

**Численное моделирование
фазового контраста Цернике
в жестком рентгеновском
излучении с использованием
преломляющих линз
и зонных пластинок**

М. А. Орлов, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

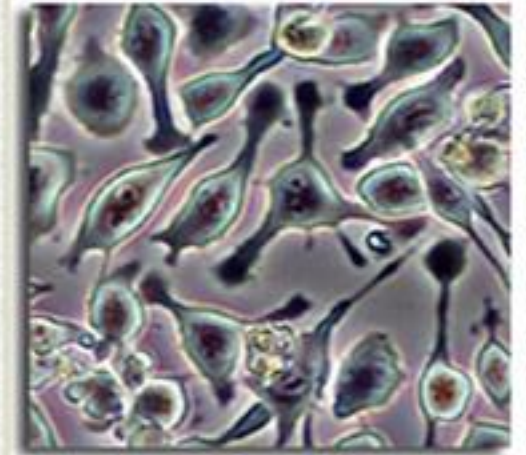
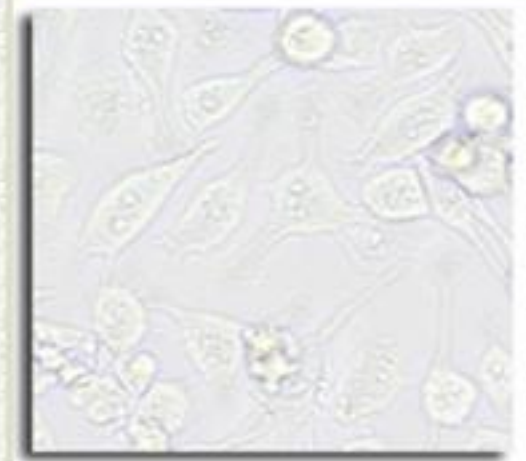
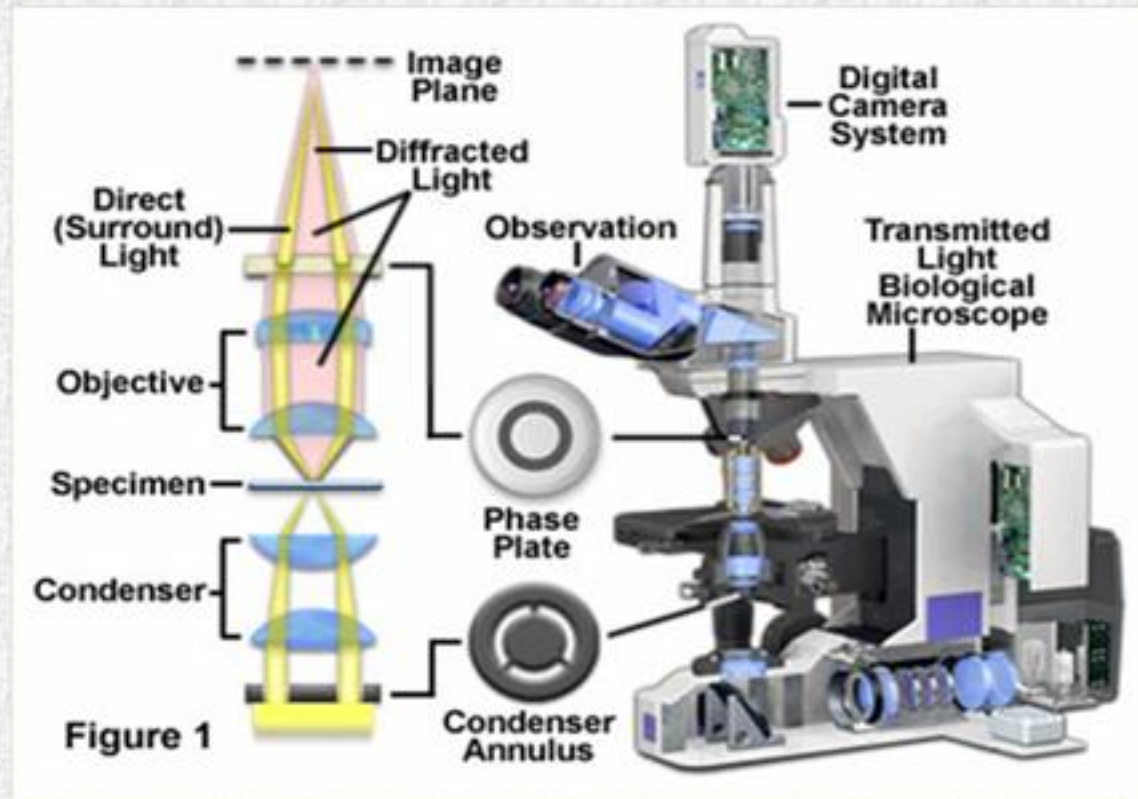
В. Г. Кон, РНЦ "Курчатовский Институт", Москва

The Nobel Prize in Physics 1953



Frits Zernike

Born 1888
Died 1966



Фазовый контраст Цернике для видимого света открыт в 1934 году

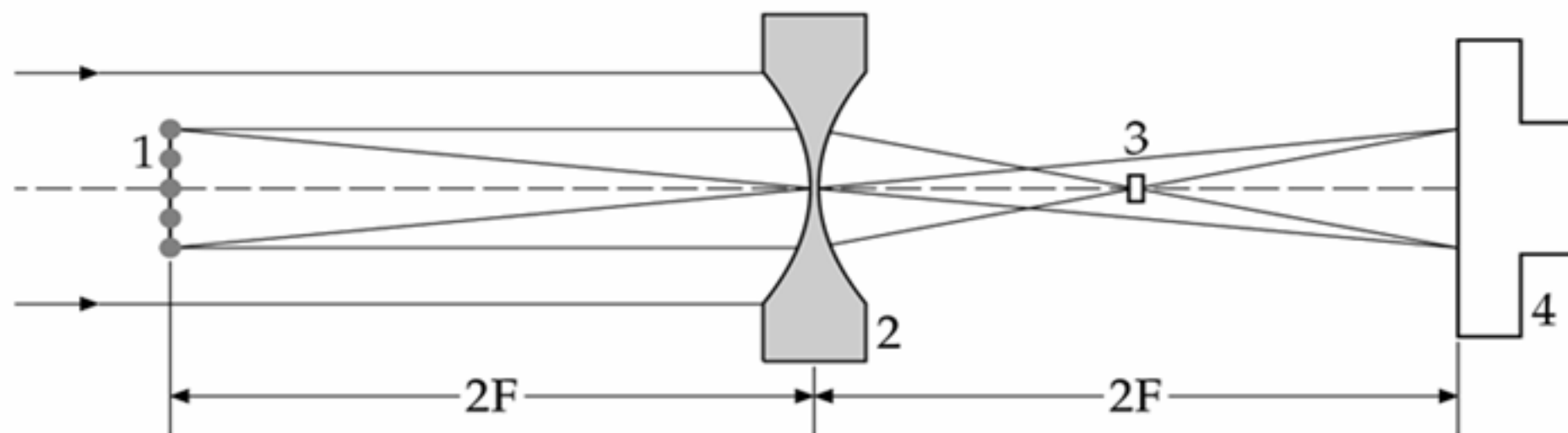
Нобелевская премия присуждена в 1953 году

Микроскоп Цернике позволяет видеть прозрачные объекты которые лишь очень слабо изменяют фазу прошедшей волны, в частности живые клетки организмов.

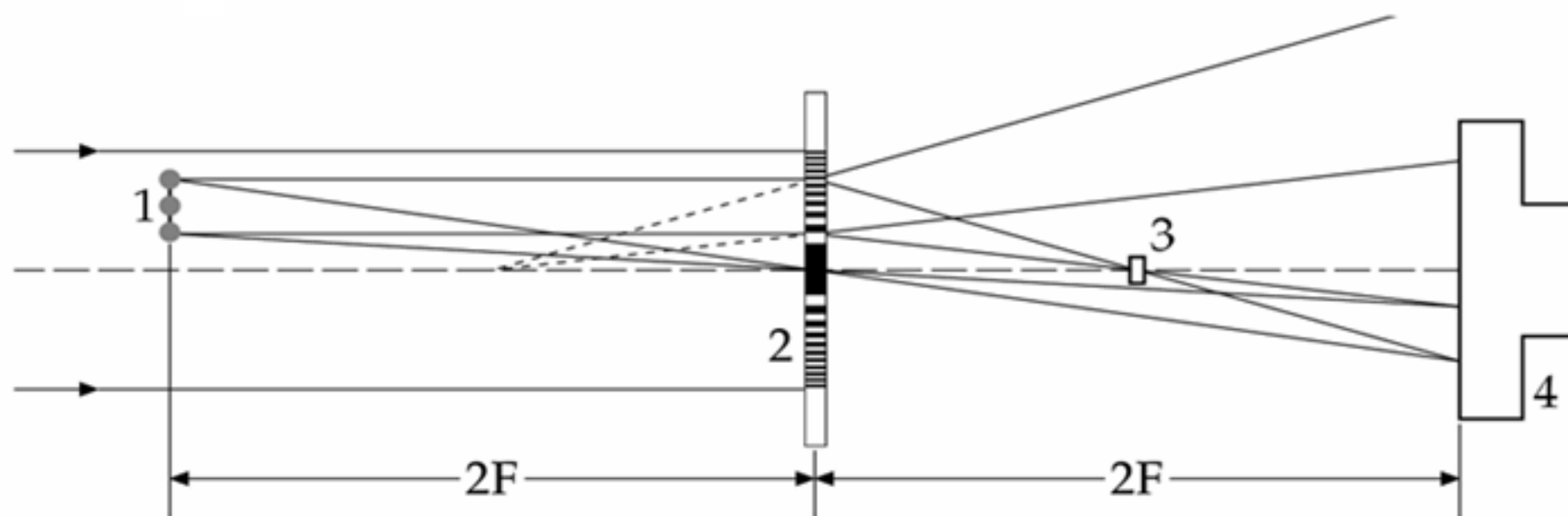
Схемы фазового контраста Цернике для рентгеновских лучей содержат только один фокусирующий элемент: преломляющую линзу (а) или зонную пластинку Френеля (б)

Четверть-волновая пластинка (3) сдвигает фазу сфокусированного пучка на $\pi/2$.

(а)



(б)



Синхротронное излучение.

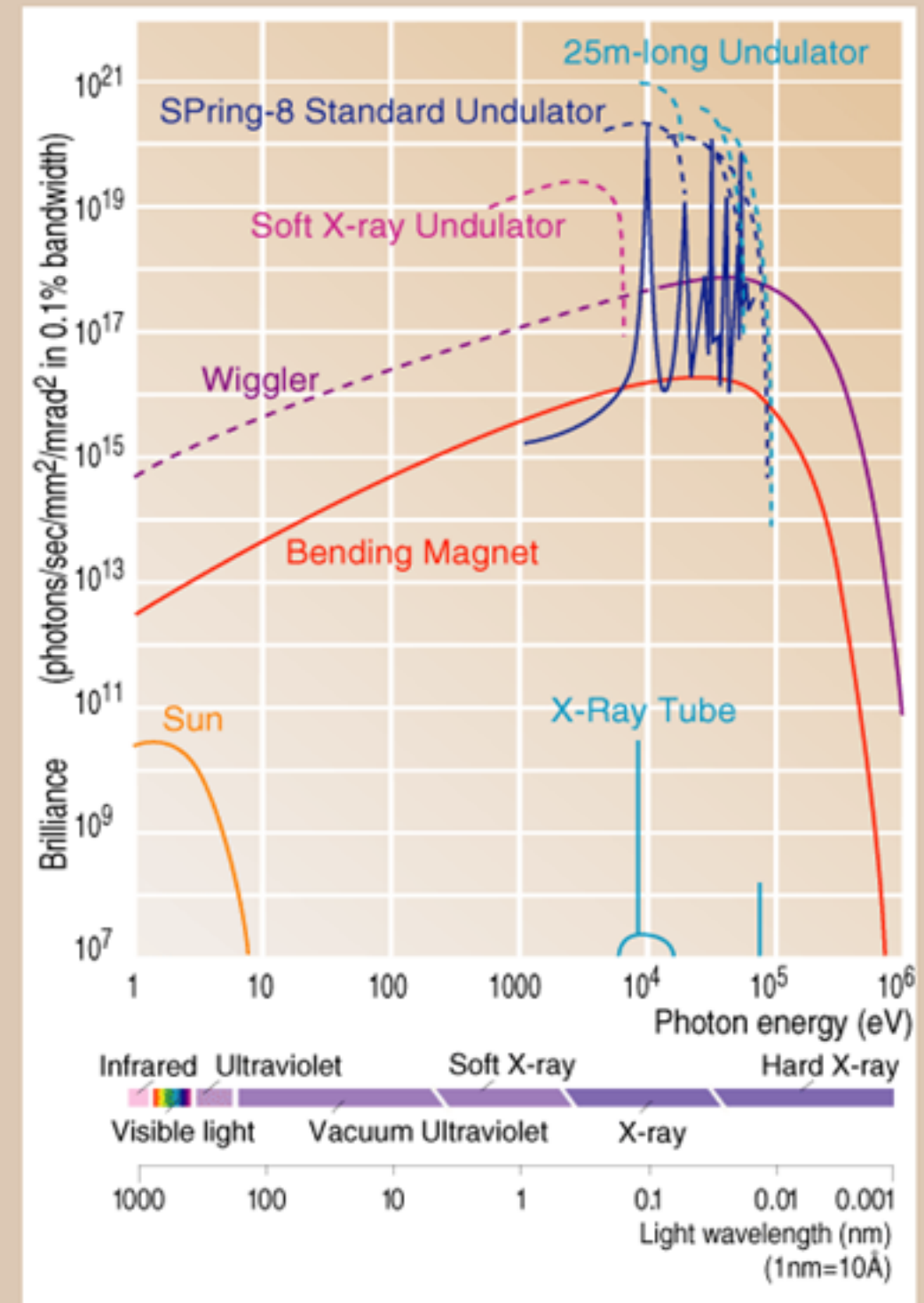
ESRF
Гренобль
Франция



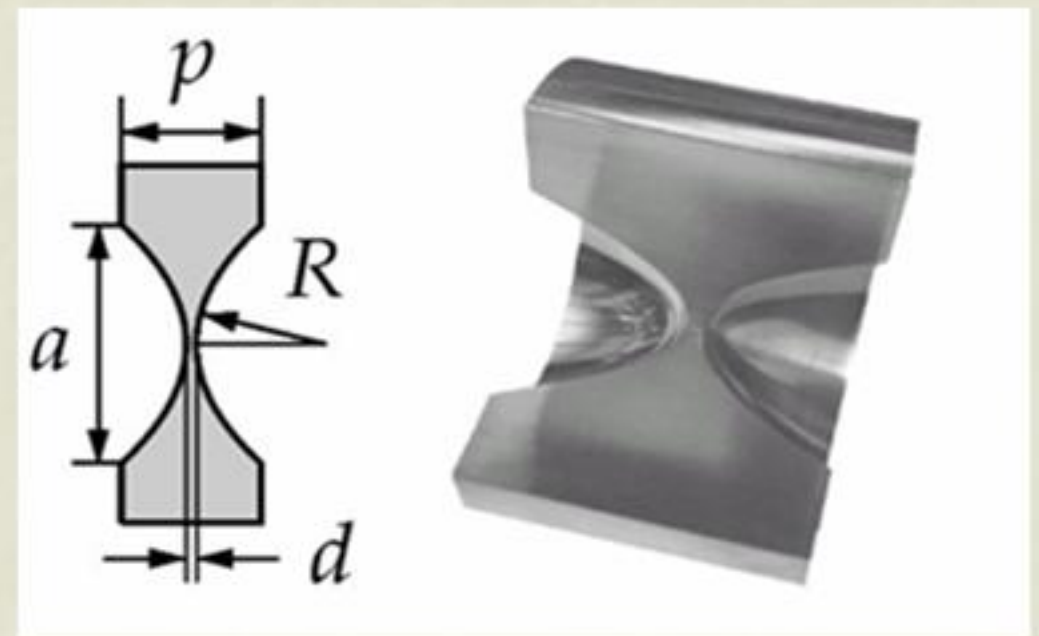
APS
Аргонн
США



SPring-8
Нуого
Япония

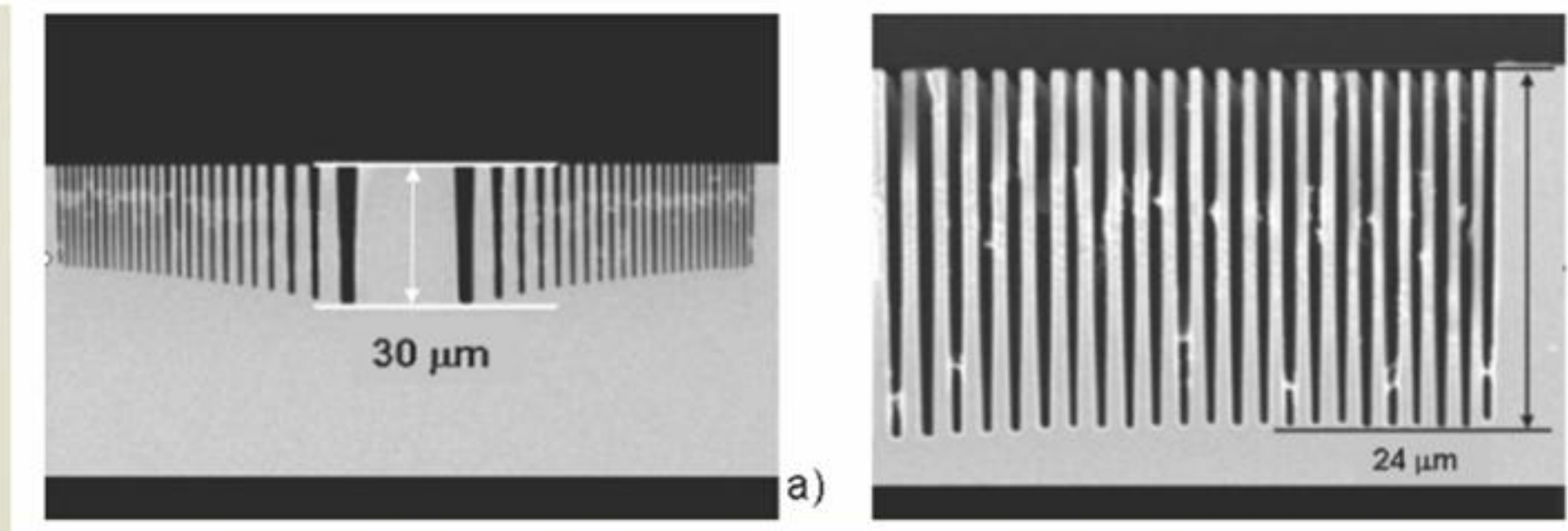
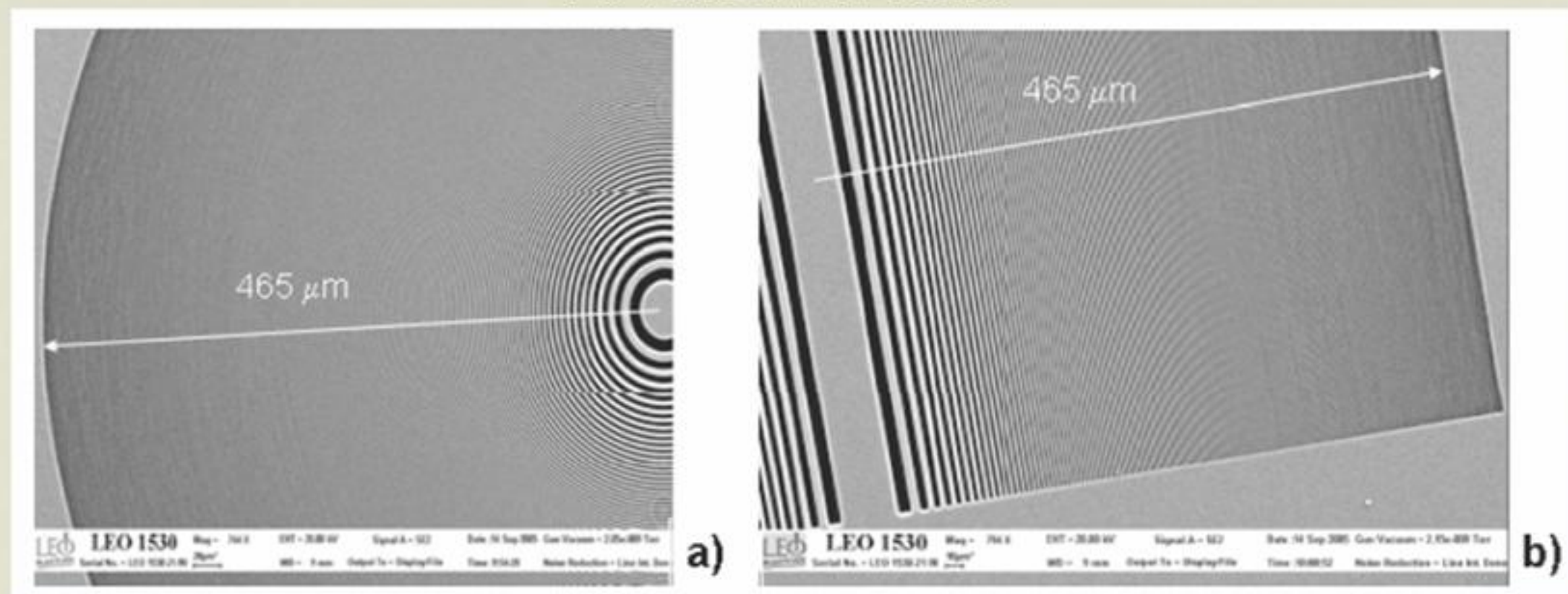


Типичный вид рентгеновской преломляющей линзы



$$a = 1 \text{ мм}, p = 1 \text{ мм}, R = 0.2 \text{ мм}, d = 10 \text{ мкм}$$

Типичный вид рентгеновских зонных пластинок



Метод расчета:

Интеграл Киркгофа - перенос в воздухе

$$E(x) = \int dx_1 P(x - x_1, z - z_1) E_1(x_1)$$

Пропагатор Киркгофа

$$P(x, z) = \frac{1}{(i\lambda z)^{1/2}} \exp\left(i\pi \frac{x^2}{\lambda z}\right)$$

x - поперечная координата (микрометры)

z - продольная координата (сантиметры)

λ - длина волны, $E(x)$ - волновая функция

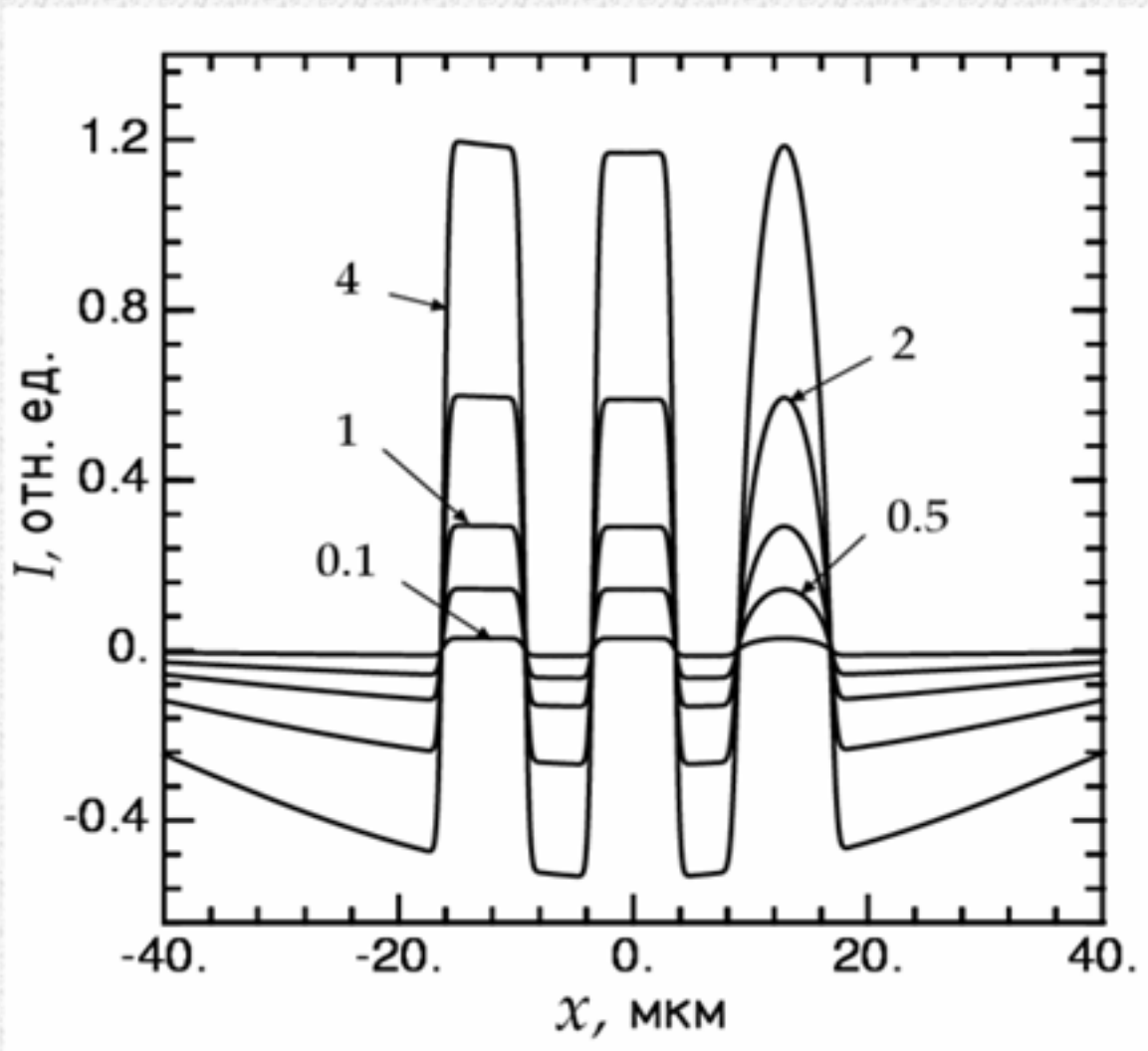
Перенос излучения через объекты (линзу)

$$E_{out}(x) = T(x)E_{in}(x)$$

Транспарантная функция объектов

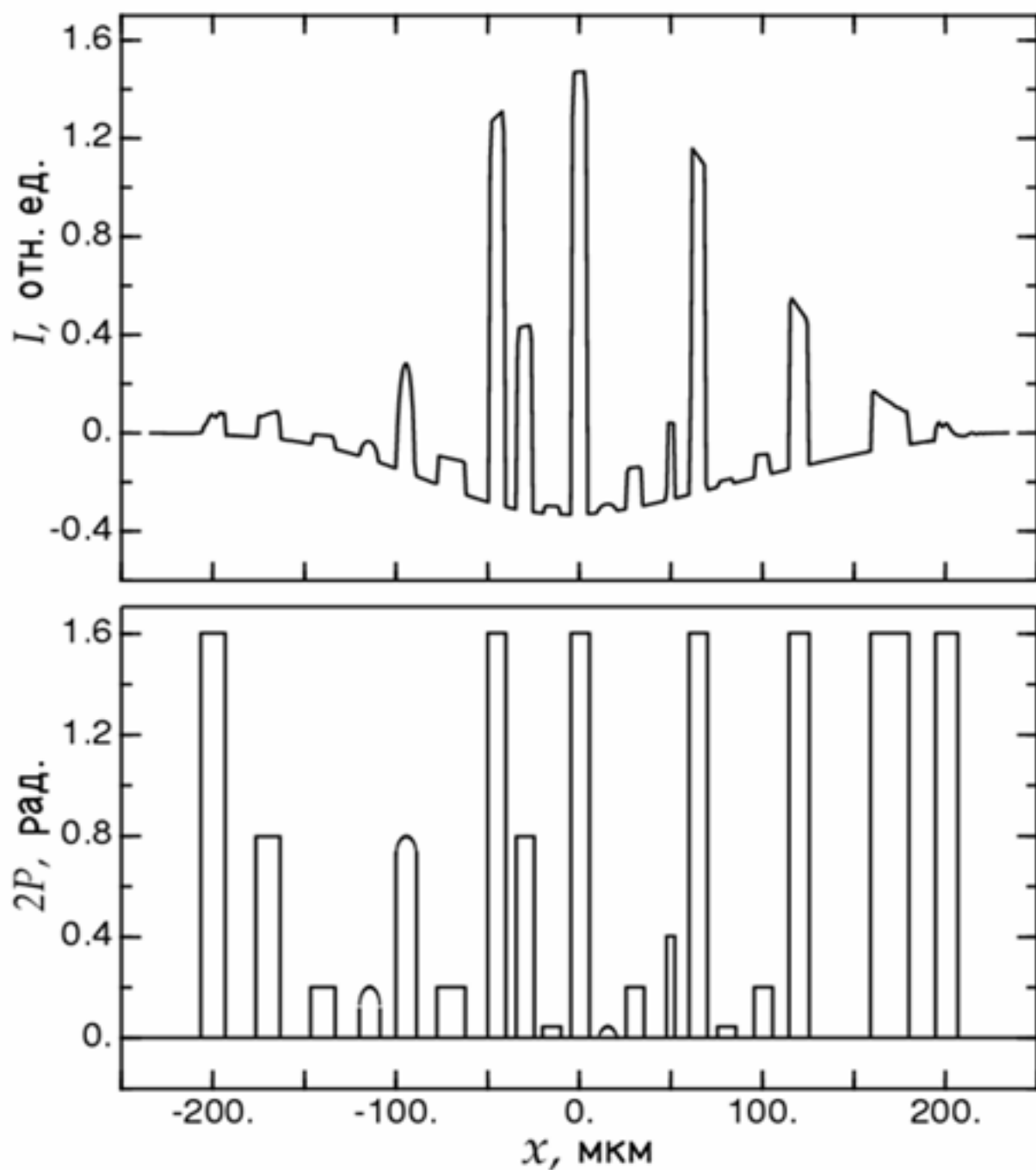
$$T(x) = \exp\left(-i[\delta - i\beta]\frac{2\pi}{\lambda}t(x)\right)$$

$n = 1 - \delta + i\beta$ - коэффициент преломления
 $t(x)$ - локальная продольная толщина, разная
для преломляющей линзы, зонной пластинки
и фазосдвигающей пластинки



параметры преломляющей линзы
 материал: Be , $t(x) = x^2/R$,
 радиус кривизны $R = 0.88$ мкм,
 фокусное расстояние
 $F = R/2\delta = 20$ см
 длина волны $\lambda = 0.1$ нм
 апертура $A = 400$ мкм
 длина линзы $p = A^2/4R = 4.6$ см
 расстояние до источника 50 м
 размер источника 50 мкм

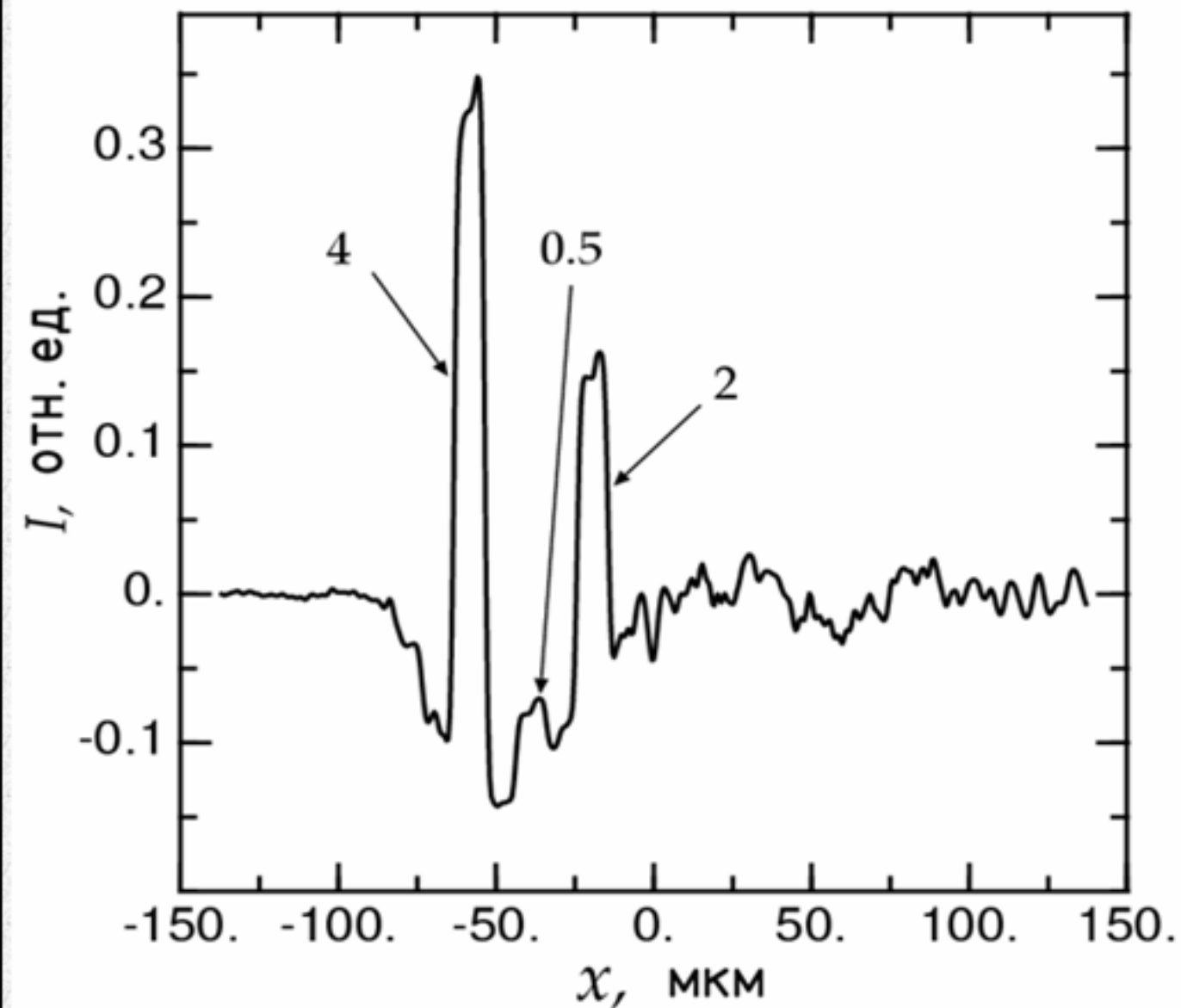
Расчет схемы Цернике с преломляющей линзой и тремя модельными объектами с различным поперечным и продольным размерами. Последний указан цифрами в микронах. 0.5 мкм еще дает заметный контраст.



Нижний фрагмент показывает удвоенный сдвиг фазы при прохождении объектов

Верхний фрагмент показывает относительный контраст после вычитания интенсивности без объектов. Видно, что только в центральной части апертуры есть соответствие. На краях апертуры контраст уменьшается из-за поглощения в линзе

Расчет схемы Цернике с преломляющей линзой, модельные объекты по всей апертуре линзы



В этом случае поглощение не портит контраст и он пропорционален сдвигу фазы в объектах. Но существует сильный когерентный шум из-за интерференции разных порядков фокусировки в ЗТТ. Для уменьшения шума необходимо усреднять картину, что уменьшает поперечное разрешение.

Расчет схемы Цернике с зонной пластникой, три модельных объекта с разной продольной толщиной, которая указана цифрами в микронах на рисунке.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что и преломляющая параболическая линза, и зонная пластинка могут быть успешно использованы в качестве объективов в методе фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении. При этом у каждого из этих рентгено-оптических приборов есть свои особенности, преимущества и недостатки. Преломляющая линза наиболее качественно восстанавливает структуру объектов, расположенных в центральной части апертуры, в то время как образцы на периферии практически не изображаются. Минимальные продольный и поперечный размеры кремниевых объектов, которые можно наблюдать с помощью линзы, составили соответственно 0.1 мкм и 1 мкм. Зонная пластинка после модификации схемы Цернике также позволяет восстановить структуру объектов, однако обладает меньшим разрешением. В целом методика Цернике в рентгеновской области демонстрирует лучшие возможности, чем обычная техника фазового контраста. Из результатов проведенной работы можно сделать вывод, что метод формирования изображений микрообъектов с помощью схемы Цернике в жестком рентгеновском диапазоне является перспективным и требует дальнейшего изучения. В частности имеет смысл изучить возможности ее применения не только на существующих синхротронных источниках, но и на будущих источниках в виде лазера на свободных электронах.