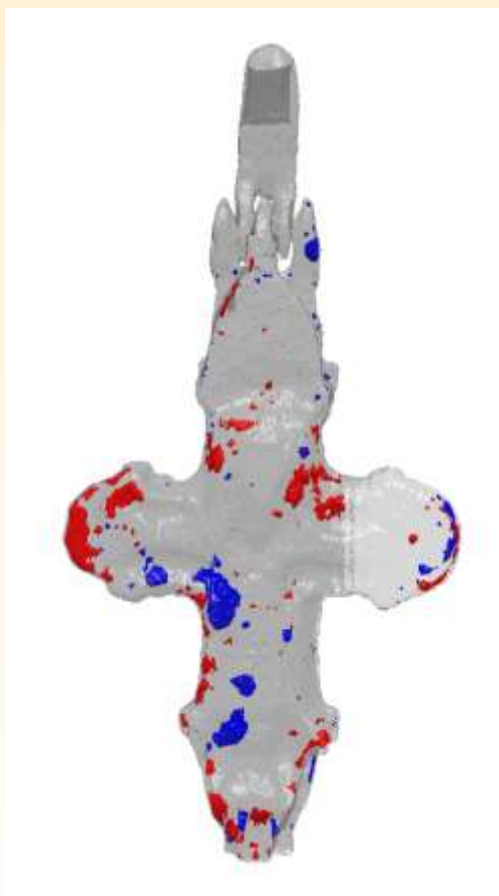
Содержимое

Неодно-
родности
металла

SR



закрытый крест – энколпион



Объемная модель креста, на которой выделены неоднородности металла (цвета соответствуют створкам)

N



SR



изображения участка креста с неоднородностями в нейтронах и синхротронном излучении.

Такое соотношение нейтронного и рентгеновского контраста объясняется коррозией (водород!)

Исследования объектов культурного наследия



Иоанн
Креститель

бронзовые статуи

Автор: Донато ди
Никколо ди Бетто
Барди (Донателло)
(ок. 1386 - 1466)
(??)

Из фондов ГМИИ
им. А.С. Пушкина

Определить их
внутреннее
состояние, в том
числе обнаружить
технологические
элементы, наличие
скрытых дефектов,
коррозии, трещин



Танцующий амур

Исследования объектов культурного наследия



**Иоанн
Креститель**



раковина (?)

коррозии нет!
(ср. энколпион)

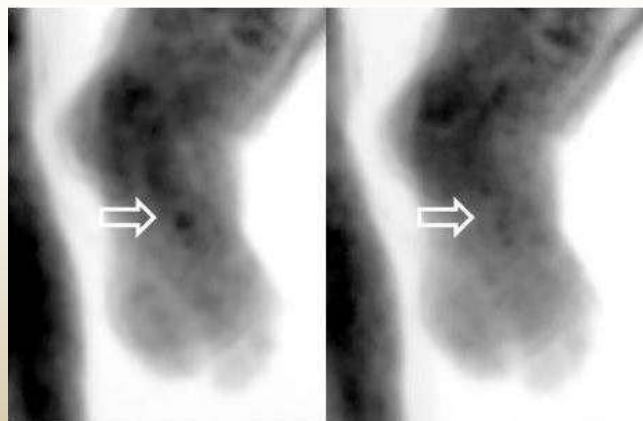
Нейтронная радиография показала в целом удовлетворительное состояние металла статуи, толщину металла в разных частях статуи, составные части статуи, места соединения фрагментов, зазоры между ними и соединительные детали.

Исследования объектов культурного наследия

Танцующий амур



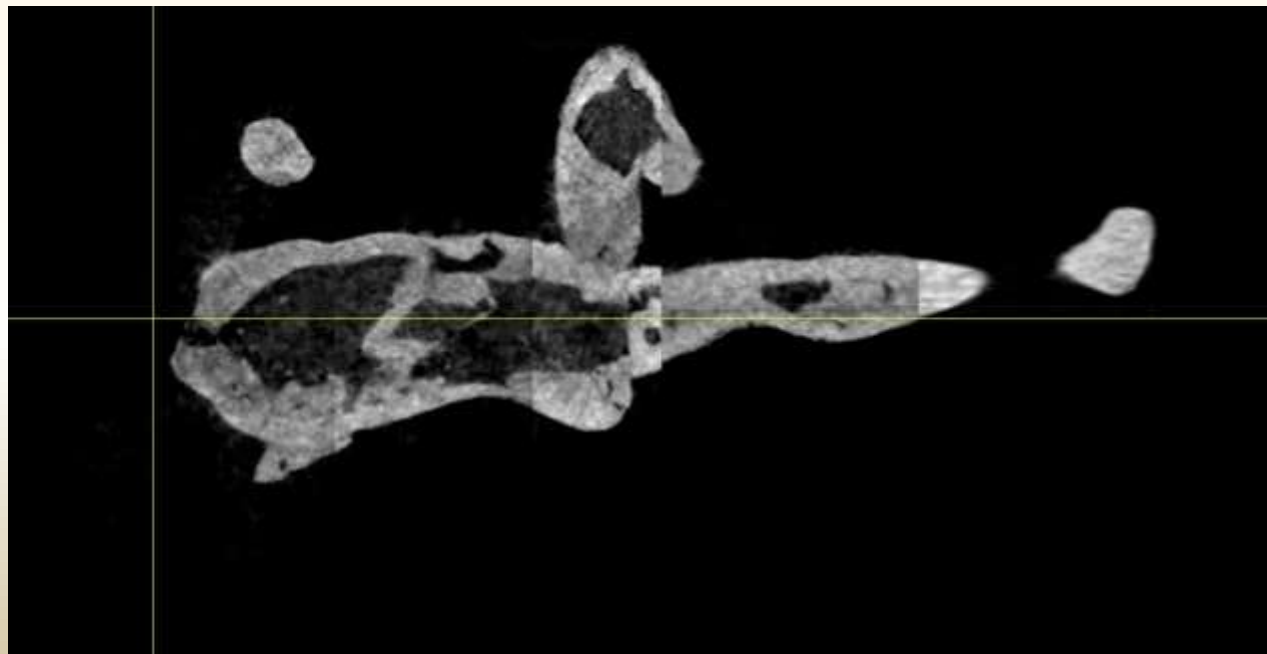
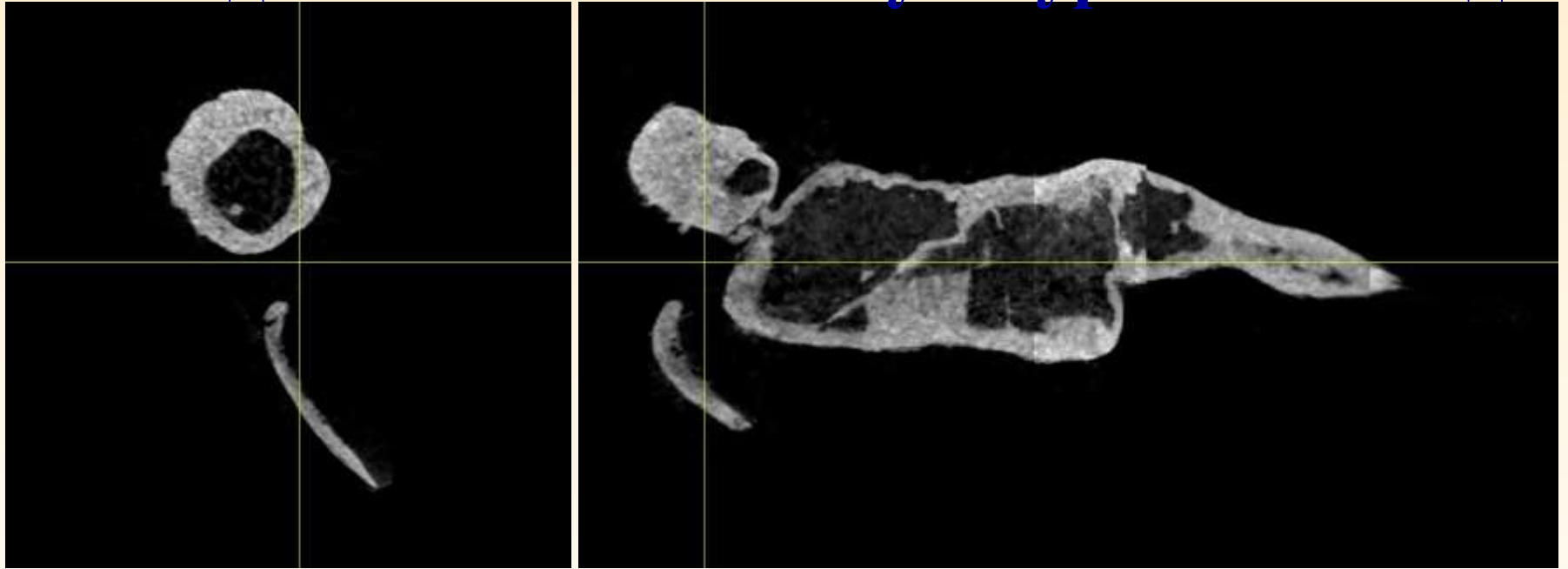
Нейтронные проекции верхней части статуи, видны зёрна и отражения от них



Две нейтронные проекции, полученные с угловым интервалом 2° . Стрелкой указано зерно



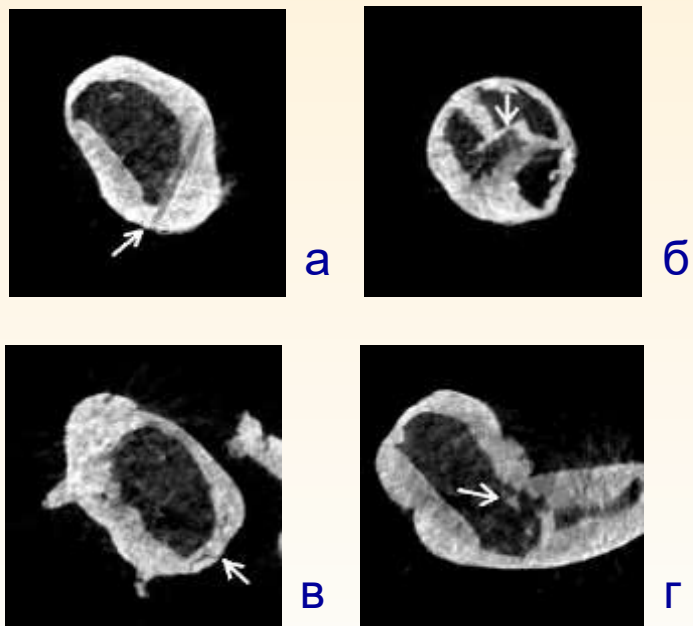
Исследования объектов культурного наследия



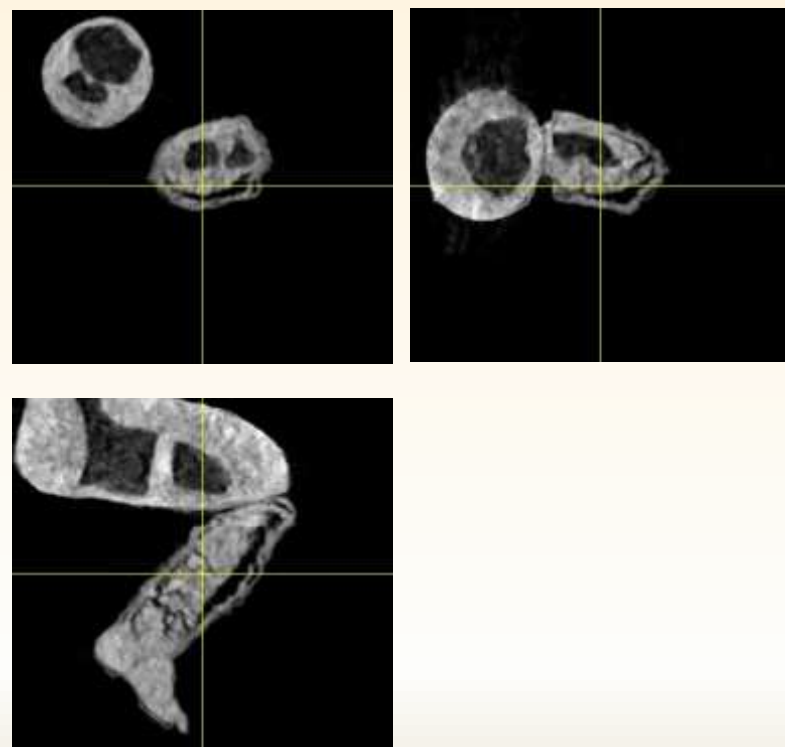
Три взаимно
перпендикулярные
томографические
сечения статуи
«Танцующий амур».

Исследования объектов культурного наследия

Танцующий амур



Особенности внутреннего строения статуи «Танцующий амур»: а, б – элементы каркаса, в – трещина, г – затёк металла



Три взаимно перпендикулярные томографические сечения правой голени статуи

Соавторы:

Соменков В.А.
Шильштейн С.Ш.
Глазков В.П.
Коваленко Е.С.
Калоян А.А.
Погорелый Д.К.
Яковенко Е.В.

Пахневич А.В.
Лавров А.В.
Тарасенко К.К.
Грешников Э.А.
Расторгуев В.А.
Тулубенский М.А.

ПИН РАН
ПИН РАН
ПИН РАН
ИА РАН
ГМИИ
ГМИИ

Спасибо за внимание!