




Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
Физический факультет  
Кафедра нейтронной и  
синхротронной физики

**Сыромятников Владислав Генрихович**

*Лекция № 9. Рентгеновская и  
синхротронная оптика.*

- 
- 1. Синхротронное излучение (СИ)**
  - 2. Полное внешнее отражение СИ**
  - 3. Многослойные структуры**
  - 4. Дифракция СИ на совершенных кристаллах**
  - 5. Фокусировка СИ**

# Синхротронное излучение (СИ)

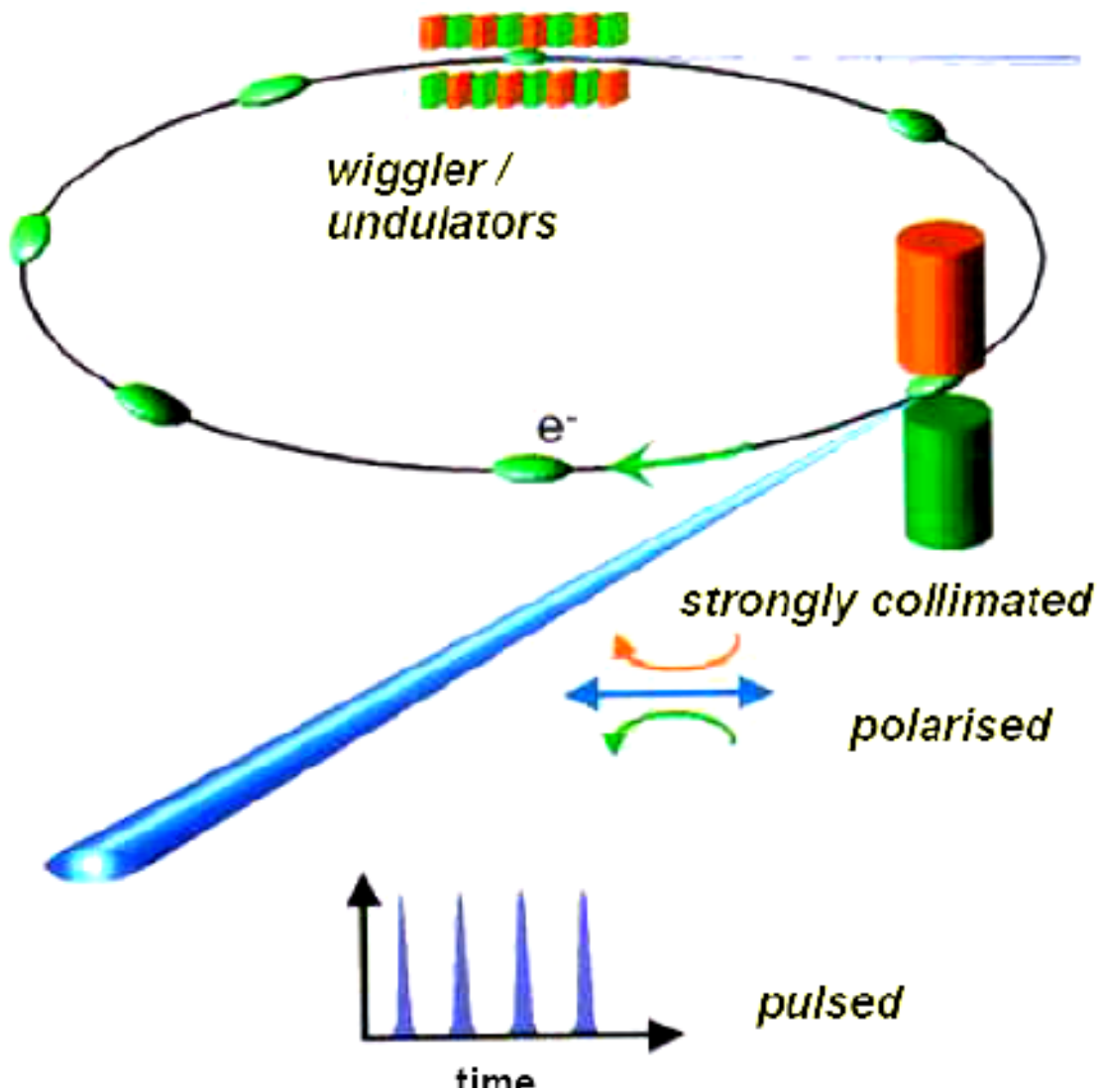
Синхротронное излучение – это магнитотормозное электромагнитное излучение, испускаемое релятивистскими заряженными частицами, когда постоянное магнитное поле заставляет их двигаться по круговым орбитам.

Отличие синхротронного излучения от излучения рентгеновских трубок состоит в следующих основных характеристиках:

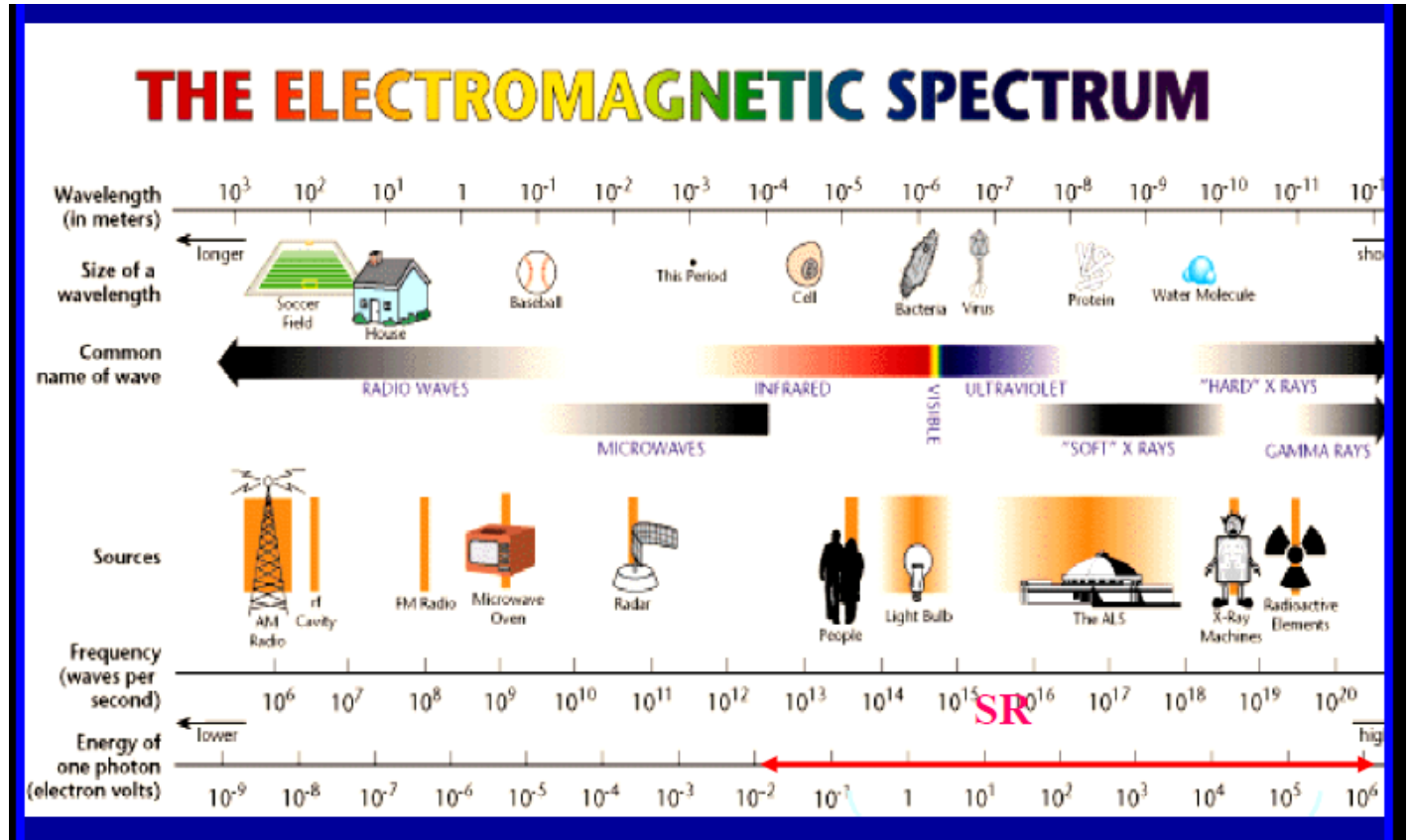
1. синхротронное излучение имеет широкий непрерывный спектр (от ИК (десятые эВ) до жесткого рентгеновского излучения (несколько десятков кэВ),
2. сильно поляризовано,
3. возникает короткими импульсами,
4. сильно коллимировано (его лучи распространяются узким пучком типа света прожектора),
5. обладает яркостью на много порядков (в тысячи, миллионы, а сегодня в  $10^{20}$  раз) выше, чем излучение рентгеновских трубок.

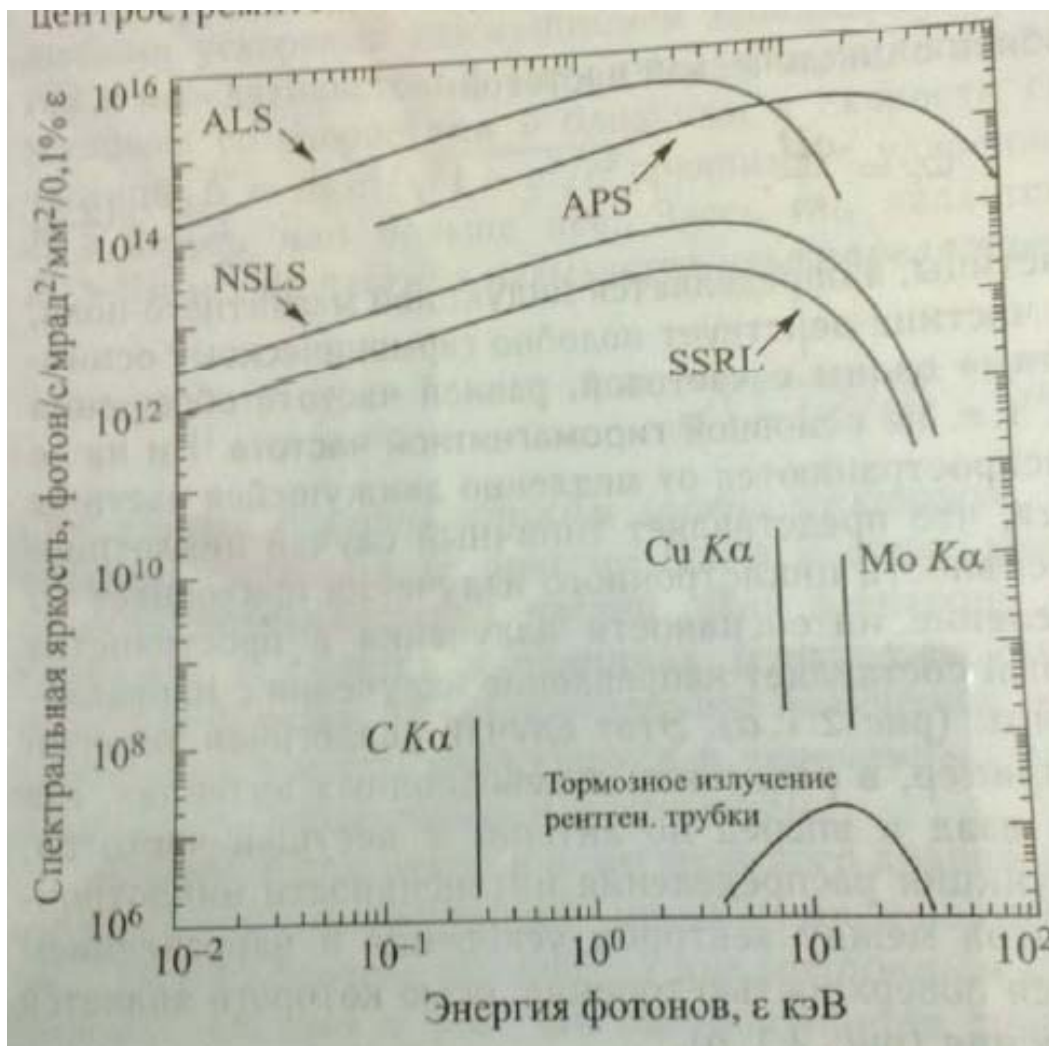
$$\lambda [A] \cong \frac{12.4}{\varepsilon [кэВ]}$$

## Свойства синхротронного излучения



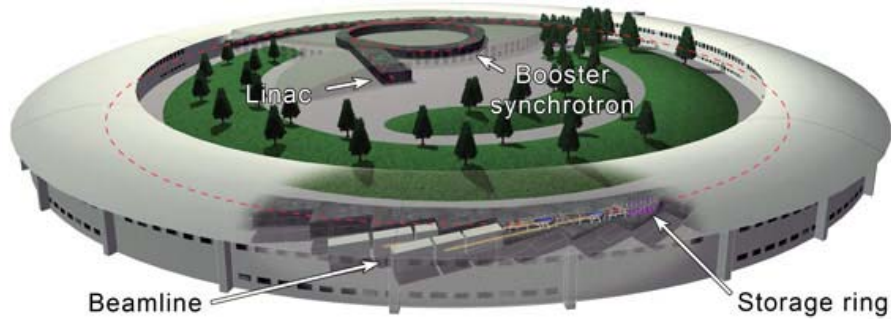
$$\lambda [A] \cong \frac{12.4}{\varepsilon [k\text{eV}]}$$



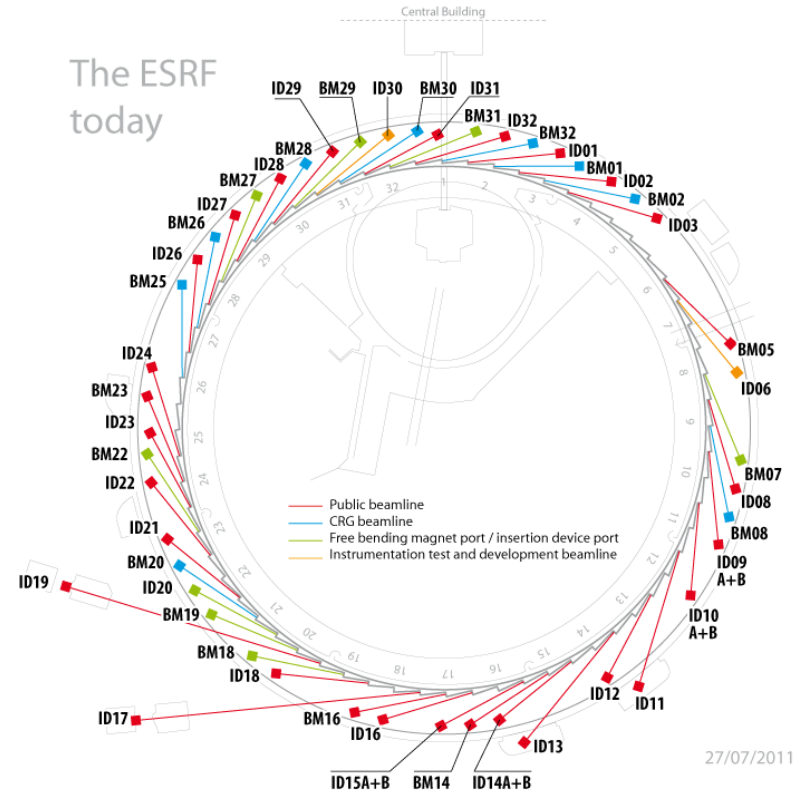


$$\lambda [A] \cong \frac{12.4}{\varepsilon [кэВ]}$$

**Рис.** Примеры спектров СИ из поворотных магнитов разных источников.



The ESRF today



ESRF 200 mA

$10^{13}$  ph/s/mm<sup>2</sup>/Si-111



$\varnothing \sim 1\text{mm}$  at 50 m

high- $\beta$  undulator

$S_v = 25 \mu\text{m}$

$S_v = 900 \mu\text{m}$

# Полное внешнее отражение СИ

$$n = 1 - \delta - i\beta \quad \text{показатель преломления}$$

$\delta$  - декремент показателя преломления

$\beta$  - показатель поглощения среды

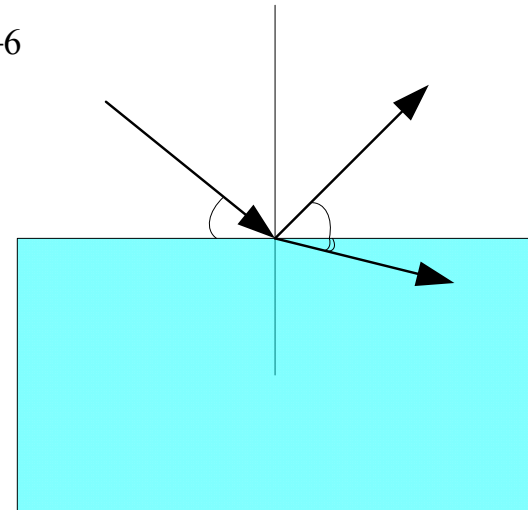
$$\beta = \frac{\lambda\mu}{4\pi}$$

$$1 - n \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$$

$$\theta_c = \lambda\sqrt{2\delta} = 2.34\lambda\sqrt{\frac{\rho Z}{A}}$$

$$\theta_c [\text{мрад}] \approx 1.6\lambda [A] \sqrt{\rho \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]}$$

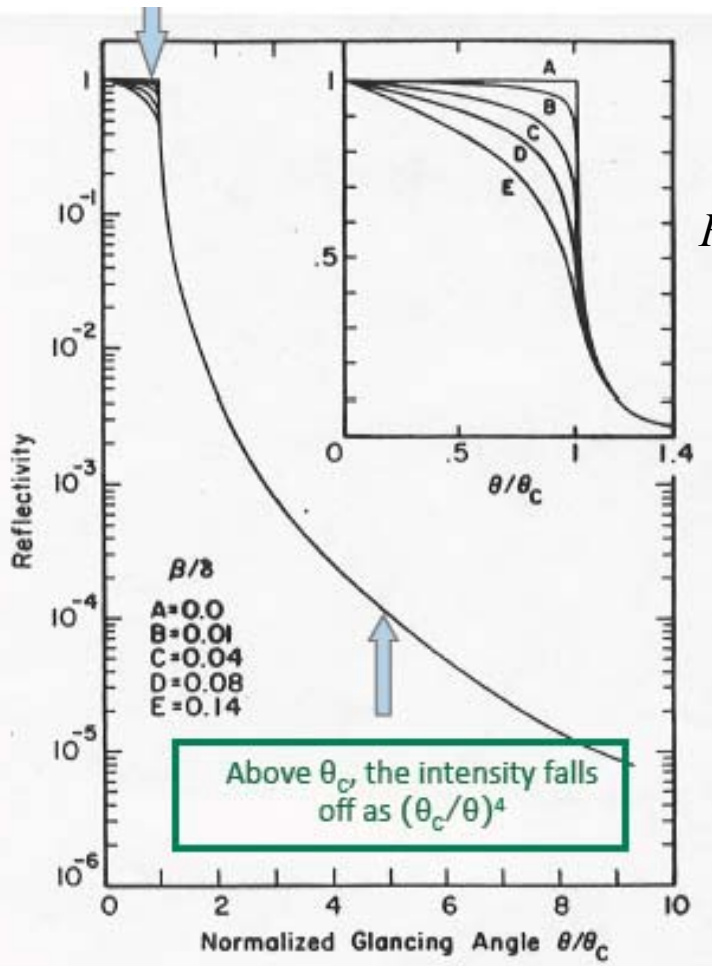
критический угол полного внешнего отражения на границе раздела среды и вакуума



$$\text{для Al} \quad \rho = 2.7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \quad \theta_c [\text{мрад}] \approx 2.63 \lambda [A] \quad \text{для Pt} \quad \rho = 21.46 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \quad \theta_c [\text{мрад}] \approx 7.41 \lambda [A]$$



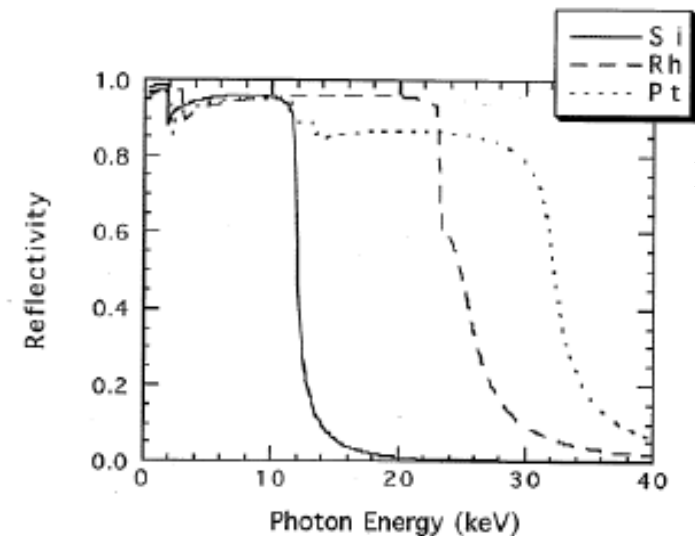
Из непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного векторов на поверхности раздела следуют формулы Френеля для отражения на плоской границе.



$$R = |r|^2 = \left| \frac{k_{iz} - k_{tz}}{k_{iz} + k_{tz}} \right|^2$$

$$k_{iz} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$$

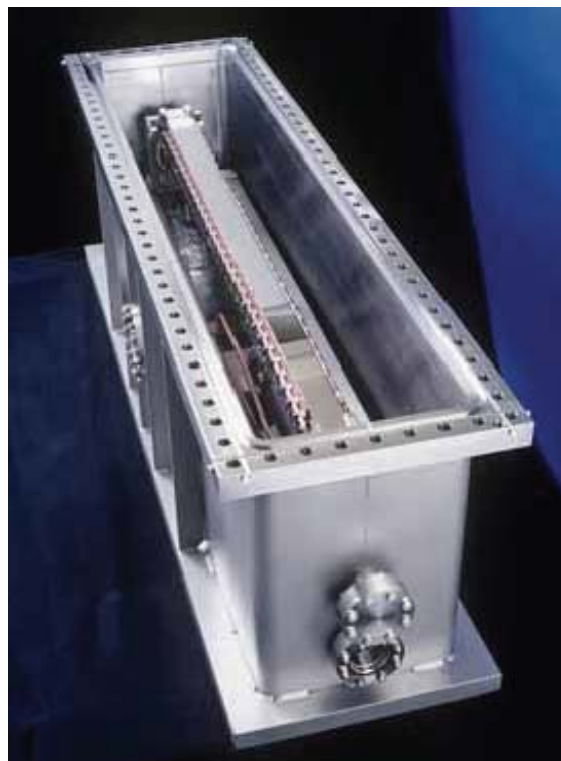
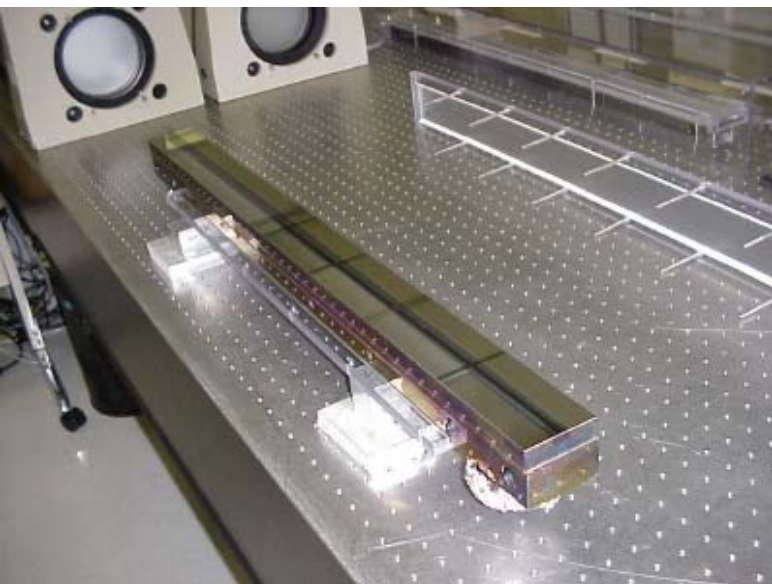
$$k_{tz} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta}$$



Рентгеновские зеркала используются как фильтры для удаления из отраженного пучка рентгеновского излучения высоких энергий. Кроме того, зеркала берут на себя основную тепловую нагрузку. Спектр можно менять, используя несколько зеркал с разными покрытиями.

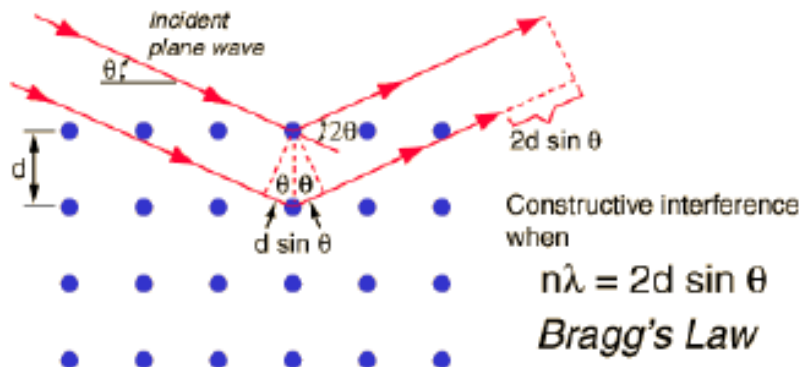
**Рис.** X-ray reflectivity как функция х-гау энергии для кремния родия и платины для угла скольжения 0.15 градуса.

**Рис.** Рентгеновское зеркало, состоящее из нескольких частей для перехвата широкого пучка. Темная полоса – следствие воздействия пучка.



**Рис.** Рентгеновское зеркало, охлаждаемое водой в вакуумном танке.

## Дифракция СИ на совершенных кристаллах



$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

**Закон Брэгга**

В большинстве случаев в качестве дифракционных элементов используются совершенные монокристаллы такие как кремний и германий. Они имеют коэффициент отражения в пике близкий к единице. Но угловая ширина пика мала  $\omega_D \sim$  несколько угловых секунд (столик Дарвина). При этом степень монохроматичности дифрагированного пучка очень высока  $\Delta\lambda / \lambda \sim 10^{*-4} - 10^{*-5}$ .

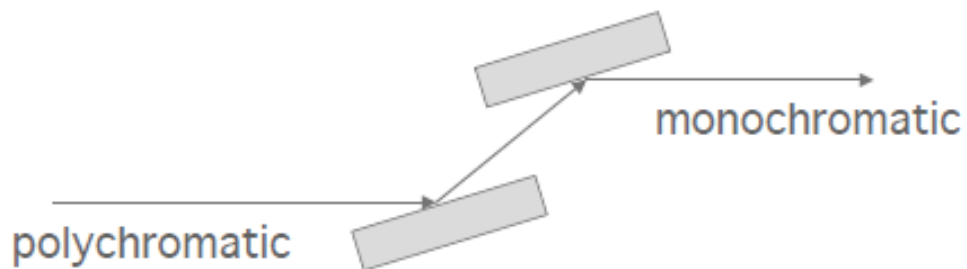
$$\lambda = 2d \sin \theta$$

$$\Delta\lambda / \lambda = \Delta E / E = \operatorname{ctg} \theta \cdot \Delta\theta$$

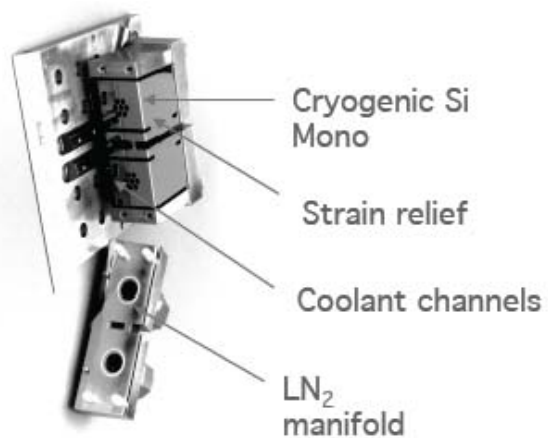
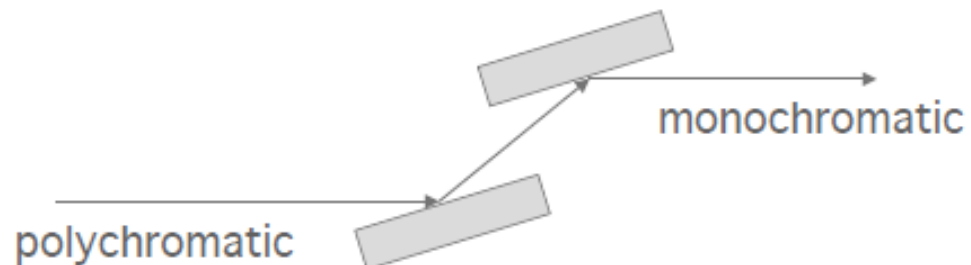
$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\Psi^2 + \omega_D^2}$$



Значение  $\omega_D = 8 \text{ сек} = 40 \text{ мкрад}$  для отражения (111) в кремнии на 8 кэВ (1.5А). Угловая ширина пучка из ондулятора  $\Delta\Psi = 10 - 15 \text{ мкрад}$ . Следовательно, разрешение по длине волны задается кристаллом.

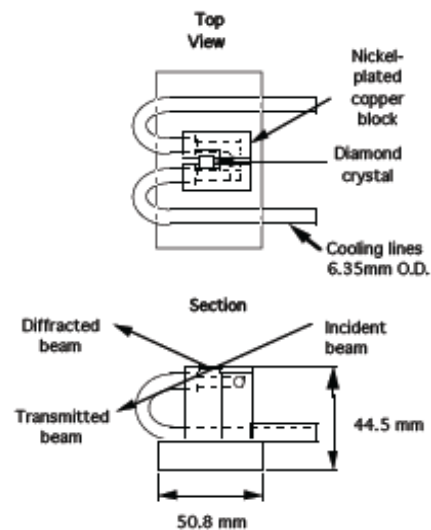


# Двойной кристаллический монохроматор



Cryogenically Cooled Si Mono

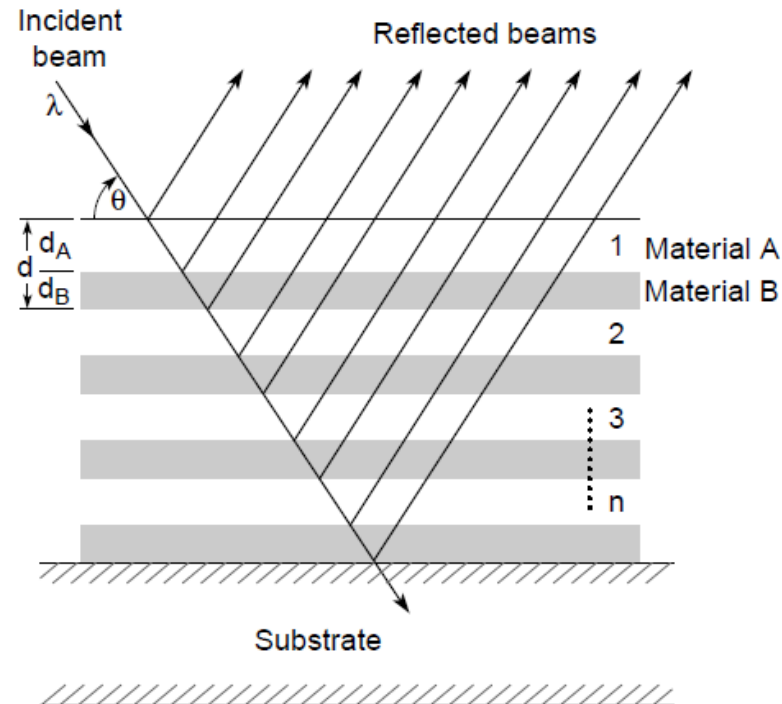
## Water Cooled Diamond Mono



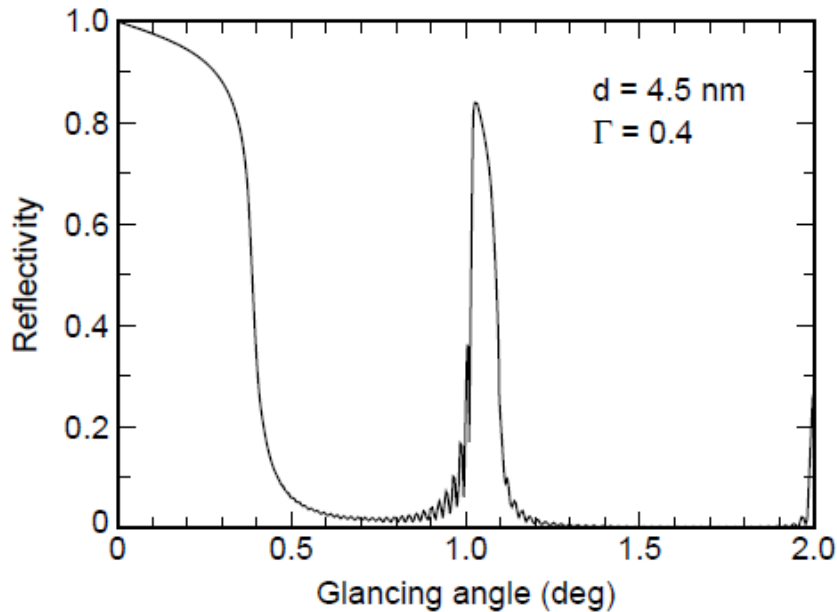
# Многослойные структуры

Дифракция на многослойной структуре

$$m\lambda = 2d \sin \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{\theta}_c}{\theta}\right)^2}$$



## Периодические многослойные структуры



Периодическая структура  
Вольфрам/карбид бора  
 $E = 8,084 \text{ кэВ}$

Известны периодические структуры с малым периодом  $d \sim 1.5 - 8 \text{ nm}$ :  
Ni/C, N/B<sub>4</sub>C, Mo/C, W/Si, W/C и др.

## Фокусировка СИ

Существует значительный интерес к фокусировке синхротронных пучков от сотен микрон до десятков нанометров. Фокусированные пучки могут быть использованы в различных методиках: для малых образцов, для экстремальных условий, для сканирующей микроскопии.

Фокусирующие оптические элементы разнообразны:

Изогнутые кристаллы,  
изогнутые зеркала,  
зонные пластинки,  
рефракционные линзы.



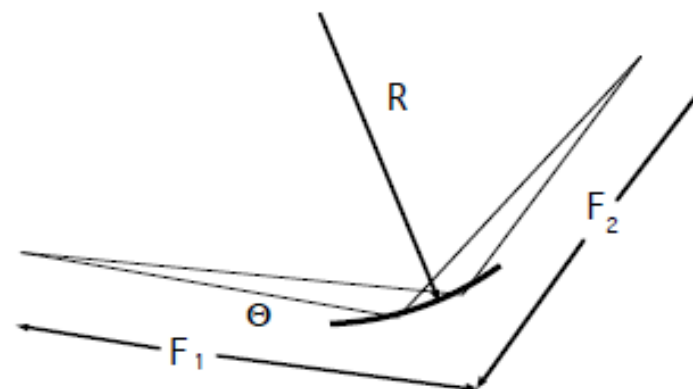
# Фокусирующие зеркала

Фокусировка с помощью рентгеновских зеркал. Эллипс является идеальной формой отражающей поверхности. Источник в одном фокусе, изображение в другом.

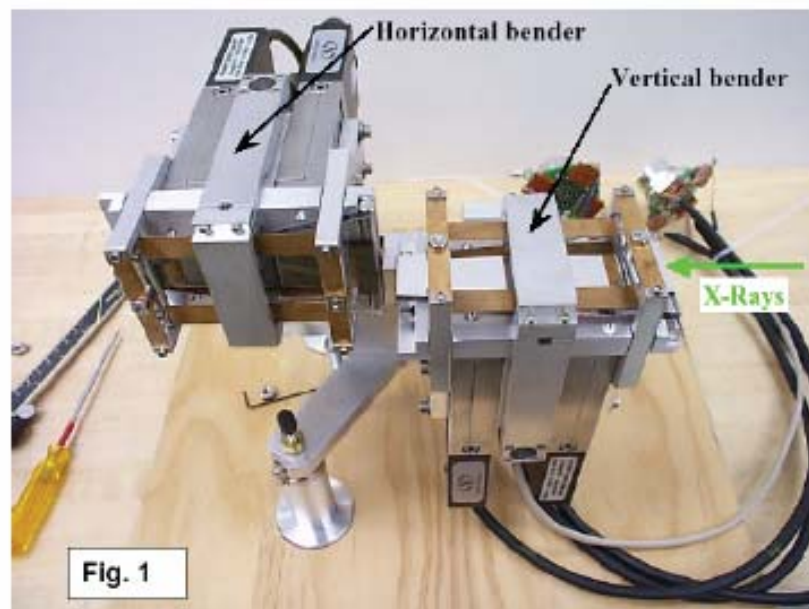
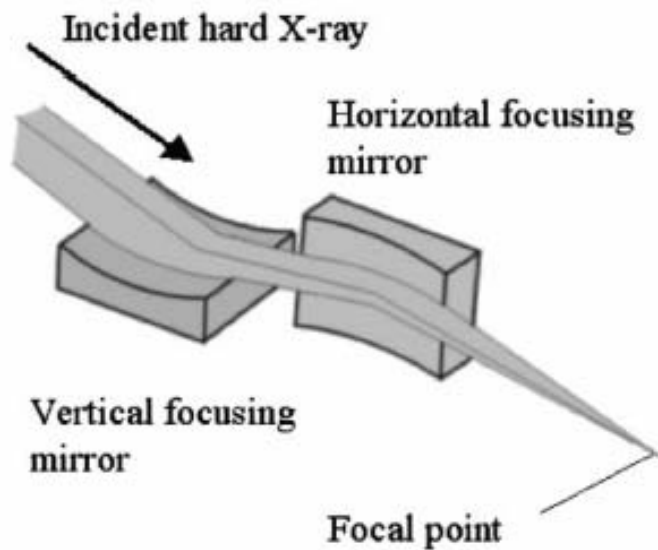
Парабола может быть использована для получения коллимированного пучка.

(Это эллипс со вторым фокусом в бесконечности). Однако, во многих случаях используют цилиндрические поверхности вместо эллипса и параболы, т.к. их легче изготовить.

Типично,  $\theta = 3 \text{ мрад}$ ,  $F_1 = 30 \text{ м}$ ,  $F_2 = 30 \text{ м}$  и  $R = 10 \text{ км}$



## Двумерная фокусировка с помощью КВ систем (Kirkpatrick-Baez, 1948).

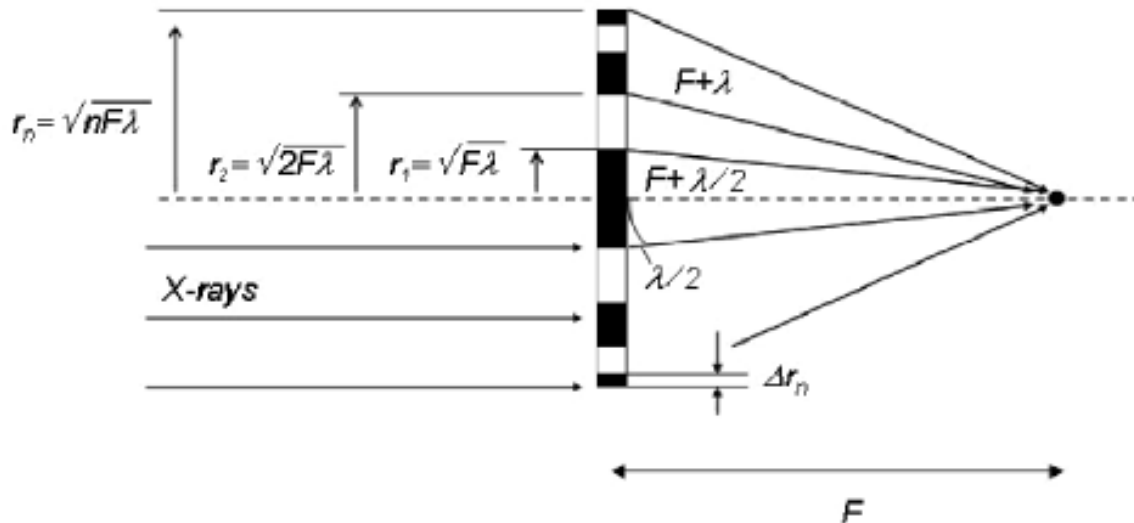


## Зонные пластинки Френеля.

Зонные пластинки – дифракционные решетки, состоящие из набора концентрических зон двух материалов с разными показателями преломления или из одного материала с разными толщинами.

Фокусирующие свойства основаны на конструктивной интерференции волнового фронта прошедшего через зонную пластинку.

Волна, вышедшая из зонной пластинки - это суперпозиция сферических волн от каждой зоны.



### FZP parameters

$$A = 100 - 1000 \mu\text{m}$$

$$\Delta r_n = 0.05 - 0.3 \mu\text{m}$$

$$t_{\text{Si}} = 1 - 10 \mu\text{m}$$

$$F = 60 \text{ cm at } 4 - 12 \text{ keV}$$

$$\text{flux } 10^{10} \text{ photons/sec}$$

## Scanning x-ray microscope

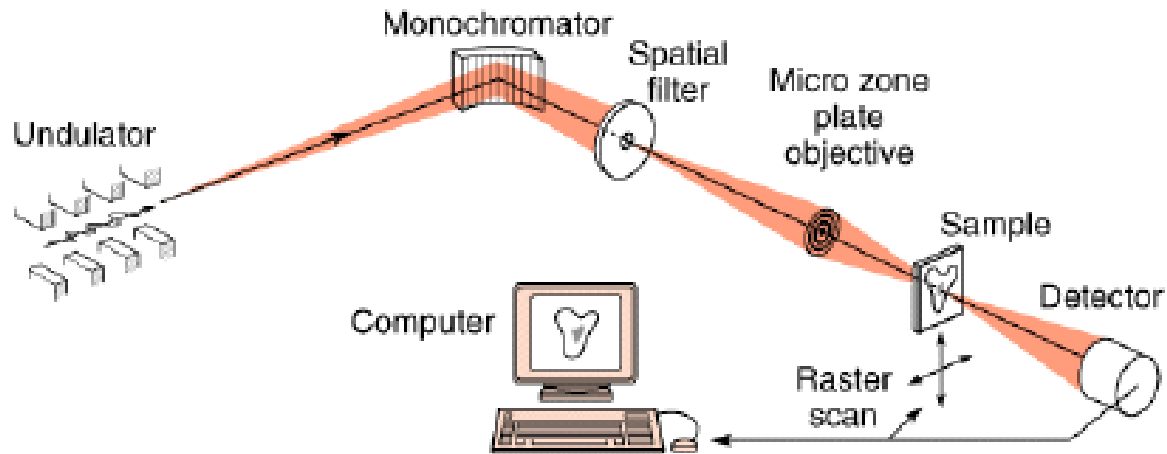
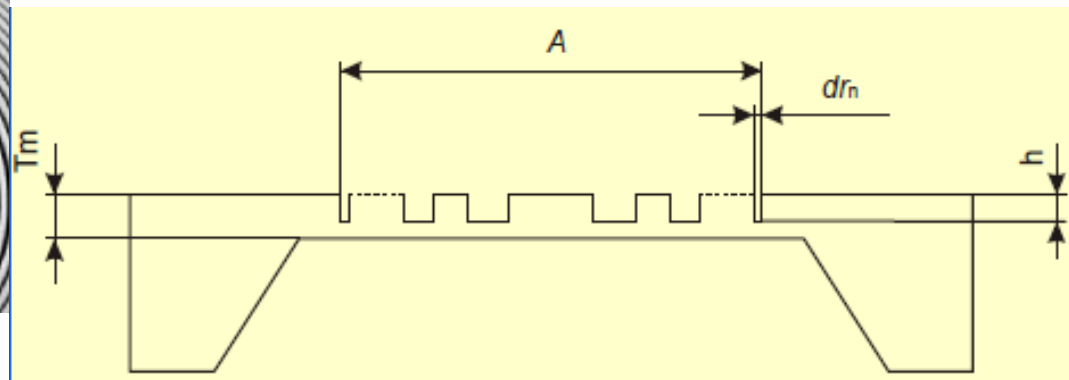
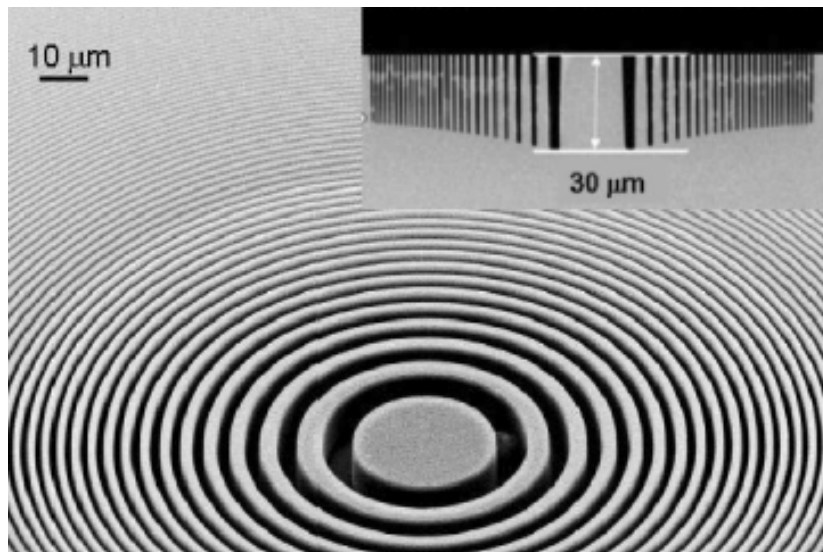


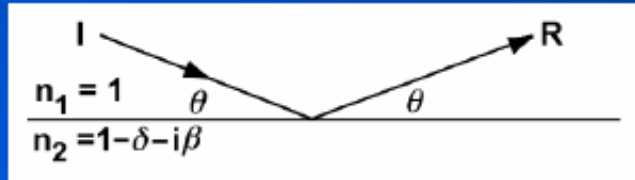
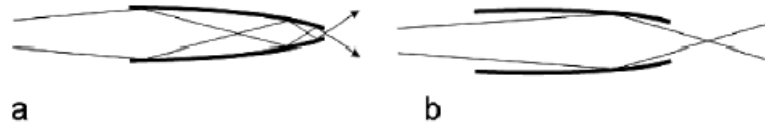
Table 17.3. Chip specification

	$T_m/h$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{\text{range}}$ (keV)	$\eta_{\text{max}}$ (%)	$E_{\text{max}}$ (keV)
Chip1	12/9	6–12	30	7.5
Chip2	80/16	11–21	26	14
Chip3	90/30	17–40	32	23

$T_m$ , thickness of silicon membrane;  $h$ , maximum height of the zone phase profile;  $E_{\text{range}}$ , energy range with focusing efficiency higher than 20%;  $\eta_{\text{max}}$ , maximum focusing efficiency (achieved at energy  $E_{\text{max}}$ );  $E_{\text{max}}$ , energy at which maximum efficiency  $\eta_{\text{max}}$  is achieved

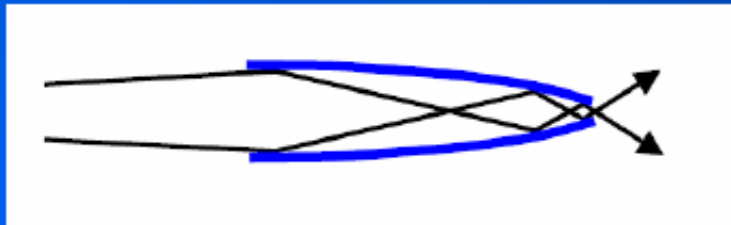


# Капиллярная оптика

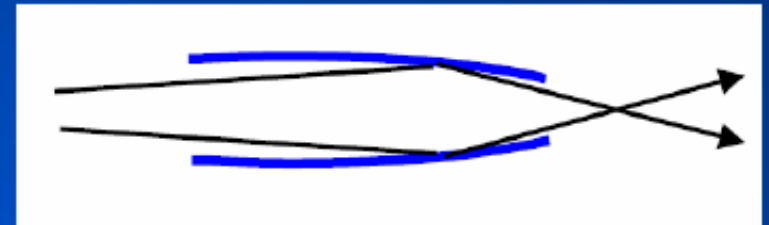


For Glass:  $\theta_c$  (mrad) =  $30 / E$  (keV)  
2 mrad @ 15 keV  
1 mrad @ 30 keV

## Multi-Bounce Glass Capillary



## One-Bounce Glass Capillary



**Easy!**  
to make small focal spot  $< 1 \mu\text{m}$

Large working distance ( cm scale)  
Near 100% transmission

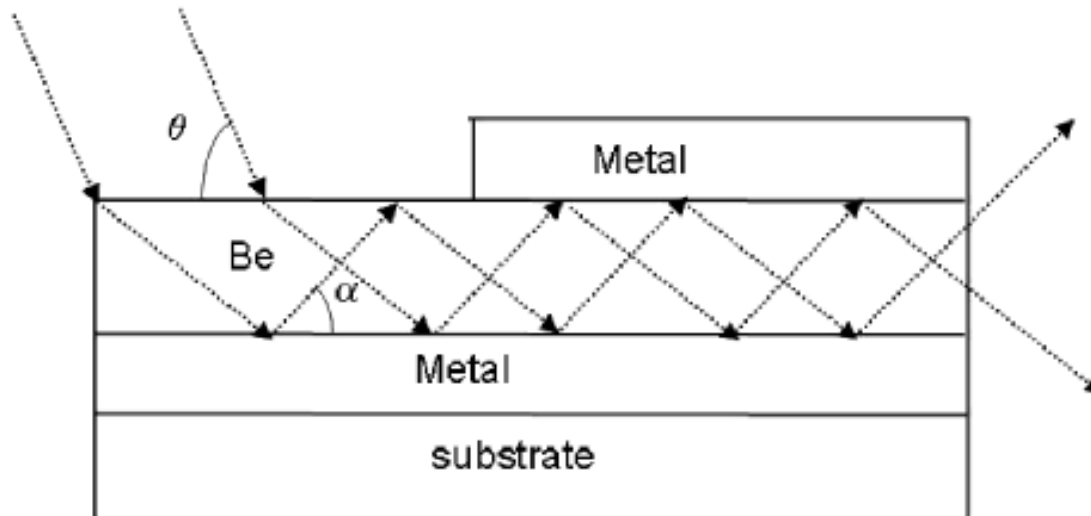
50 nm!

D. H. Bilderback, S. A. Hoffman, D. J. Thiel  
*Science*, 1994, 263, 201.

**Challenge!**  
to make small focal spot  $< 1 \mu\text{m}$

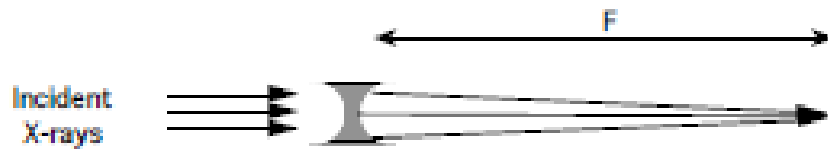
Short and compact –  
may fit in spot that is too short  
for KB mirror assembly!

# Волноводы



# Рентгеновские преломляющие линзы

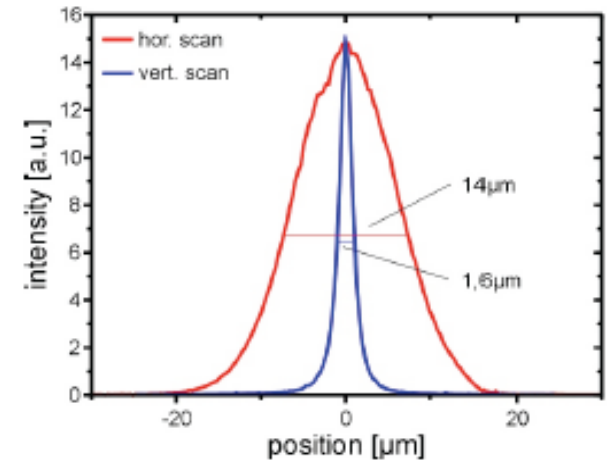
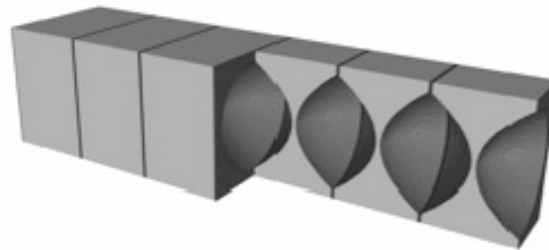
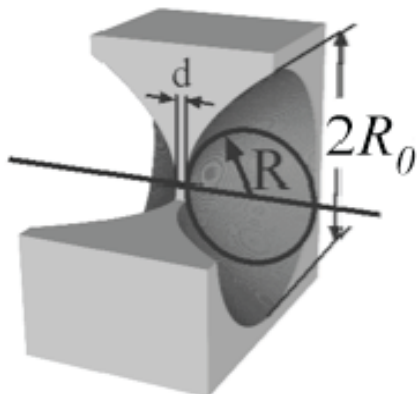
$E = 5 - 40$  кэВ



$$F = \frac{R}{2\delta}$$



$$F = \frac{R}{2N\delta}$$



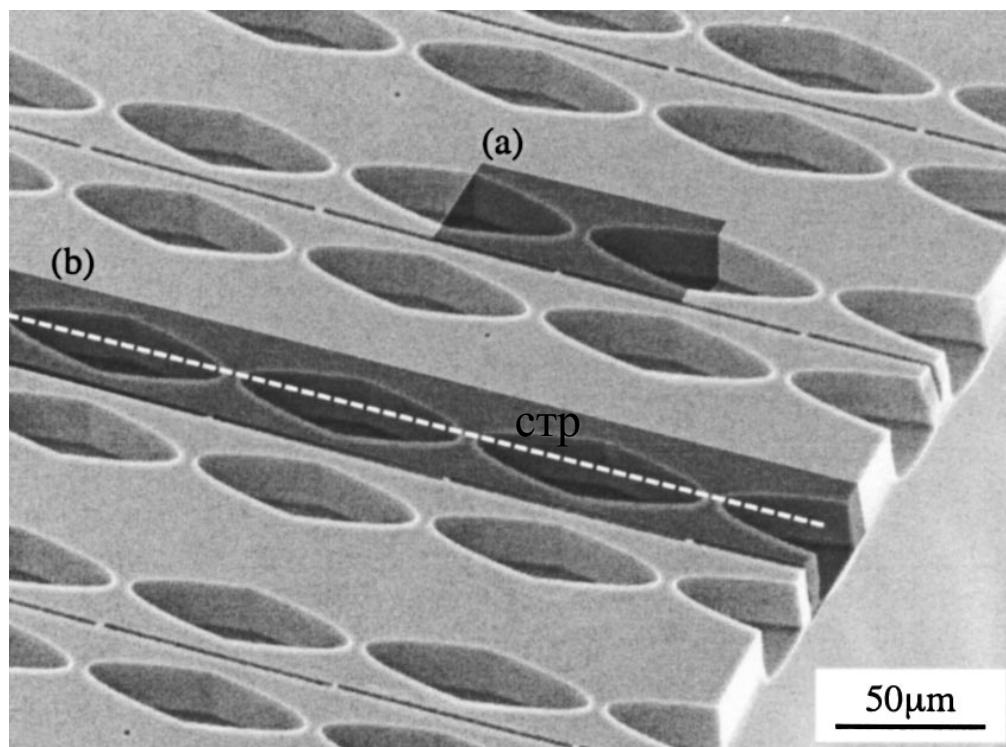
**В параболоидах вращения нет сферической абберации**

**Table 17.5.** Parabolic CRLs from RWTH Aachen used at the ESRF beamlines

Beam line	Material	Energy (keV)	Number of indiv. lenses	Source distance (m)	Focal distance (m)
ID1	Be	6–9	20	42	0.5–1.5
ID10A	Be	6–20	20	40/55	0.5–3
ID10B	Be	7–20	40	35/40	0.5–3
ID11	Be	15–80	61	30/55	1–10
	Al	20–100	254	55/100	0.5–10
ID11/ID15	Al	20–200	500	40/50/60	0.5–10
ID13	Be	12–14	24	1.5	1.5
ID22	Al	6–10	200	40/50	0.5–1
	Be	8–60	100	40/50	10–30
ID18F	Al	15–30	200	20	20
ID32	Be	8–23	15	34	6–13
ID14	Be	14	30	40	0.5–1.5
MOTB/BM5	Be	7–30	25	40/54	1
	Al	15–60	200	40/54	0.5–50
MPI/ID15	Al	50–90	300	60	3–6



## Планарные параболические линзы из кремния



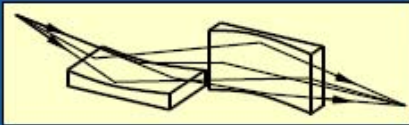
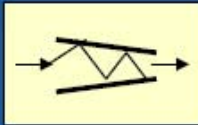
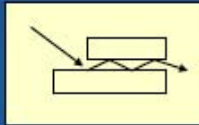
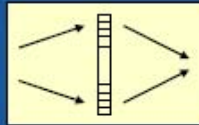
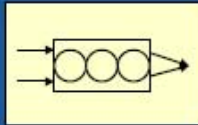
Радиус кривизны 2.15 мкм. Фокусное расстояние 15.6 мм.  $N=100$ . Длина линзы 8.4 мм.

# Фокусирующая оптика для СИ



## Focusing Optics for Hard X-rays ( $E > 6 \text{ keV}$ )

A Light for Science

	<i>reflective</i>			<i>diffractive</i>	<i>refractive</i>	
	Kirkpatrick Baez systems		Capillaries	Waveguides	Fresnel Zone plates	Refractive lenses
	mirrors Kirkpatrick Baez, 1948	multilayers Underwood Barbee, 1986	Kreger 1948	Feng et al 1993	Baez 1952	Snigirev et al, 1996
						
Energy	< 30 keV	< 80keV	< 20keV	< 20keV	< 30 keV (80)	<1 MeV
Bandwidth $\Delta E/E$	w. b.	$10^{-2}$	w.b.	$10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3}$
resolution	25 nm @15keV Mimura 2006 8 nm !	41x45nm <sup>2</sup> @24keV Hignette 2006	50 nm Bilderback 1994	40x25 nm <sup>2</sup> Salditt 2004	30 nm @20 keV Kang, 2006 17 nm, 2007 ??	50 nm@20keV Schroer, 2004 150nm@50keV Snigirev,2006