



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской
академии наук

Рентгеновская акустооптика: состояние дел, перспективы

А.Е. Благов, М.В. Ковальчук, Ю.В. Писаревский



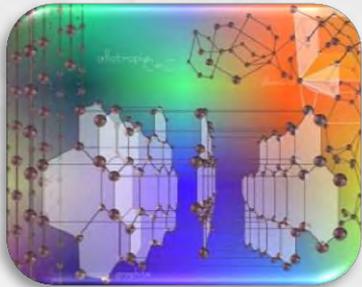
Совещание по использованию рассеяния нейтронов
и синхротронного излучения в конденсированных средах

27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Старый Петергоф

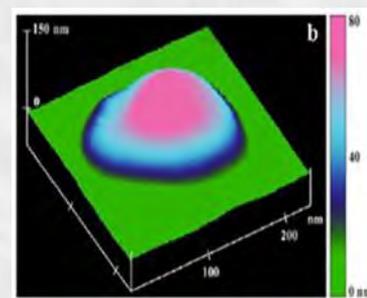
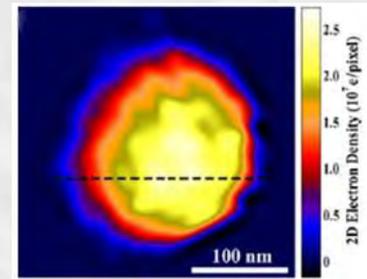
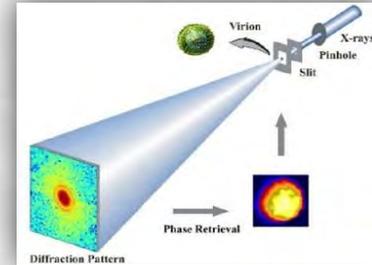
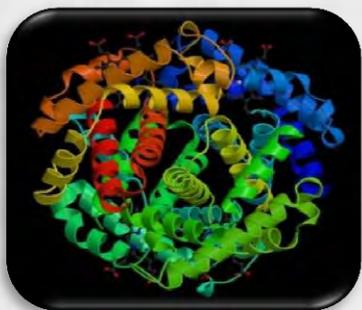
Рентгеновское излучение



Рентгеновские лучи - уникальный по **чувствительности,** **проникающей способности и пространственному разрешению** инструмент.



Рентгеновская диагностика один из наиболее эффективных методов исследования структуры и свойств материалов с ангстремным и нанометровым разрешением.



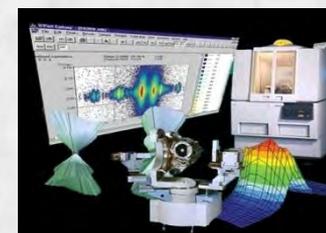
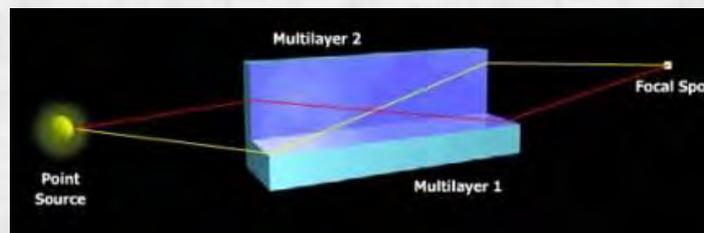
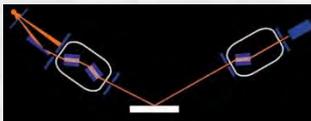
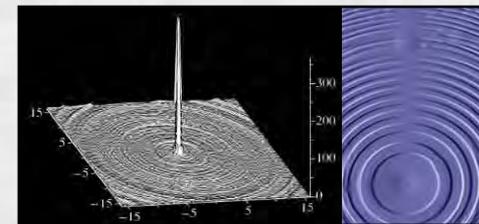
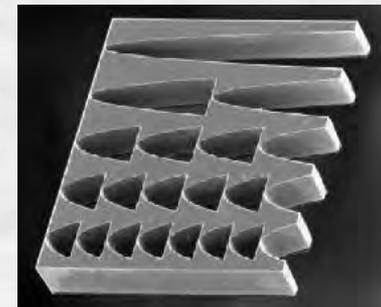
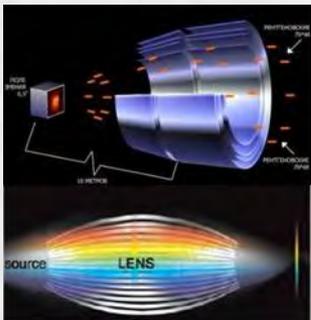
Формирование рентгеновского пучка в эксперименте

❖ Дифракционная рентгеновская оптика (кристаллы, многослойная оптика)

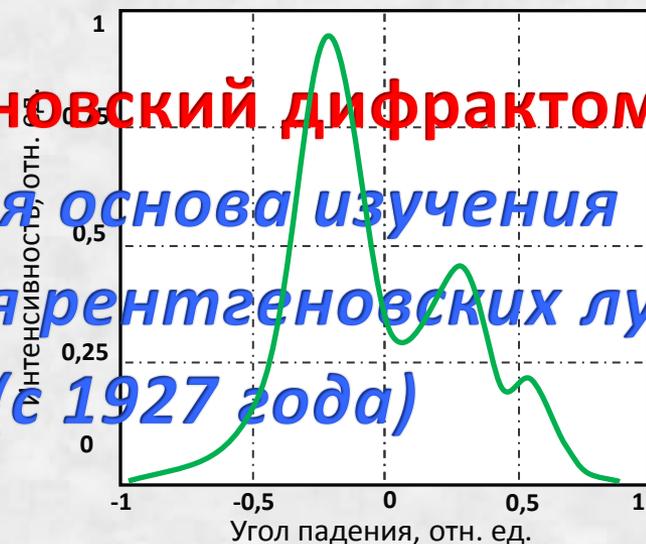
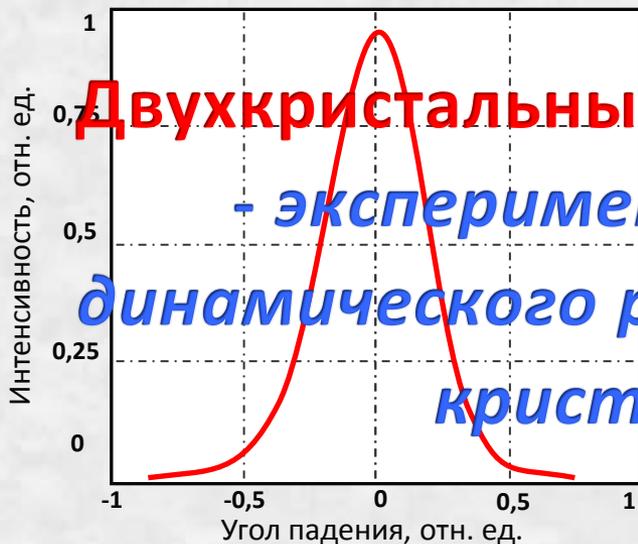
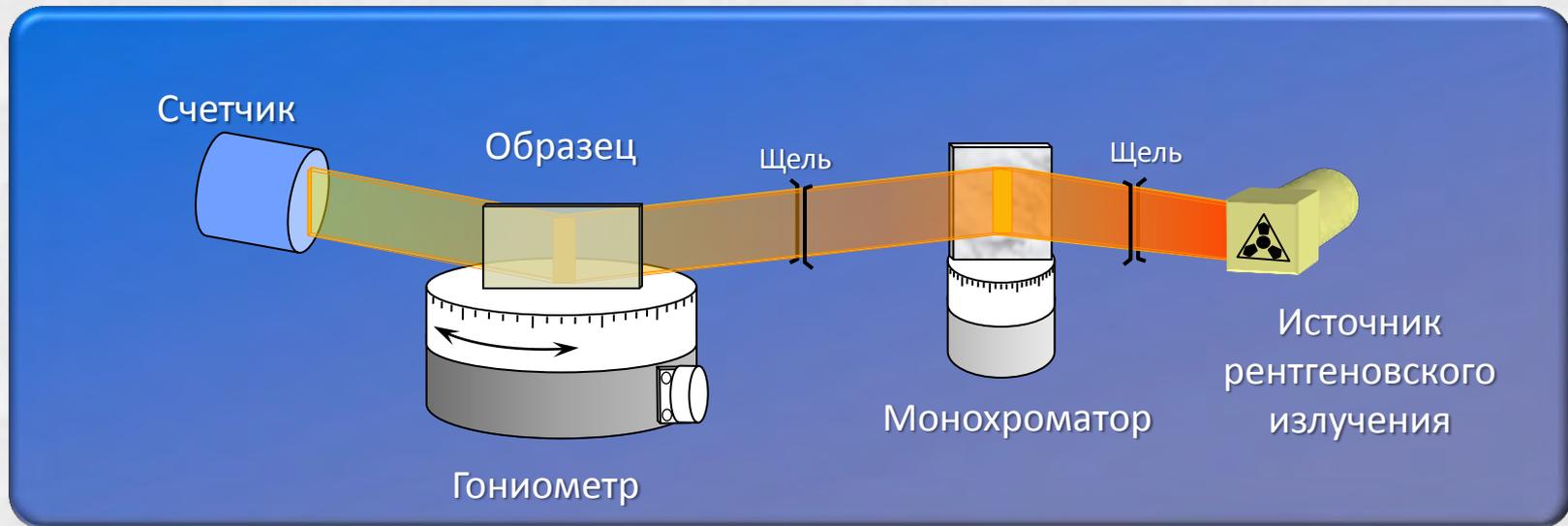
❖ Оптика скользящего падения, (линзы, коллиматоры, волноводы)

❖ Рефракционная рентгеновская оптика (поликапилярная оптика)

❖ Френелевская оптика (зонные пластинки)

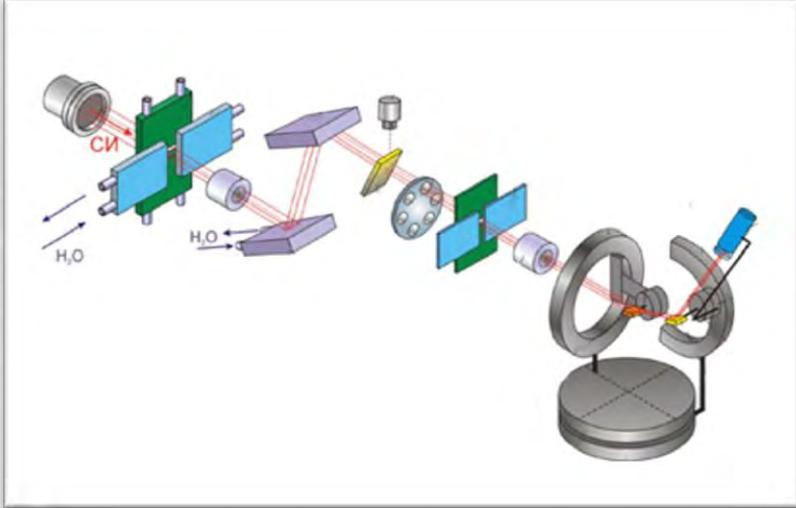


Рентгеновский дифрактометр



Двухкристальный рентгеновский дифрактометр
- экспериментальная основа изучения
динамического рассеяния рентгеновских лучей
кристаллами (с 1927 года)

Изменение условий эксперимента

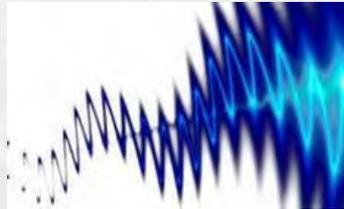


- ❖ **Механическое управление (обычная рентгеновская оптика)**
Применяются сложные прецизионные механизмы: гониометры, устройства перемещения, изгиба и наклона.



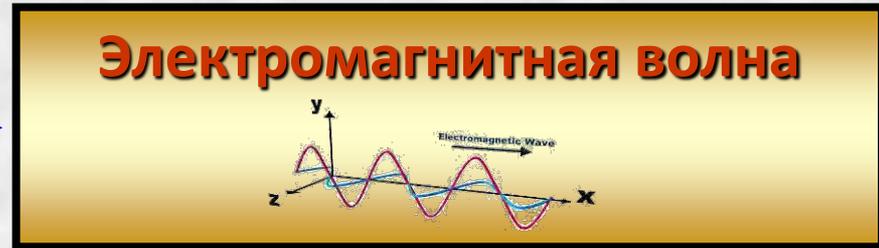
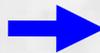
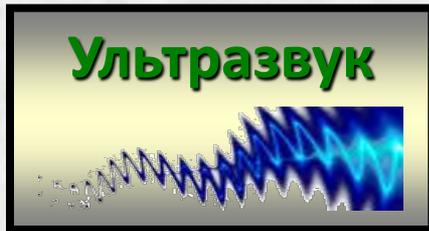
- ❖ **«Немеханическое» управление (адаптивная рентгеновская оптика)**
Воздействие на среду распространения рентгеновского излучения: Деформация, электрическое поле, нагрев, ультразвук.

Ультразвук, вероятно, один из традиционных, простых и эффективных методов воздействия на твердое тело.

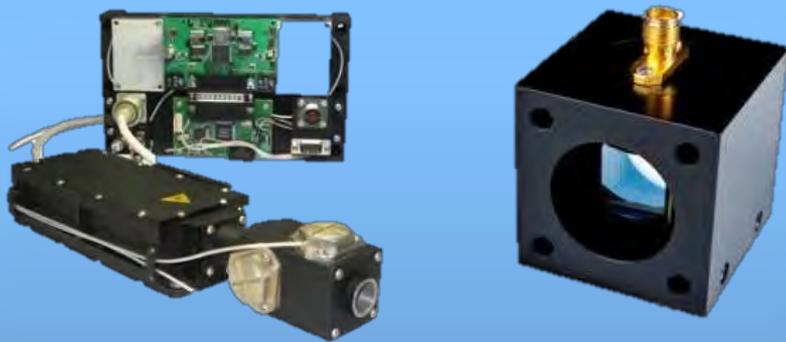


Управления параметрами рентгеновского пучка может быть осуществлено с помощью кристалла, промодулированного ультразвуковой волной.

Ультразвуковое управление параметрами электромагнитной волны



Оптический диапазон



- Модуляторы
- Дефлекторы
- Перестраиваемые фильтры
- Акустооптика



Рентгеновский диапазон

Управление рентгеновским пучком



Рентгеноакустические взаимодействия

Характер взаимодействия зависит от соотношений между длиной упругой волны λ и шириной d рентгеновского пучка

Высокие частоты

Средние частоты

Низкие частоты

λ

> 10 мГц

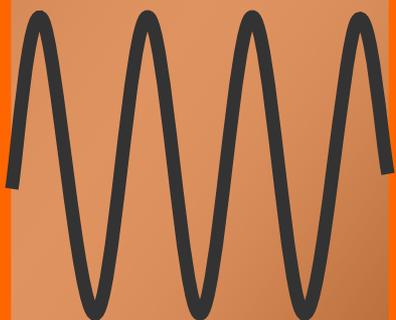
1-5 мГц

100-10000 кГц

Кристалл

$$d \gg \lambda$$

Сверхрешетка



$$d \approx \lambda$$

Пучок

d (0.01 - 1 мм)



$$d \ll \lambda$$

Регулярная деформация

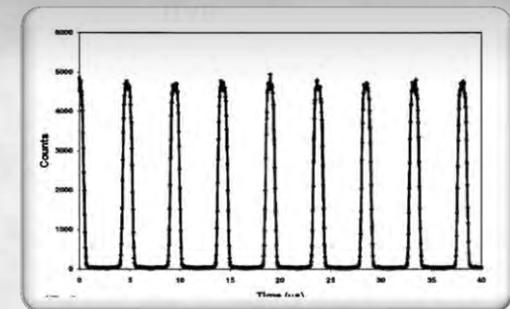
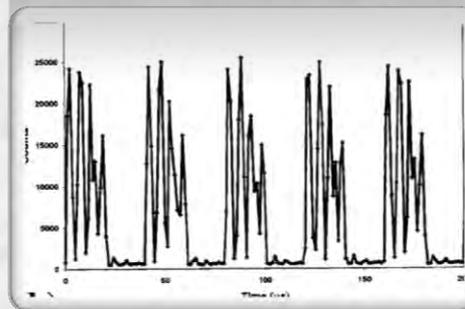
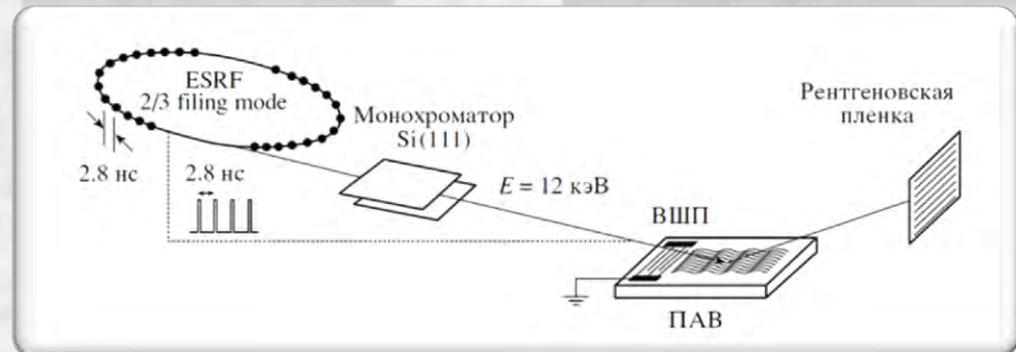
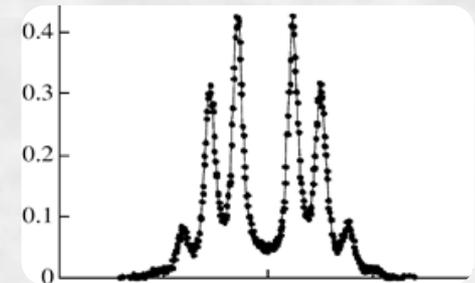
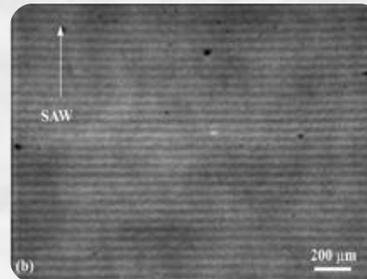
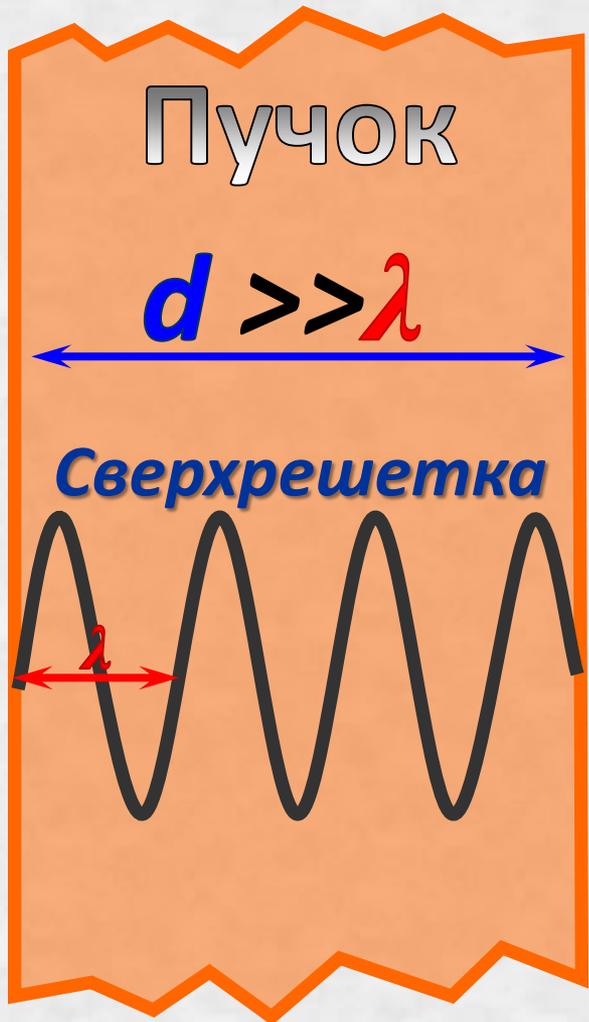
однородная

градиент



Высокие частоты

Ультразвуковая волна создает сверхрешетку и дифракционная картина характерна наличием дополнительных дифракционных максимумов.



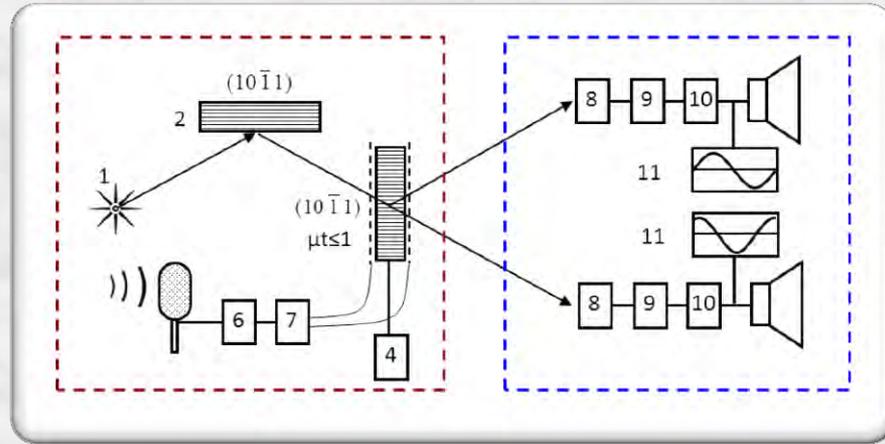
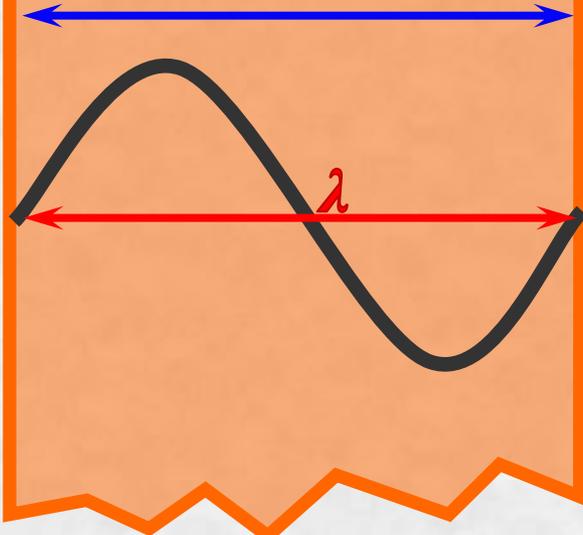
Средние частоты

Ультразвуковая волна создает сложные пространственные неоднородности

1-5 мГц

Пучок

$$d \approx \lambda$$



Journal of Applied Crystallography
ISSN 0021-8995

Received 11 March 2001
Accepted 18 September 2001

research papers

Controllable variation of the intensity of diffracted X-ray beams and double modulation of such beams for transmission and reception of audio information

M. A. Navasardyan

Department of Physics, Yerevan State University, Alex Manoogian 1, 175049, Yerevan, Armenia
Correspondence e-mail: amnavas@ysu.am

This paper discusses research devoted to the study of the intensity change of the diffracted (β) beam of a monochromatized X-ray beam during one oscillation period of an acoustic wave. It is shown that for controllable variation of the intensity of the diffracted beam, a practical device for the transmission and reception of speech, with the help of a quartz crystal, can be constructed. Finally, there are discussed various

RECENT ARTICLES IN IUCR JOURNALS

Journal of Applied Crystallography

JOURNAL OF APPLIED CRYSTALLOGRAPHY

Controllable variation of the intensity of diffracted X-ray beams and double modulation of such beams for transmission and reception of audio information

M.A. Navasardyan, *J. Appl. Crystallog.* (2001), 34, 763–768

Communicating acoustic information with the help of Bragg reflections may seem surprising at first sight. Prof. Navasardyan of Yerevan State U., Armenia addresses the topic in a recent issue of the *J. Applied Crystallography*.

The story starts in the 1930s, when the diffracted X-ray intensity from a quartz crystal was noticed to increase when applying a temperature gradient or ultrasonic oscillations. Such investigations gathered momentum after the discovery (in 1941) of the Borrmann effect, or anomalous transmission, through relatively perfect single crystals. Two regimes were of interest: those with $\mu r \leq 10$, where μ is the linear absorption coefficient and r is the thickness of the crystal. Explanations for unusual behaviour of the transmitted beams were sought in X-ray standing waves and in a decrease in primary extinction. With a temperature gradient of a certain magnitude and direction (perpendicular to the reflecting atomic planes), the energy of the incident beam was wholly diverted into the reflected beam.

Controllable complete reflection in the Laue case, 'forced' by a temperature gradient or ultrasonic oscillations, is distinguished from the total reflection in Bragg geometry within the angular range of Darwin reflections. Controllable complete reflection has been demonstrated for quasi-plane waves in double-crystal ($(+)$ and $(-)$) geometries (see Fig. 1).

Of interest is the time-dependence of the X-ray intensity from the crystal, simultaneously excited by ultrasound resonance (of high frequency ν) and audio

diffraction (β) beam intensity can equal the initial intensity of the transmitted (β) beam. During one oscillation period, there can be several hundreds to hundreds of thousands of photons in a beam from an X-ray tube (35 kV and 15 mA) and a detector registers a continuous photon count varying by a low frequency ($\omega \leq 20$ kHz). It is thus possible to transmit and to receive audio information (e.g. speech) by the X-ray beam and a possible scheme is shown in Fig. 2.

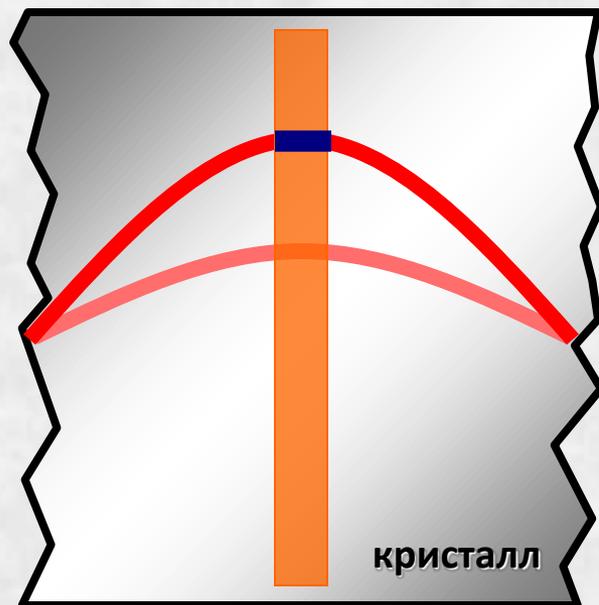
The quartz crystal modulator is set for Bragg reflection in Laue geometry and resonance oscillations ($\nu = 2880/\lambda$) so that the condition $r = \lambda/2$ is fulfilled, where λ is the wavelength of the acoustic wave in quartz. The diffracted beam intensity increases (by a tenfold factor) and the low-frequency (ω) generator (a microphone or tape recorder) modulates the crystal. The diffracted beam intensity also oscillates with frequency ω , which is registered on the scintillation counter after it has travelled some distance, possibly penetrating barriers inaccessible to other forms of radiation. In this paper, Navasardyan also lists other uses, including the study of fast chemical reactions, the tracking of time-

Diagrams illustrating X-ray diffraction setups and beam profiles. Diagram (a) shows a quartz crystal (SiO₂) with a thickness r and a Bragg angle $\theta = 1.17^\circ$. Diagram (b) shows a similar setup with a different Bragg angle $\theta = 0.112^\circ$. Diagram (c) shows a beam profile with a width of 0.8 mm and a height of 1.1 mm. The beam is modulated by a temperature gradient $\Delta\theta_B = \max$ and $\Delta\theta_B = 0$.

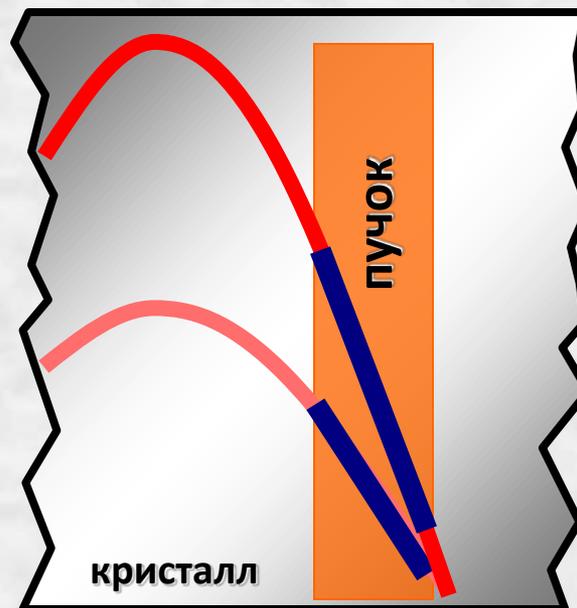
V. Mirzoyan

Профили деформации, создаваемые в кристалле длинноволновым ультразвуком

Однородная деформация

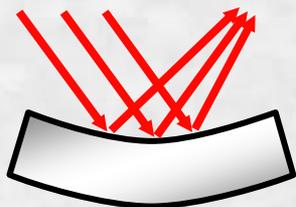


Градиентная деформация

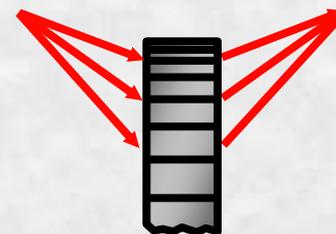


Ультразвук создает управляемые деформации, аналогичные элементам статической рентгеновской оптики

Экспериментальная реализация рентгеноакустических взаимодействий



Геометрия Брэгга –
изгибные колебания



Геометрия Лауэ –
продольные колебания



Схема составного резонатора

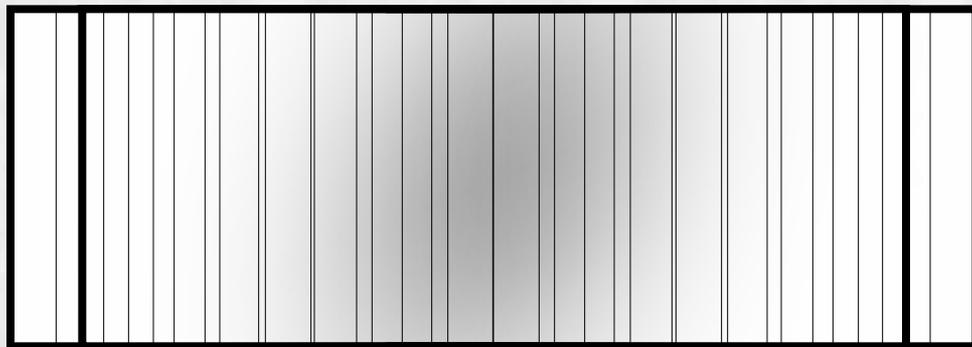


В образцах возбуждалась стоячая продольная волна
Длины составных кристаллов выбирались исходя из
условия совпадения собственных частот

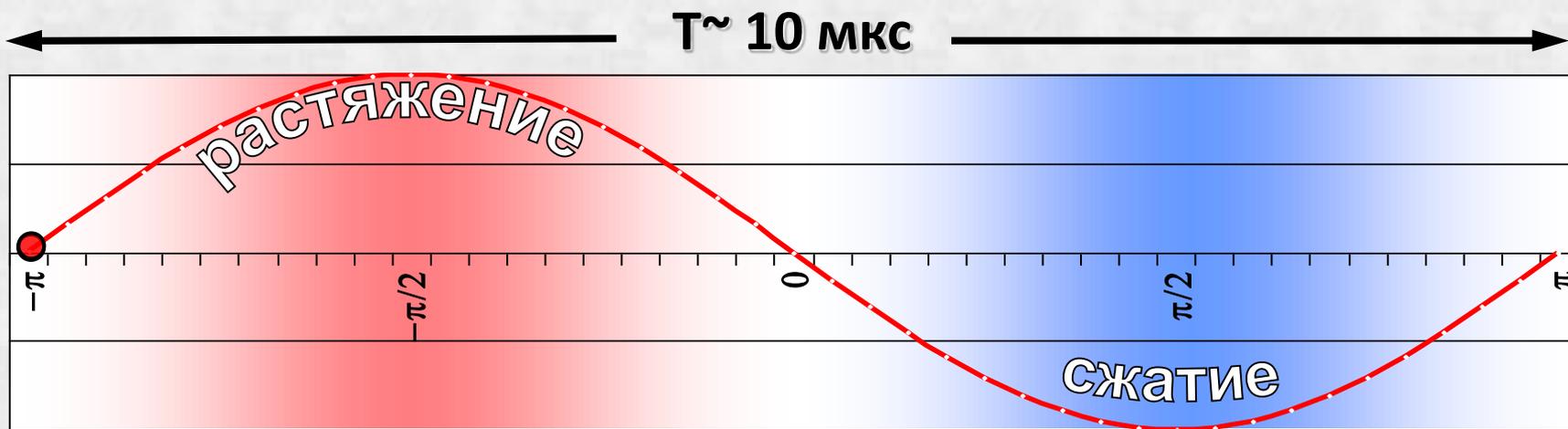
$$\frac{V_p}{2L_p} = \frac{V_c}{2L_c} = F_{rez}$$

Пространственная и временная зависимость амплитуды деформации в кристалле

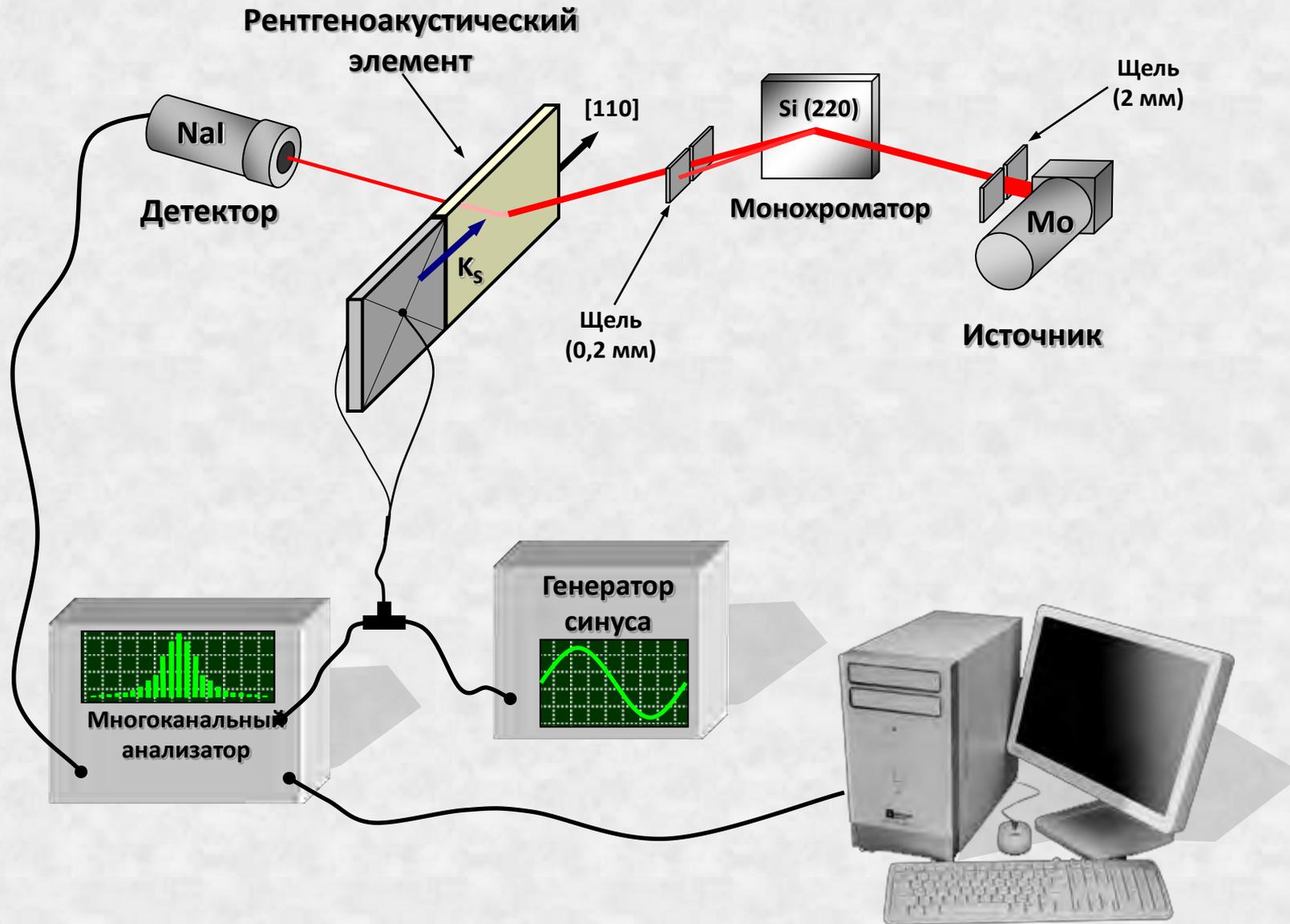
Пространственная зависимость амплитуды деформации



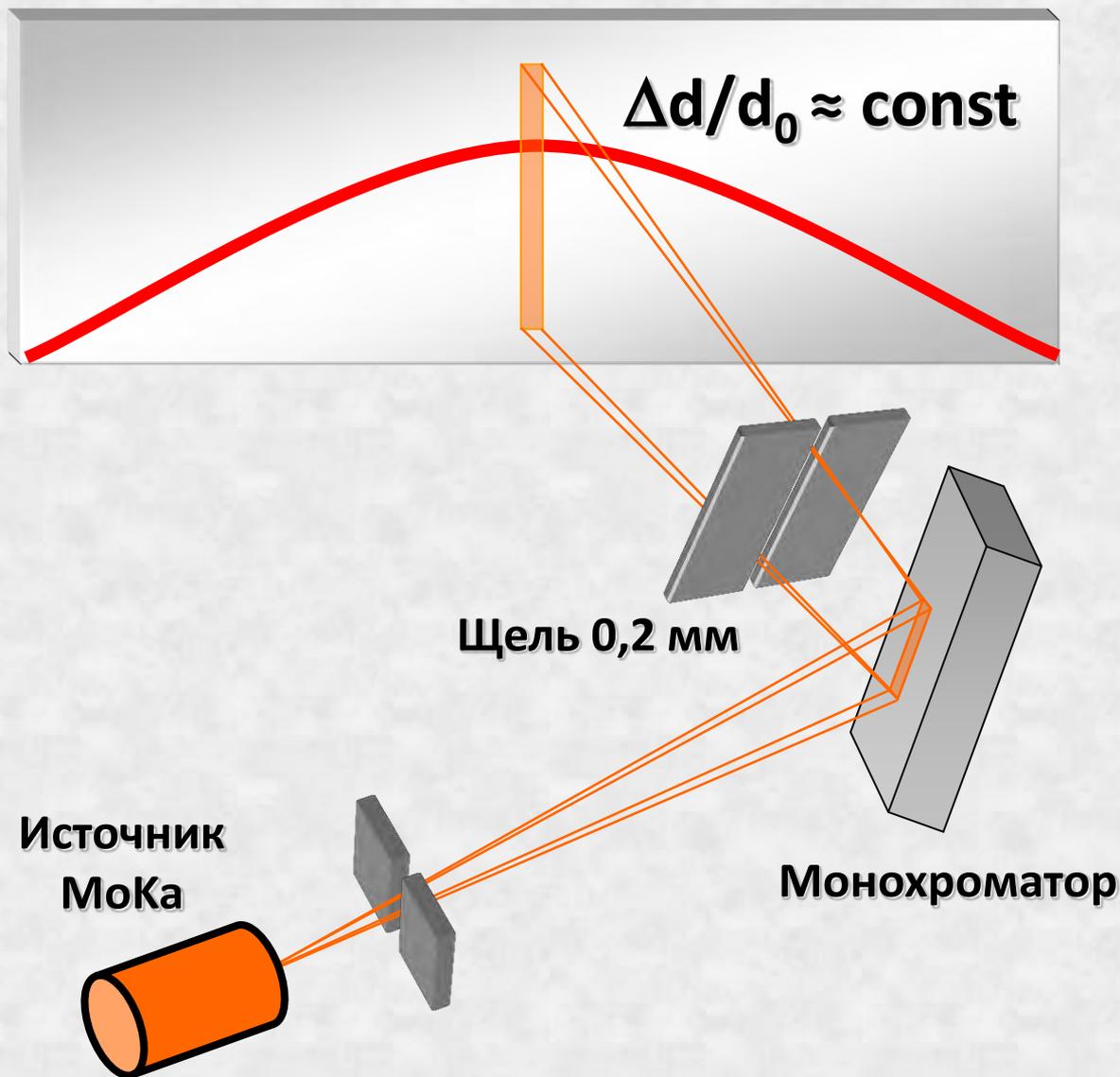
Изменение амплитуды деформации во времени



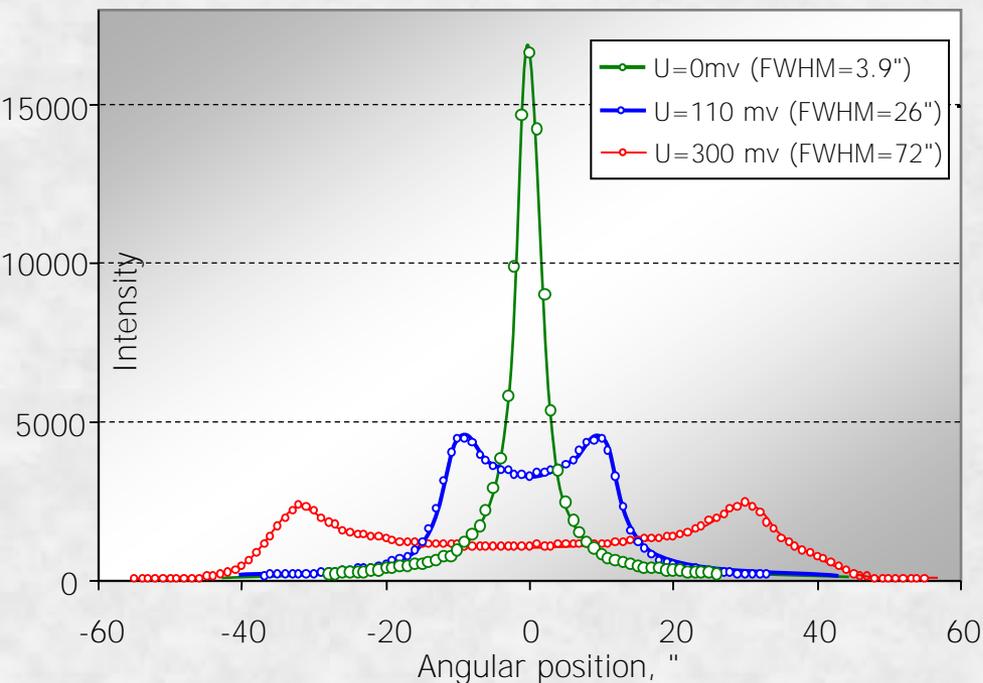
Экспериментальная схема



Однородная динамическая деформация

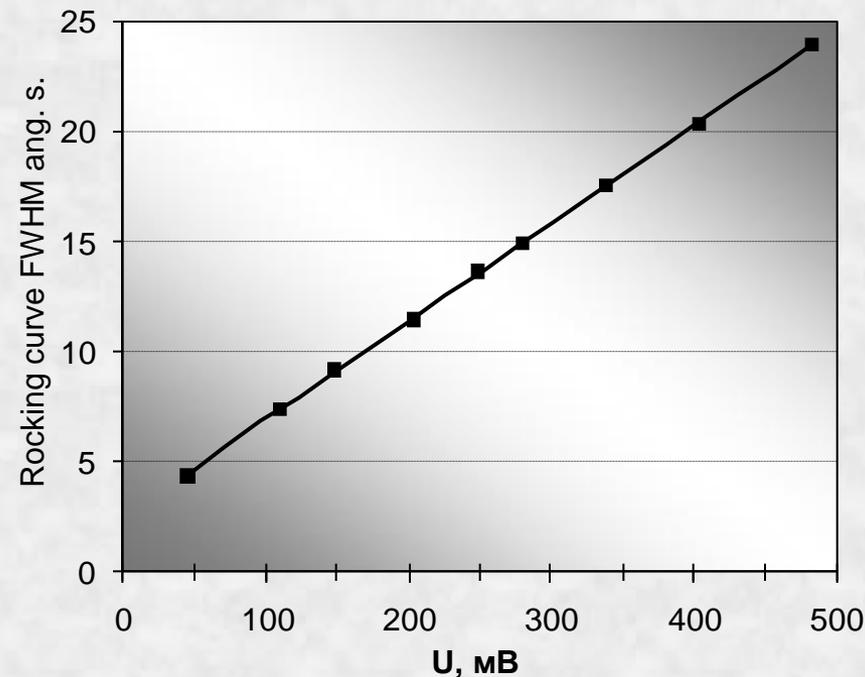


Зависимость от мощности ультразвука



● Ультразвуковая деформация периодически изменяет Брэгговские условия, что приводит к уширению КДО

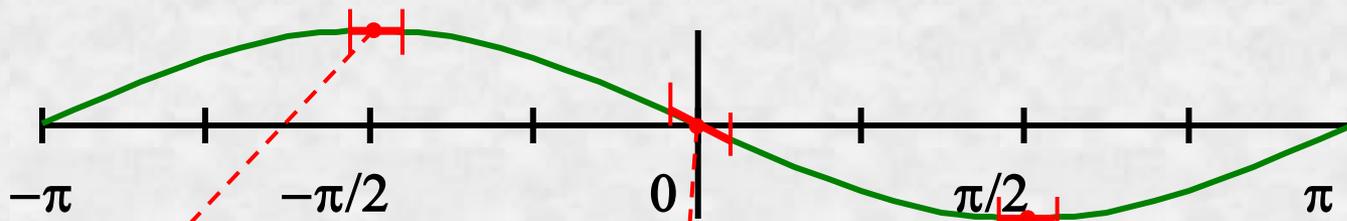
● Уширение происходит при сохранении интегральной интенсивности



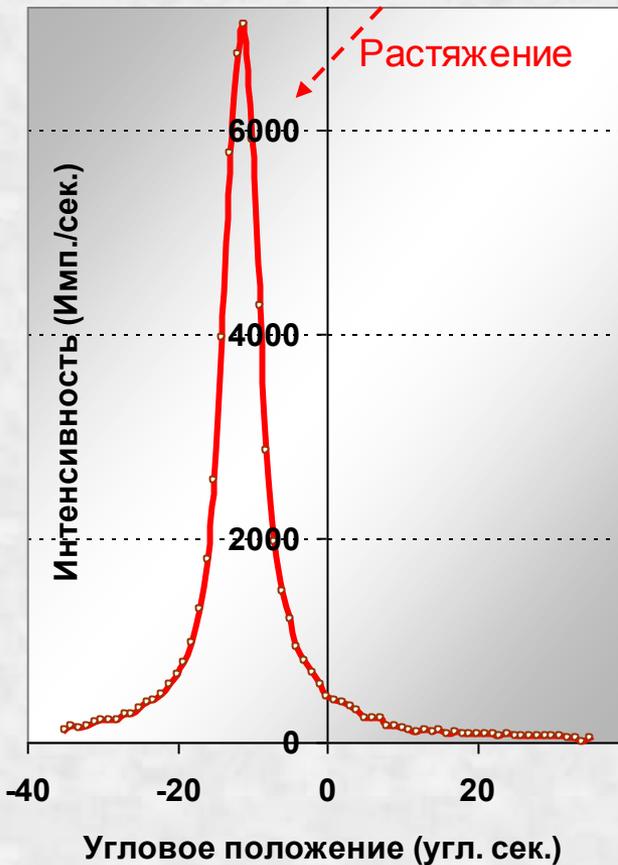
● Полуширина КДО возрастает пропорционально ростом мощности ультразвука

● Так, что мы имеем возможность измерять амплитуду ультразвуковой деформации на данном участке резонатора

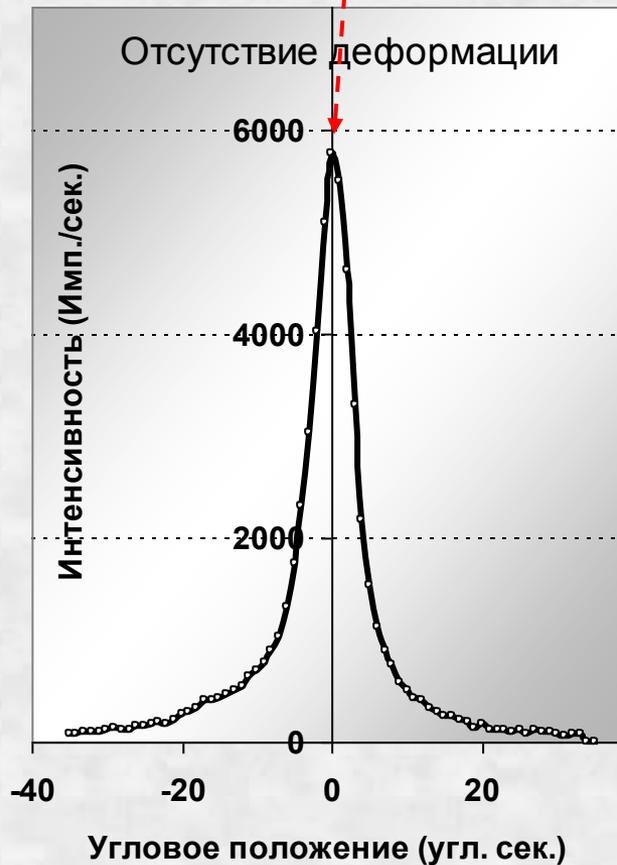
Стробоскопические измерения



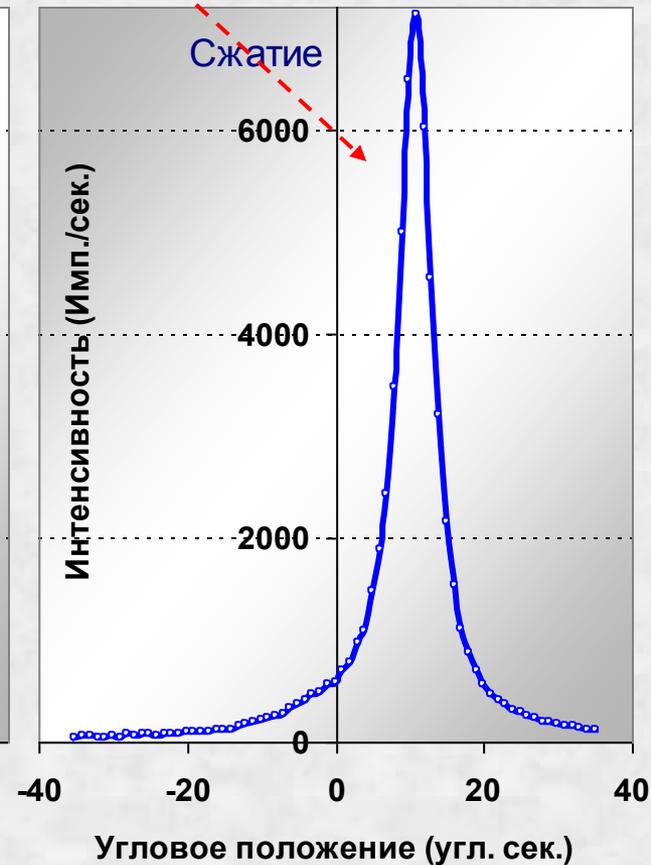
Растяжение



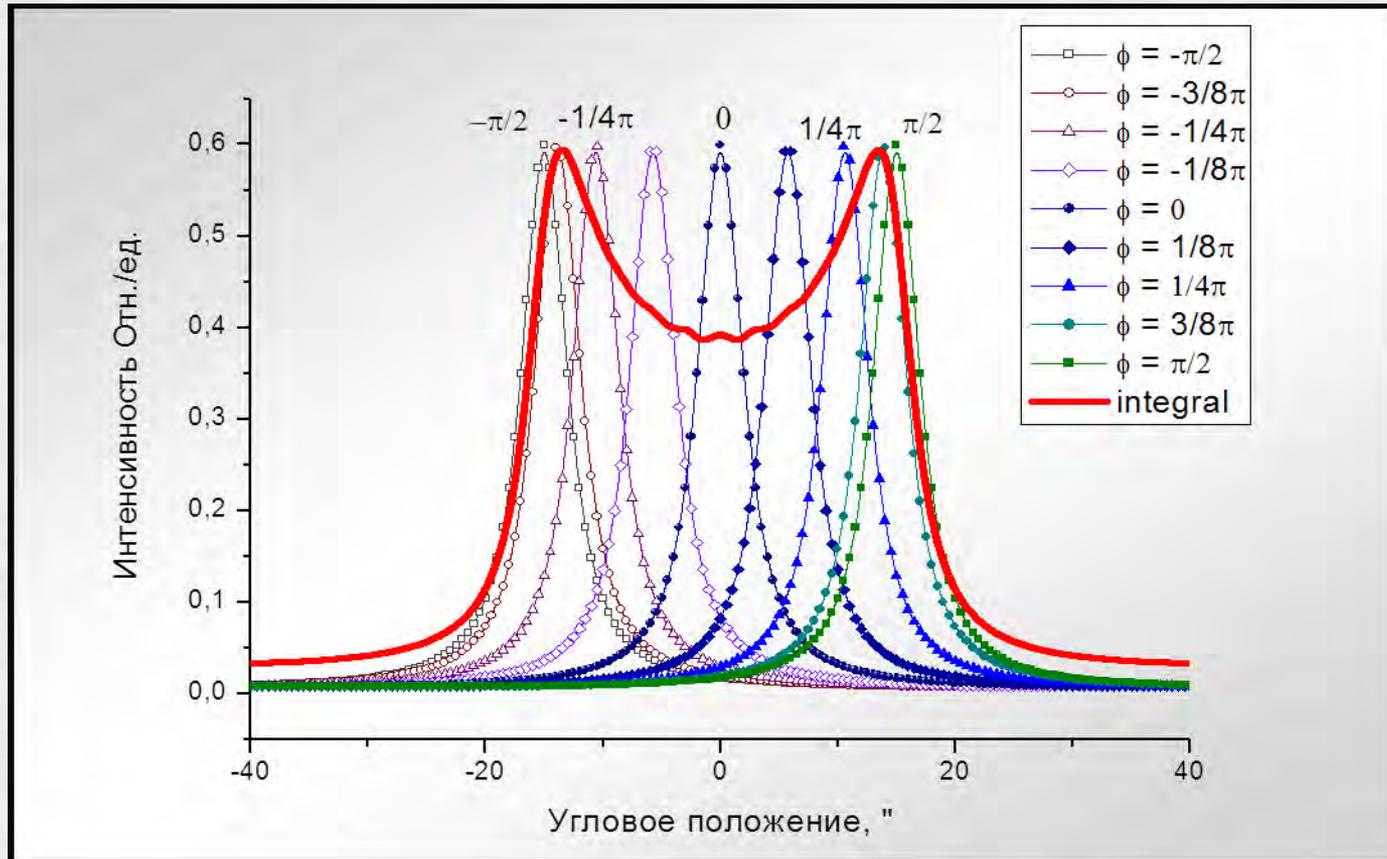
Отсутствие деформации



Сжатие

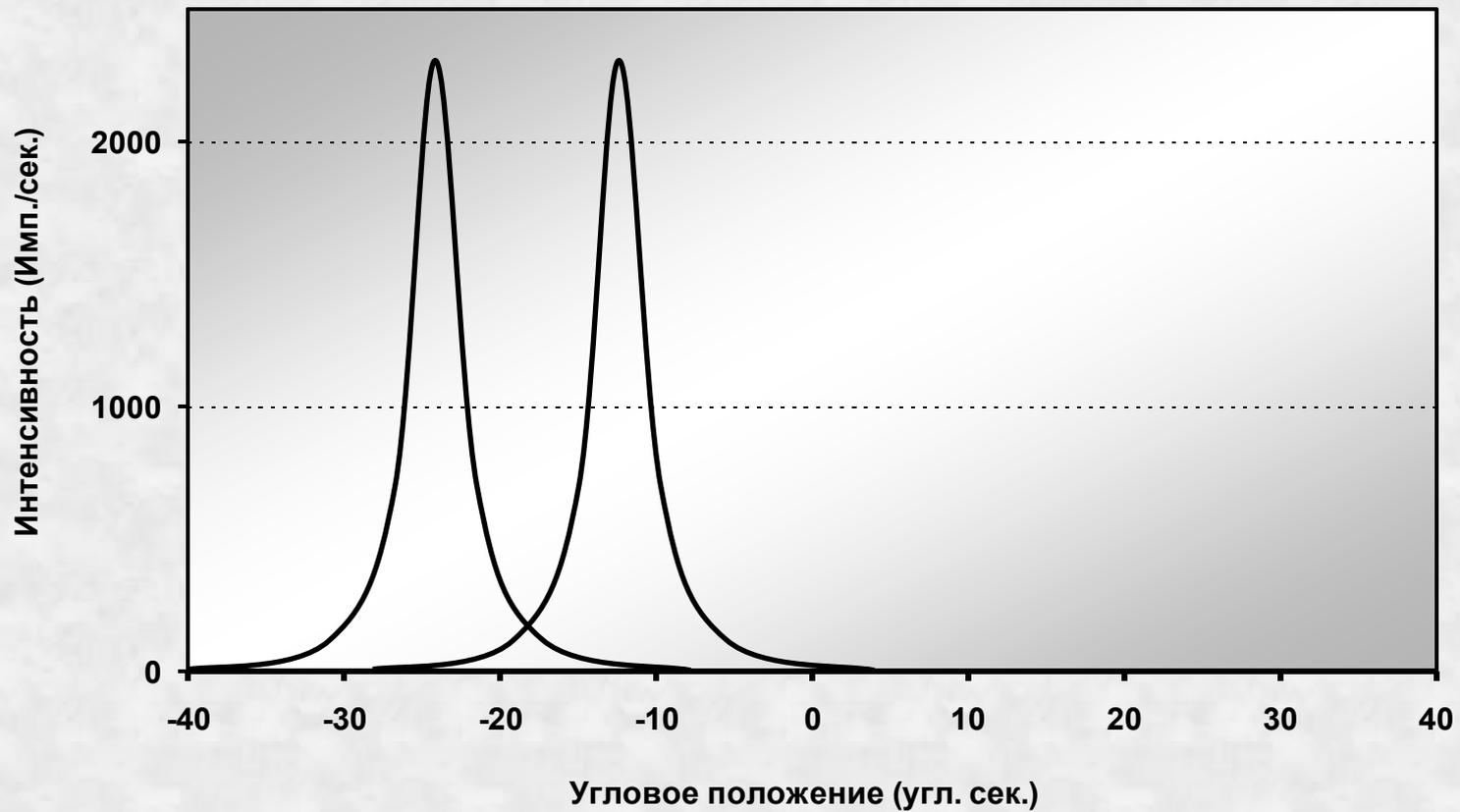
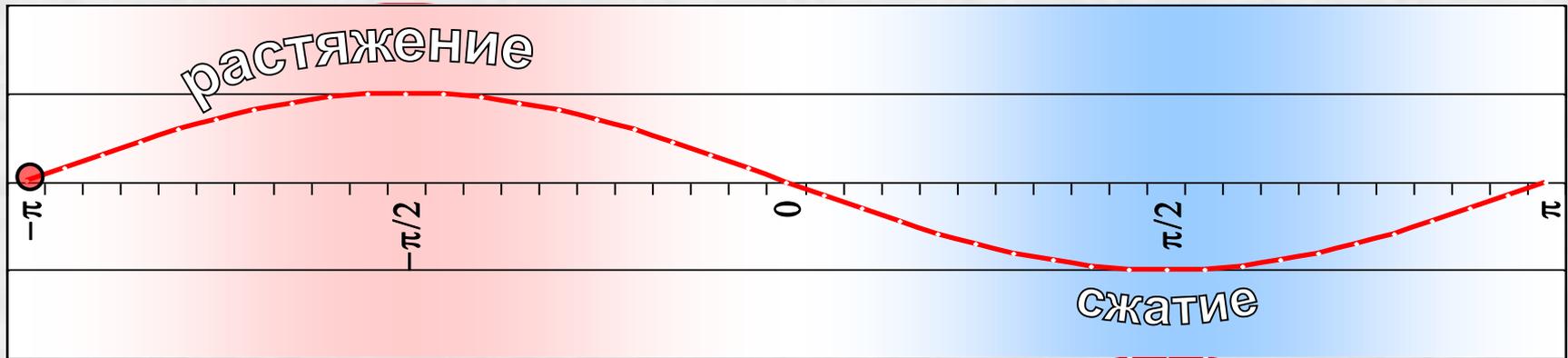


Однородная деформация Стробоскопические измерения



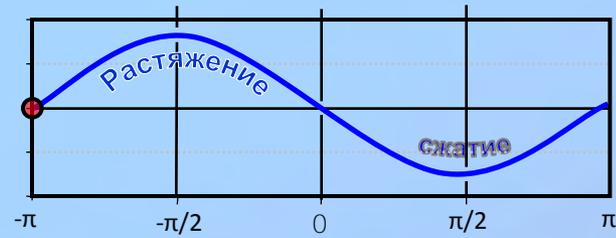
Кривые дифракционного отражения, измеренные для фазы растяжения кристалла, фазы сжатия и фазы нулевой деформации кристалла.

$T \sim 50$ мкс



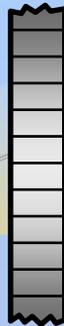
Управление угловым положением рентгеновского пучка

Фаза ультразвуковых колебаний

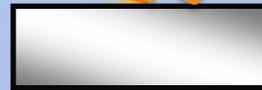


Рентгено-акустический кристалл

Расходящийся монохроматический рентгеновский пучок



Исследуемый кристалл



Рентгеновский детектор



Схема сканирования и управления угловым положением рентгеновского пучка

Управление пространственным положением рентгеновского пучка

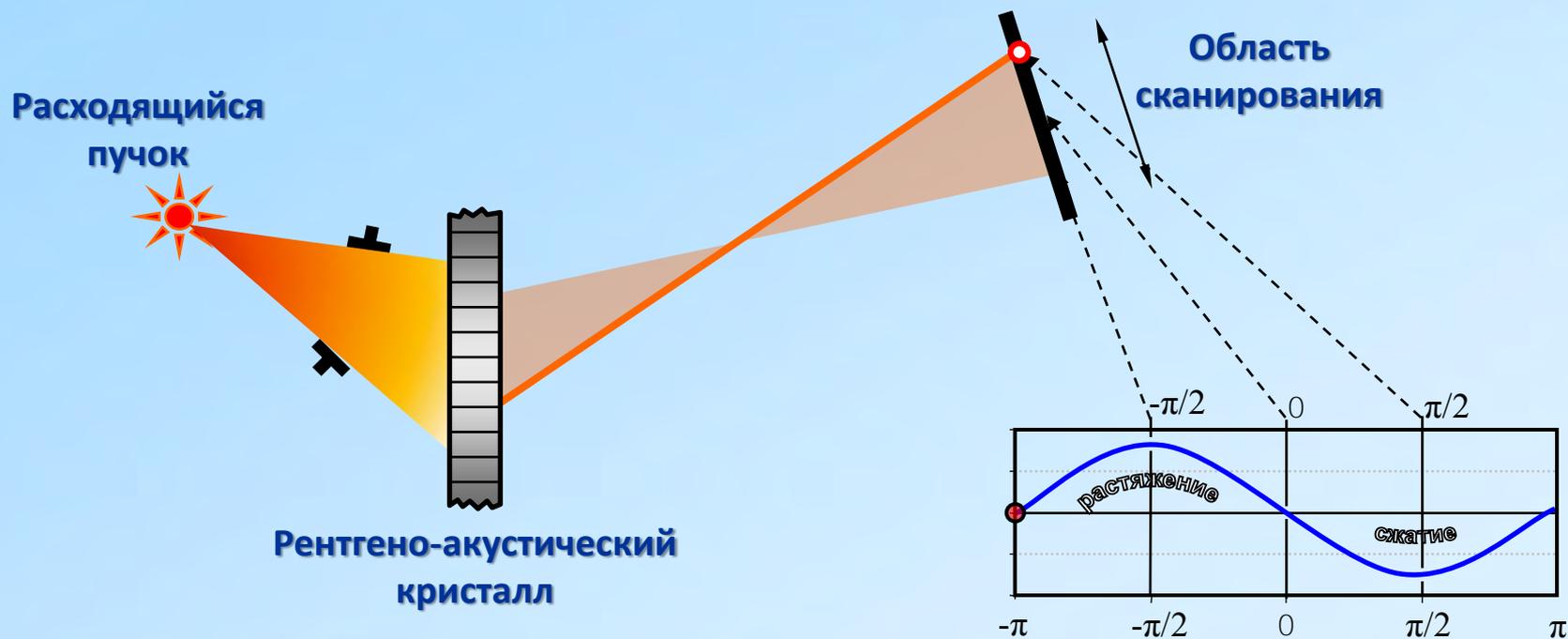


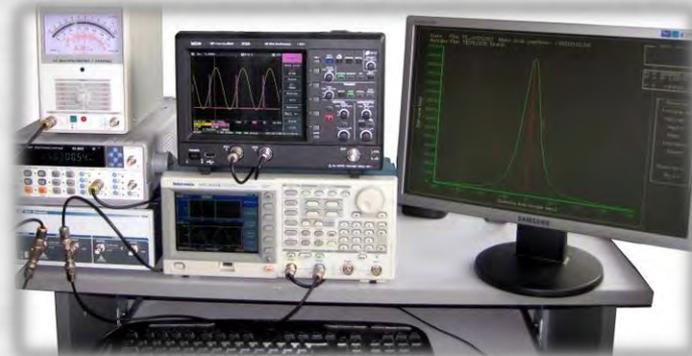
Схема пространственного сканирования рентгеновского пучка

Рентгеноакустический дифрактометр



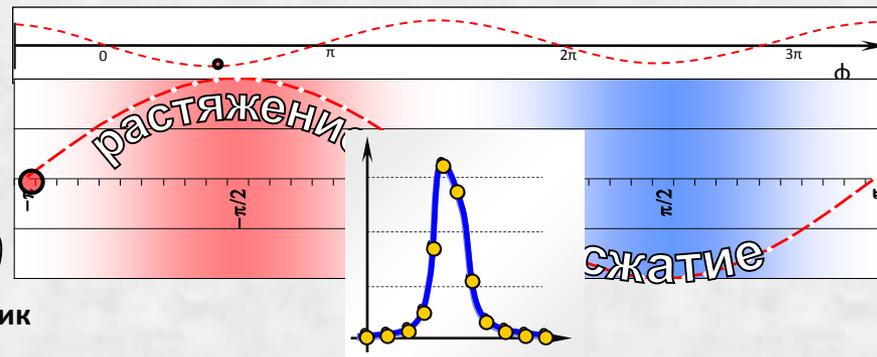
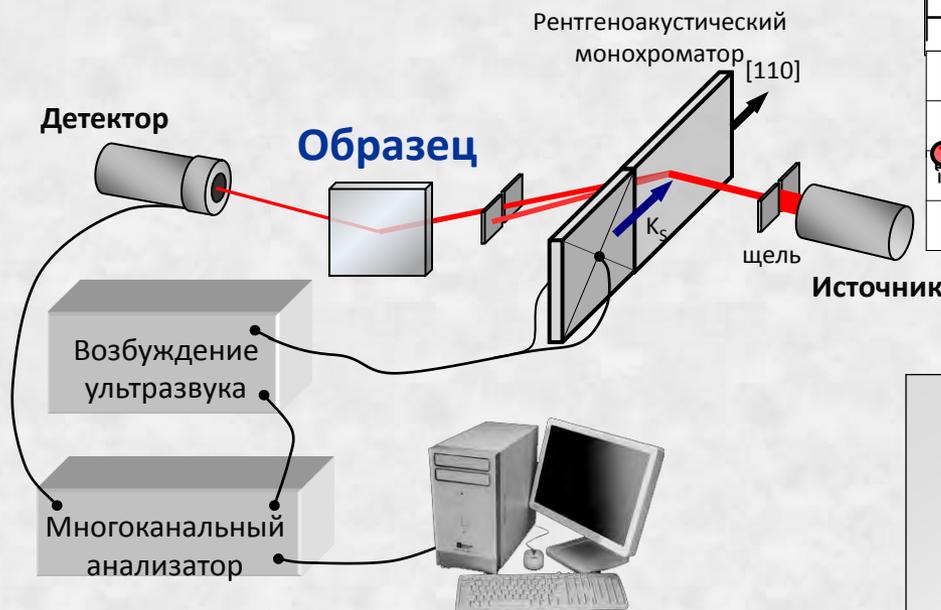
Кварцевый рентгеноакустический монохроматор

- ❖ **Высокая точность.**
- ❖ **Высокое угловое разрешение.**
- ❖ **Возможность исследования динамических процессов.**

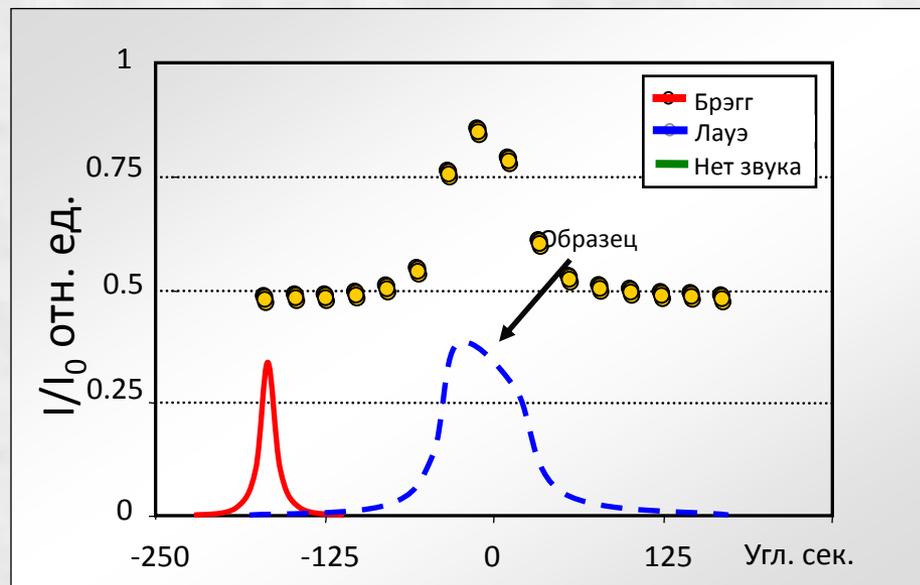


Система возбуждения ультразвука и временного анализа рентгеновского сигнала

Измерение КДО с помощью рентгеновской акустооптики



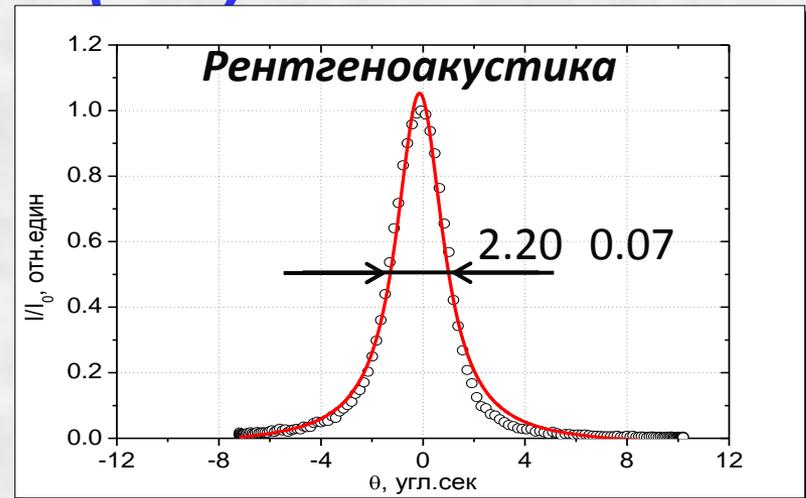
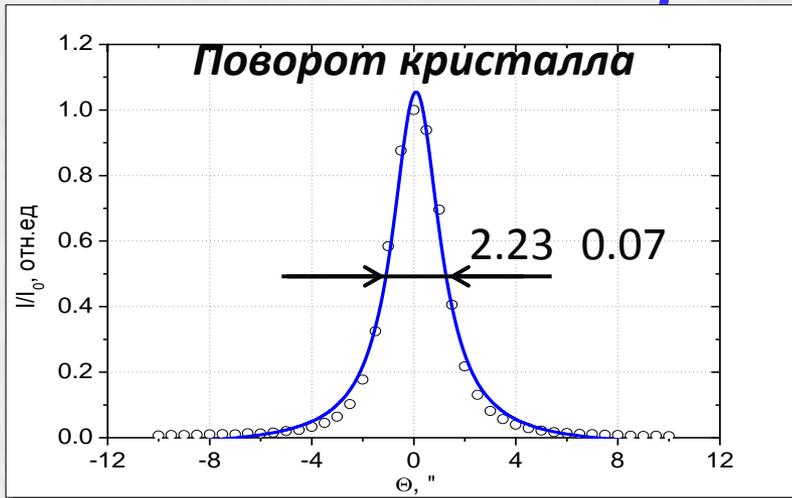
Использование рентгеноакустического элемента – быстрого изменения условий дифракции путем модуляции параметра кристаллической решетки (без механического управления кристаллами)



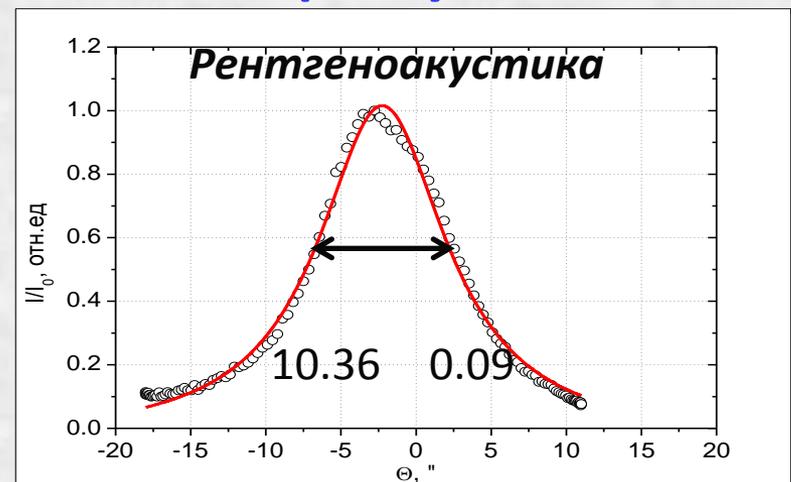
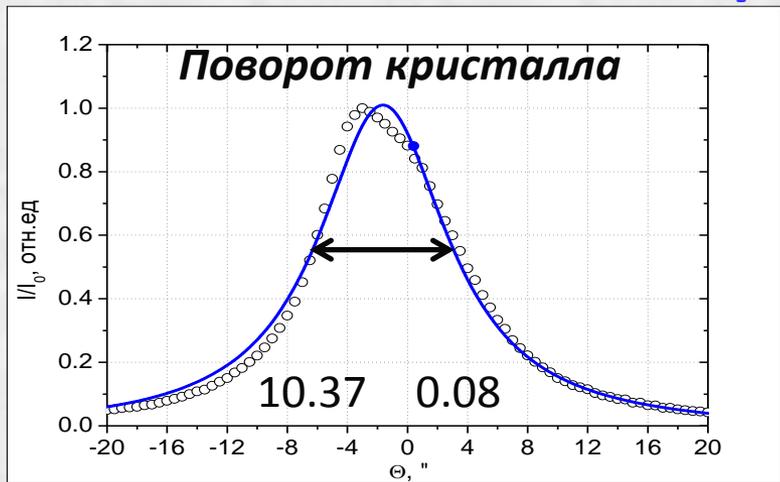
Свертка двух «дарвиновских» кривых: кривой образца и монохроматора (анализатора).

Сравнение КДО, измеренных традиционными и рентгеноакустическим способом

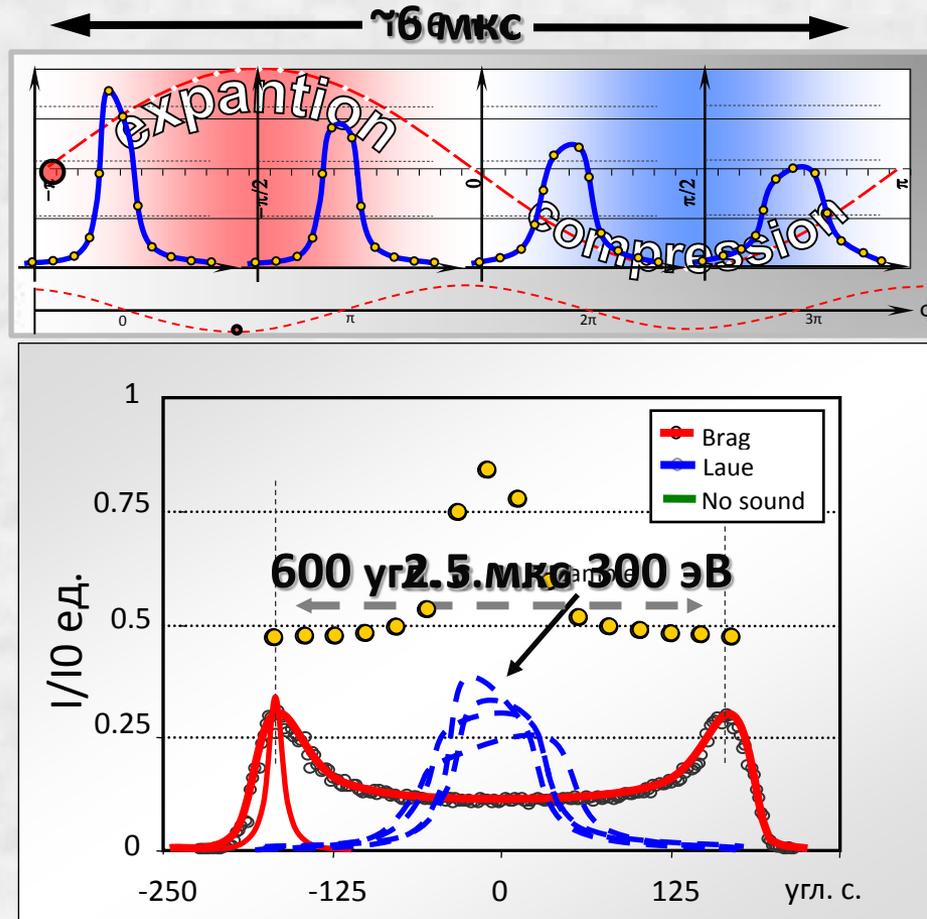
Кремний Si(220)



Фторид лития LiF (200)

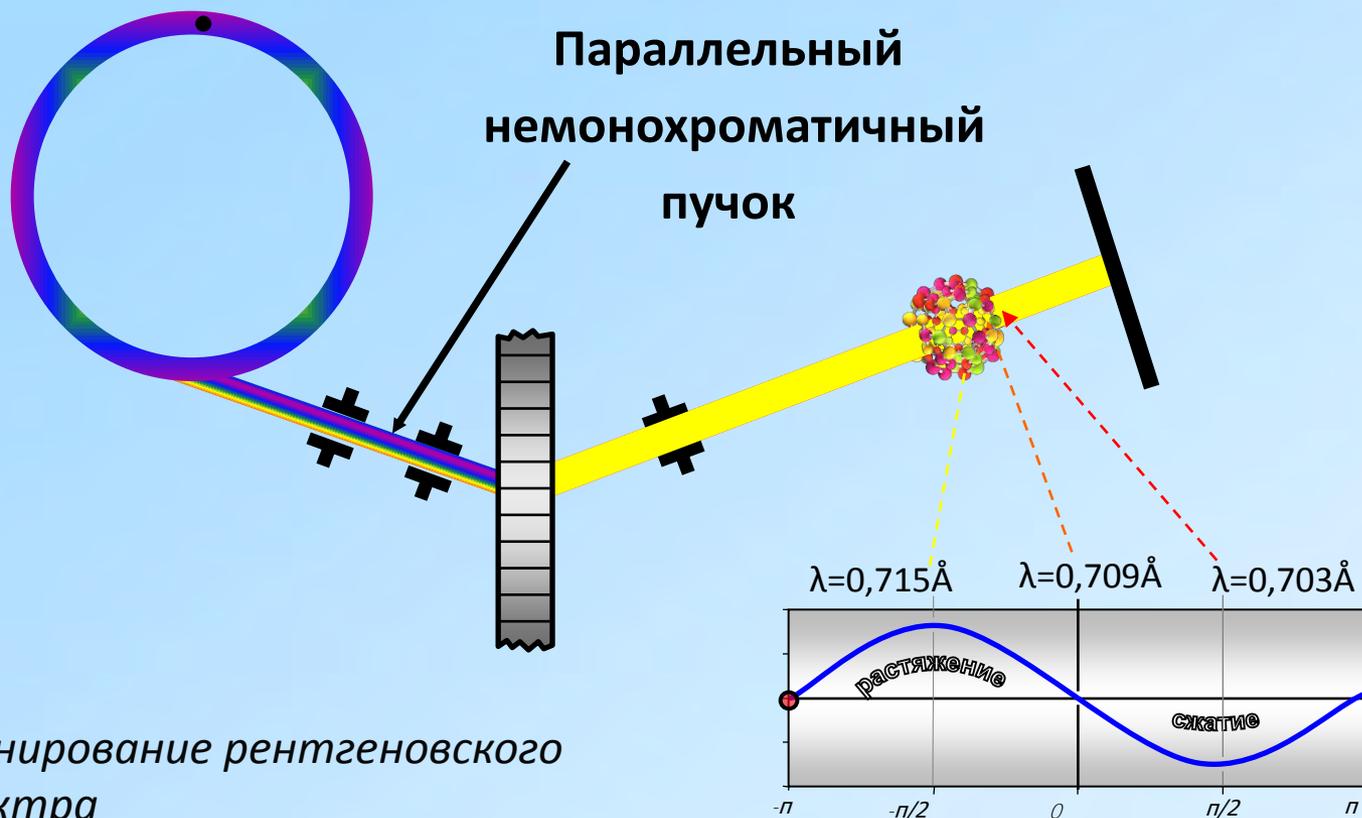


Рентгеновская дифрактометрия с разрешением по времени



Для настоящего эксперимента время записи одного кадра составляет $6 \mu\text{с}$ (полпериода колебаний).

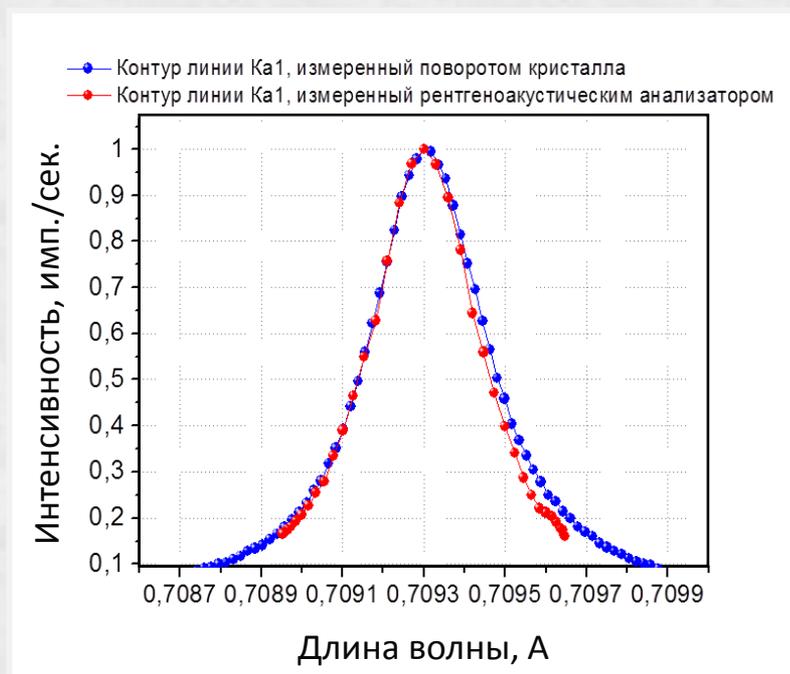
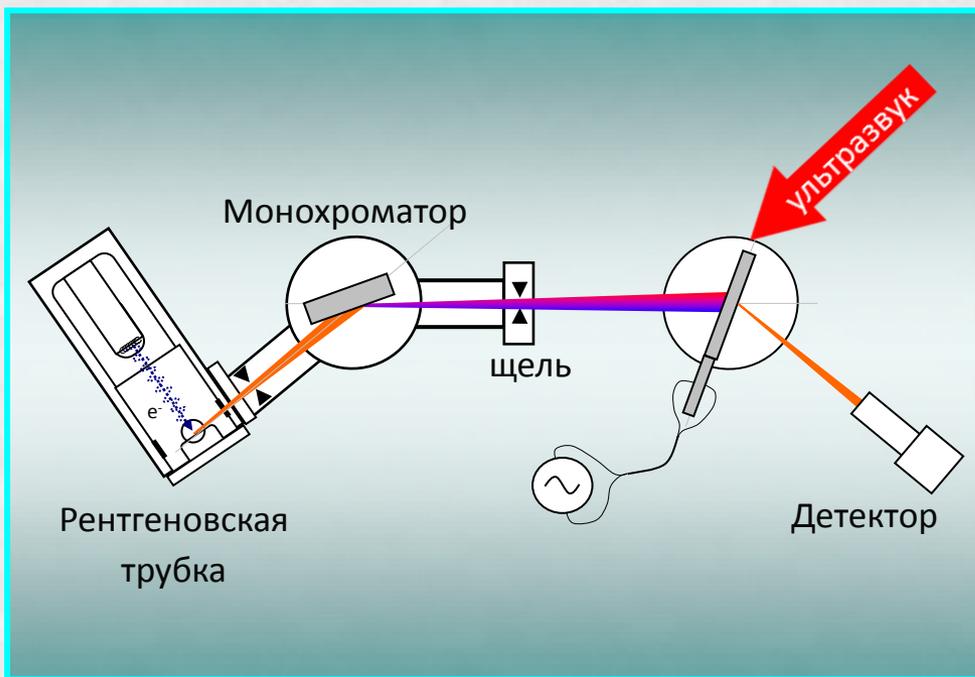
Управление длиной волны пучка СИ



1. Сканирование рентгеновского спектра
2. Анализ рентгеновского спектра
3. Перестройка длины волны (синхротронное и тормозное излучение)

Достигнутый диапазон перестройки – 150 эВ, разрешение 10 э.в.

Спектр рентгеновской трубки Mo $K\alpha_1$, измеренный с помощью рентгеноакустического дифрактометра



**Достигнутый диапазон перестройки длины волны –
150 эВ, разрешение 10 эВ.**

Диапазоны углового сканирования при использовании различных длин волн и отражений

$$\text{Закон Брэгга} - 2d \cdot \sin \vartheta = m\lambda$$

Отражение	Длина волны, А	Брэгговский угол, град	Деформация, отн. ед	Диапазон углового сканирования, угл. сек.
(2 2 0)	0,709	10	0,002	80
(4 4 0)	0,709	22	0,002	160
(8 8 0)	0,709	48	0,002	450
(10 10 0)	0,709	67	0,002	1000
(2 2 0)	3,83	88,7	0,002	9300

Заключение

- ❖ **Применение рентгеноакустических методов:**
 - а) управляемая рентгеновская оптика;**
 - б) новый класс приборов позволяющих изучать динамику процессов и развития дефектов;**
 - г) модуляционная рентгеновская спектроскопия;**
 - в) простая модернизация широкого класса рентгеновских дифрактометров низкого разрешения.**

- ❖ **Все представленные результаты получены на лабораторном дифрактометре. Использование синхротронного излучения позволяет проводить спектральные эксперименты и эксперименты с временным разрешением.**

*Благодарю
за внимание !*



THE END