

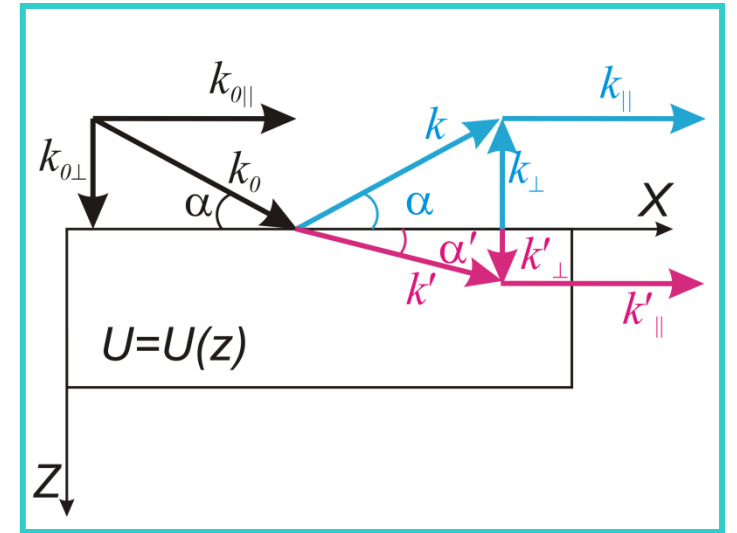
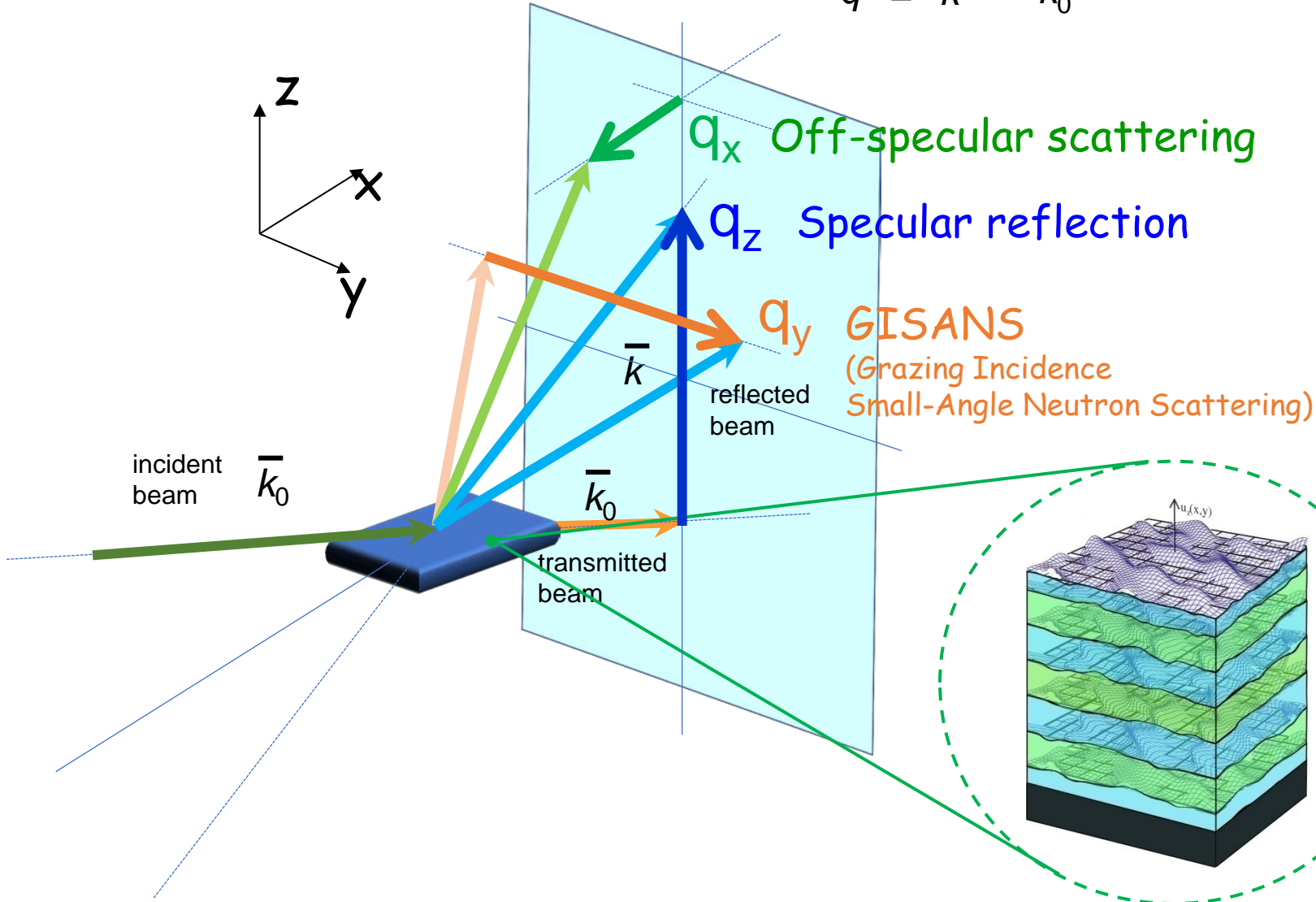
# Перспективы нейтронной рефлектометрии на импульсном источнике DNS-IV

Боднарчук В.И.  
ЛНФ ОИЯИ

- ❖ Нейтронные рефлектометры: основные принципы и организация работы
- ❖ Современные TOF НР: ISIS, SINQ, SNS, J-SNS
- ❖ НР на ИБР-2
- ❖ Тенденции развития: ESS
- ❖ НР на DNS-IV: вызовы и возможности

# Полная схема НР

$$\bar{q} = \bar{k} - \bar{k}_0$$



Complete reflectometry  
 $q_x q_y q_z$



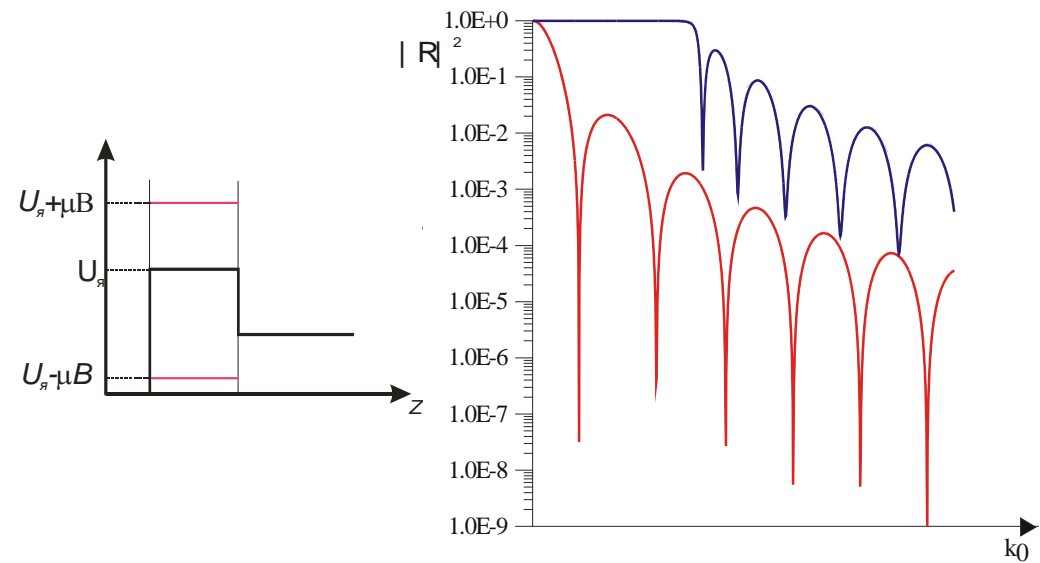
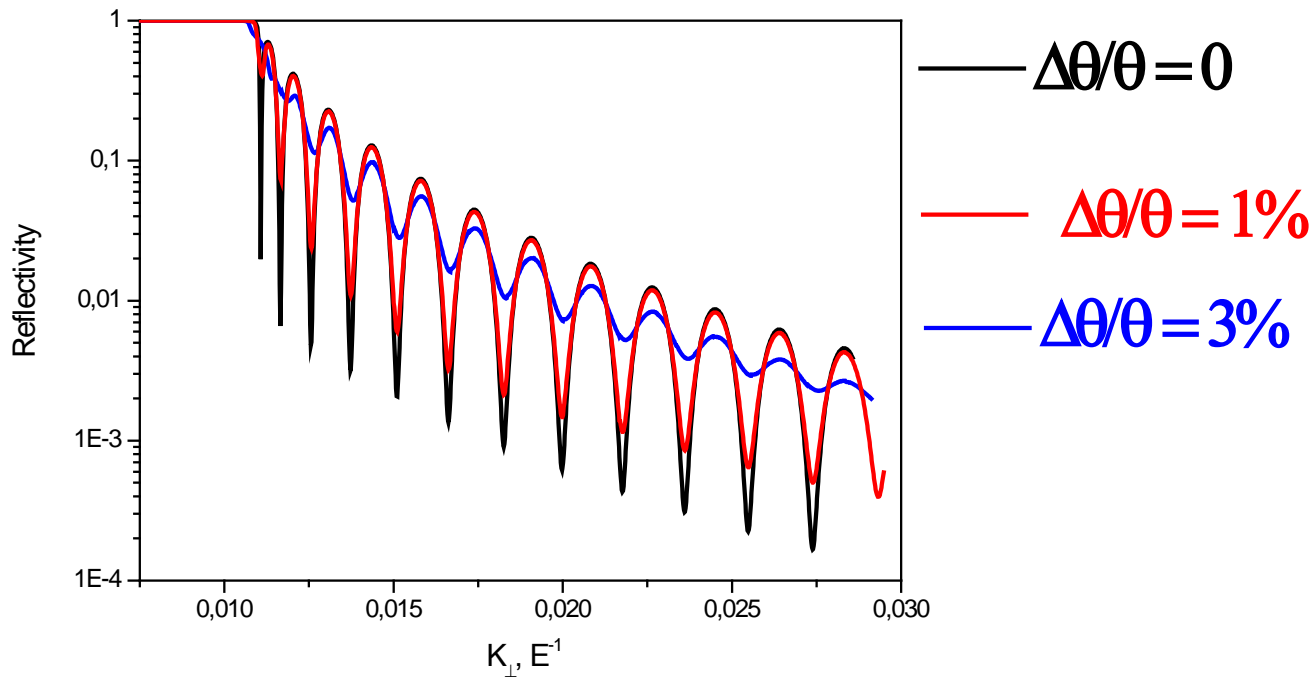
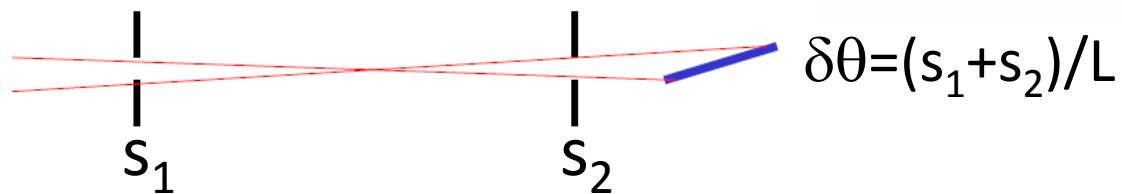
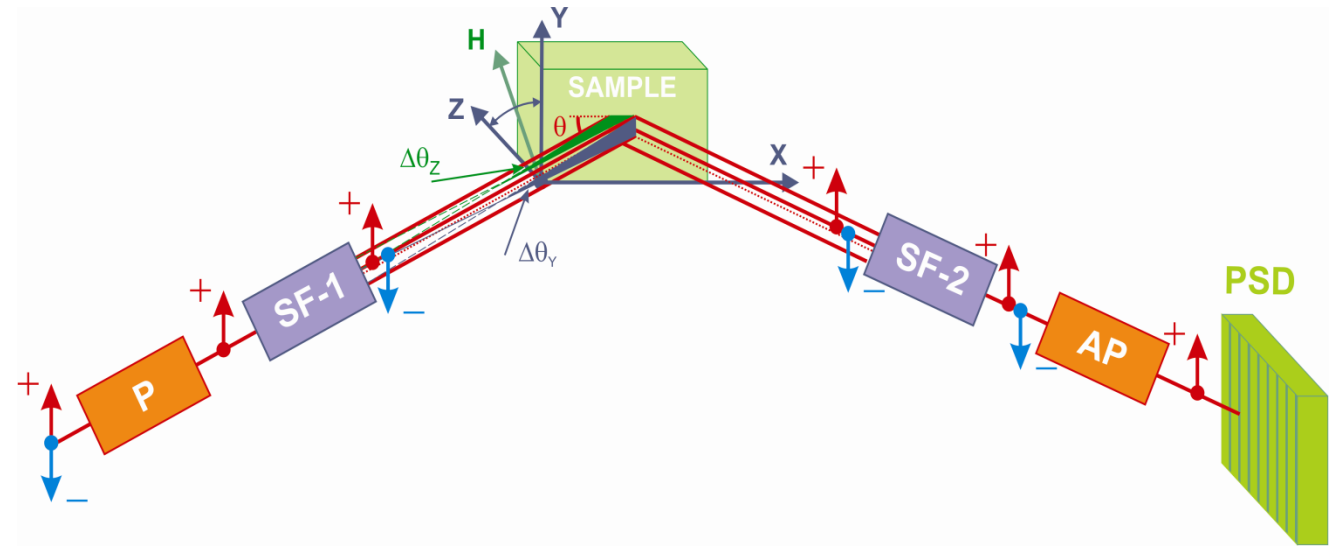
$u_z(x,y)$  - vertical surface displacement  
 $\xi_x, \xi_y$  - correlation lengths

# Специализация нейтронной рефлектометрии

## Слоистые наноструктуры. Поверхность.

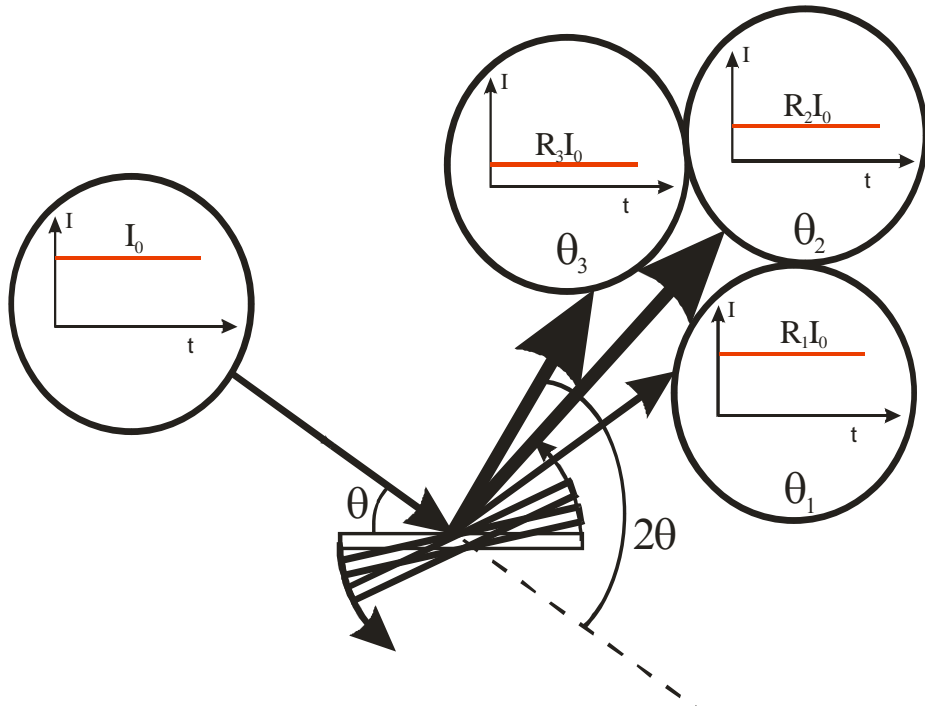
- Сосуществование сверхпроводимости и магнетизма. Эффекты близости
- Слоистые наноструктуры
- Межслойное и внутрислойное магнитное взаимодействие
- Распределение намагниченности вглубь структуры в зависимости от структурных параметров
- Проникновение магнитного поля и вихревая решетка в сверхпроводнике
- Временная зависимость доменной структуры
- Шероховатости на границах раздела
- Биологические системы
- Магнитные жидкости и электролиты
- Пленки Ленгмюра-Блоджетт

# Нейтронные рефлектометры: основные принципы и организация работы



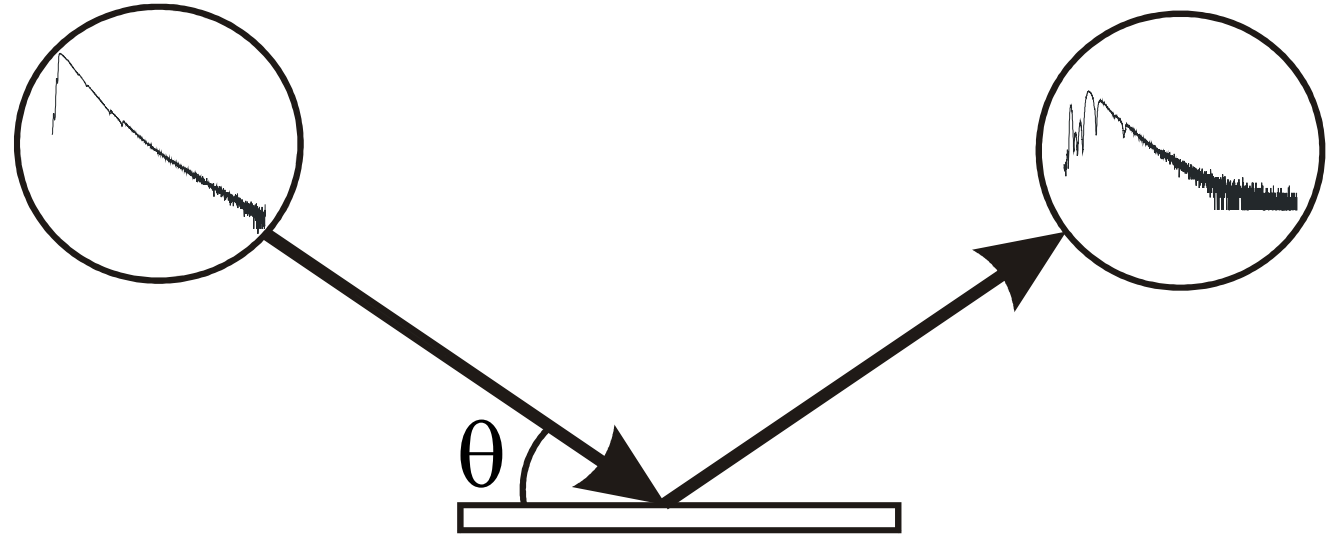
# Организация измерений

$\lambda = \text{const}$



$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$$

TOF  
 $\theta = \text{const}$



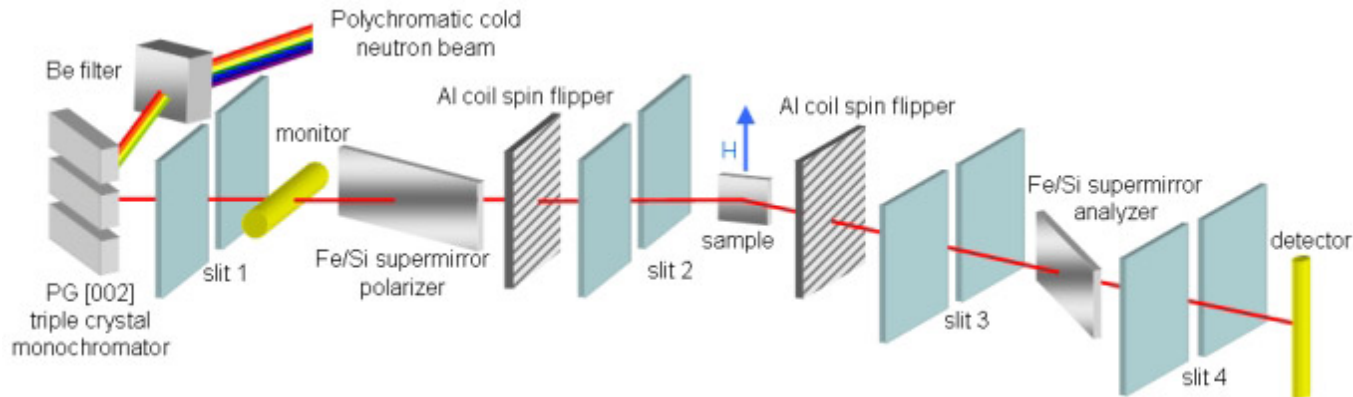
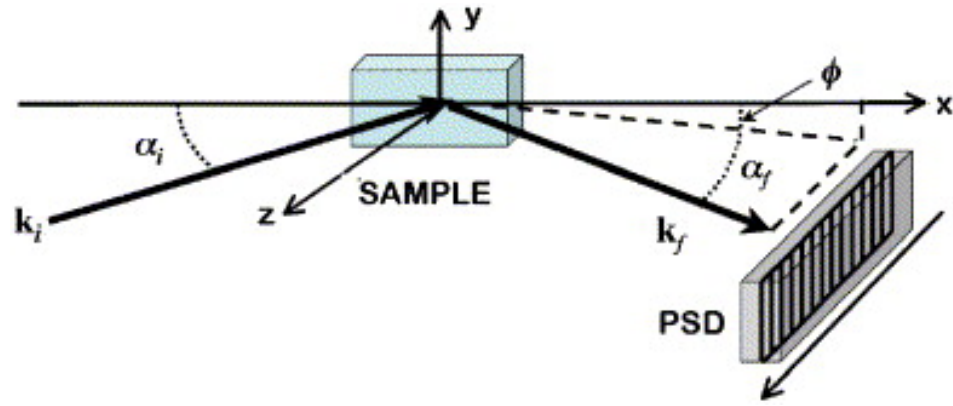
$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\lambda = \frac{h \text{ TOF}}{mL}$$

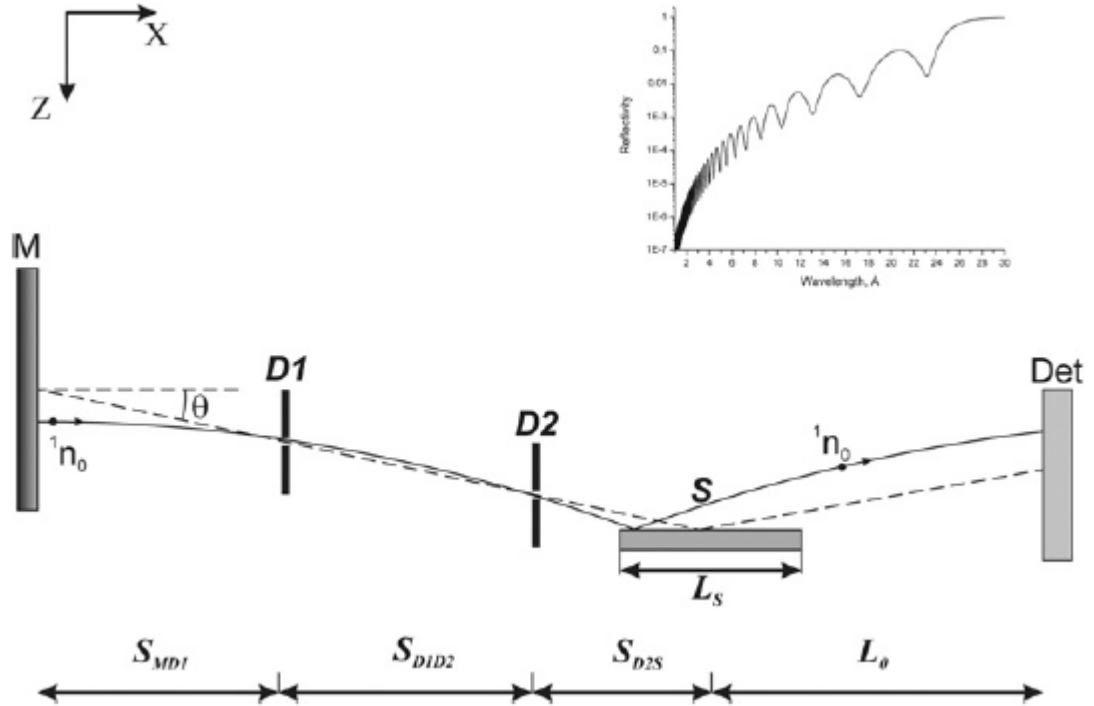
time-of-flight  
flight path

# Плоскости рассеяния

## Vertical sample geometry



## Horizontal sample geometry



## Рефлектометры в нейтронных центрах мира

Source	Quantity	Horizontal sample	Polarization	TOF
ILL	5	1	2	3
LLB	2	1	2	1
MLZ	4	2	4	1
NIST	4	2	3	0
ANSTO	2	1	2	2
KFKI	2	0	2	0
ISIS	5	5	3	5
SINQ	3	1	3	1
SNS	2	1	1	2
LANSCE	1	0	1	1
J-PARK	2	1	1	2

## Рефлектометры с вертикальным положением образца

Title	Source	Country	Source type	Set-up type	Flux at sample	q-interval	Minimal reflectivity
ADAM	ILL	France	SS	SS	$2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 5.4 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
D17	ILL	France	SS	TOF	$2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.02 – 40 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
Pore	KEK	Japan	Pulsed	TOF	$5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.15 – 7 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
ASTERIX	LANSCCE	USA	Pulsed	TOF	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05 – 1.5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-8}$
PRISM	LLB	France	SS	SS	$5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 50 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
MAGIC	NIST	USA	SS	SS	$1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 50 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
PBR	NIST	USA	SS	SS	$1.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 1 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-8}$
MR	SNS	USA	Pulsed	TOF	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 15 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-7}$
Morpheus	SINQ	Switzerland	SS	SS	$1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.1 – 1 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
PNR	VVR-M	Russia	SS	SS	$1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.1 – 1 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
REMUR	IBR-2	Russia	Pulsed	TOF	$3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05–7 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
REFLEX	IBR-2	Russia	Pulsed	TOF	$1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.03–2 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
GINA	BNC	Hungary	SS	SS	$4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 – 10 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
D3	Chalk River	Canada	SS	SS	$1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01–5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
MARIA	FRM2	Germany	SS	SS	$5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.02–32 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$

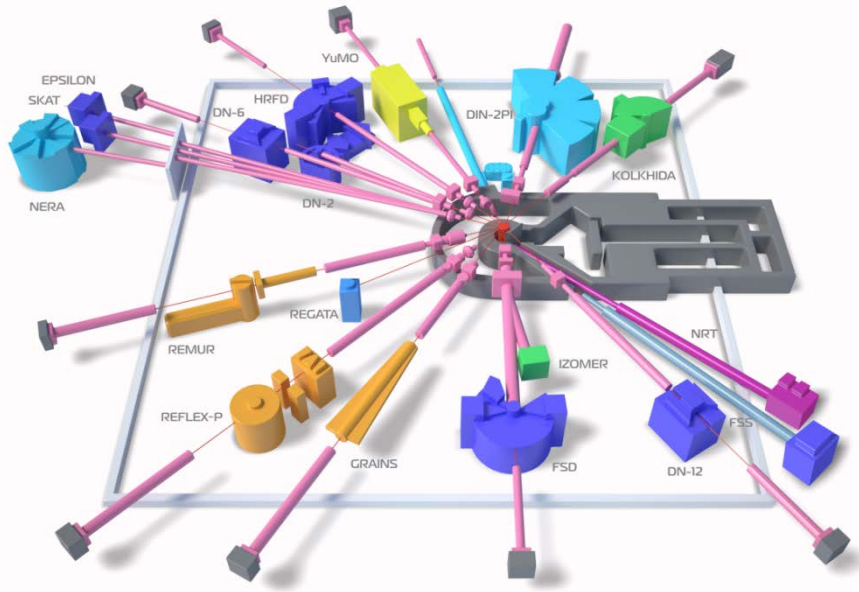
SS – steady-state mode; TOF – time-of-flight mode; mode with polarized neutrons is available



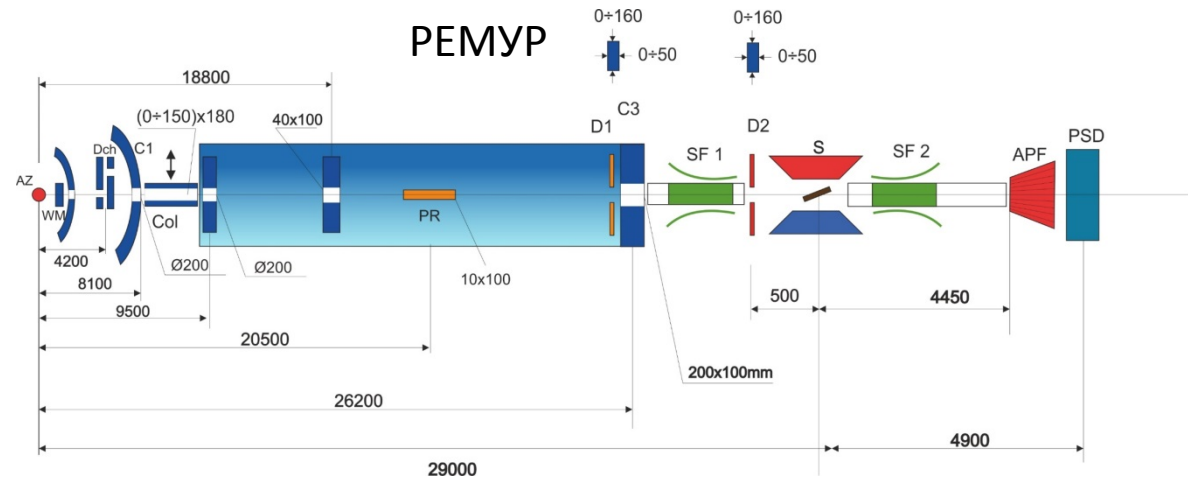
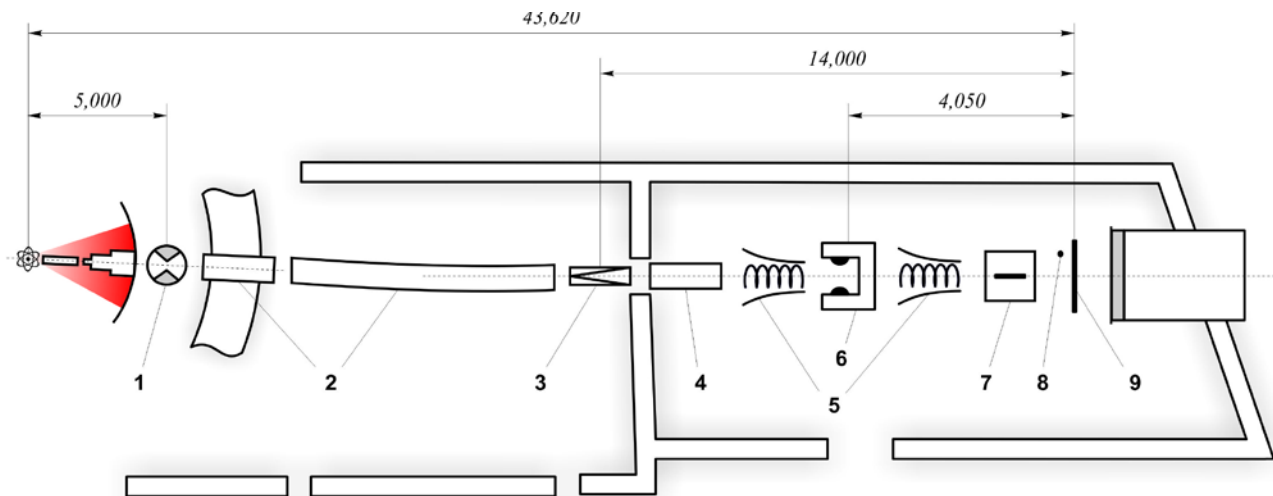
# Рефлектометры с горизонтальным положением образца

Title	Source	Country	Source type	Set-up type	Polarized neutrons	Flux at sample	q-interval	Minimal reflectivity
REFSANS	FRM II	Germany	SS	TOF	POL	$\sim 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05 - 10 $\text{nm}^{-1}$	$5 \times 10^{-7}$
N-REX	FRM II	Germany	SS	SS	POL	$3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 1.5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-7}$
FIGARO	ILL	France	SS	TOF	POL	$\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05 - 4 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
AMOR	SINQ	Switzerland	SS	TOF	non-POL	$1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
Platypus	OPAL	Australia	SS	TOF	POL	$1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05 - 5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-7}$
LR	SNS	USA	Pulsed	TOF	non-POL	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 2 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
GRAINS	IBR-2M	Russia	Pulsed	TOF	POL	$2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.05 - 1 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
Inter	ISIS	UK	Pulsed	TOF	non-POL	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-5}$
PolRef	ISIS	UK	Pulsed	TOF	POL	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 5 $\text{nm}^{-1}$	$1 \times 10^{-6}$
OffSpec	ISIS	UK	Pulsed	TOF	POL	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 5 $\text{nm}^{-1}$	First experim.
B16	J-PARC	Japan	Pulsed	TOF	POL	$1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.01 - 5 $\text{nm}^{-1}$	First experim.
REF	CARR	China	SS	SS	non-POL	$\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.03 - 0.5 $\text{nm}^{-1}$	Under constr.

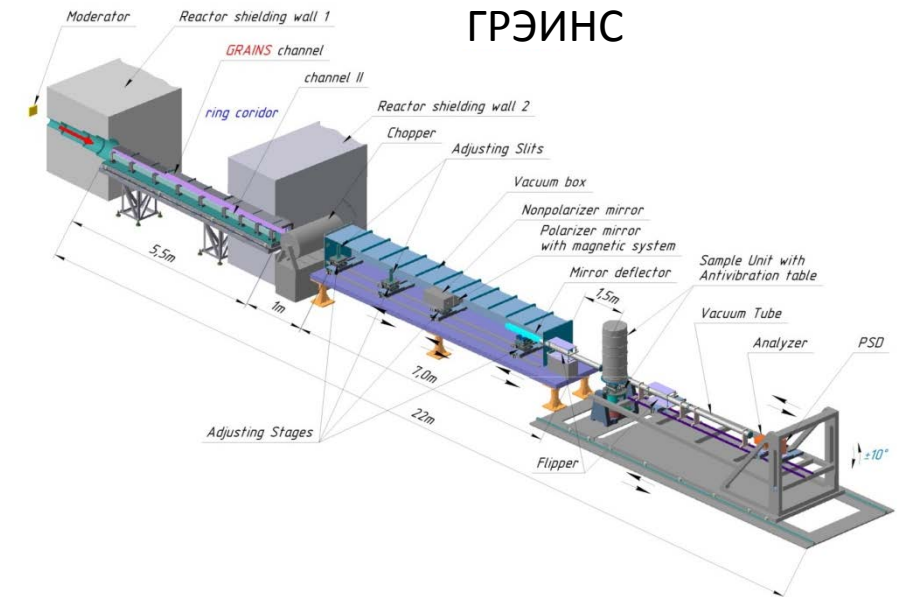
# РЕФЛЕКТОМЕТРЫ ИБР-2



РЕФЛЕКС



РЕМУР



ГРЭИНС

## РЕФЛЕКТОМЕТРЫ ИБР-2

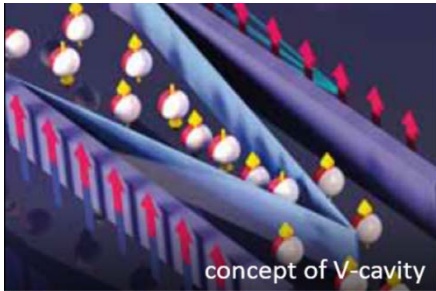
Установка	Плоскость рассеяния	Поляризация	Поток на образце	Q-диапазон	$\lambda$ - диапазон, Å
РЕМУР	V	+	$3 \times 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.05 – 7 нм <sup>-1</sup>	0.9 ÷ 15
РЕФЛЕКС	H	+	$10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.01 – 1.3 нм <sup>-1</sup>	1.4 ÷ 10
ГРЭИНС	H	(+)	$2 \times 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.05 – 3 нм <sup>-1</sup>	0.5 ÷ 10

## Окружение образца

- Низкие температуры  $1.5 \div 300 \text{ K}$
- Высокие температуры (газ/вакуум)  $300 \div 900/1900 \text{ K}$
- Магнитные поля  $10 \div 15 \text{ T}$
- Термостаты (температура, влажность, давление)
- X-Ray option
- MBE in-situ камера
- ...



# Анализ поляризации. Намагниченные зеркала

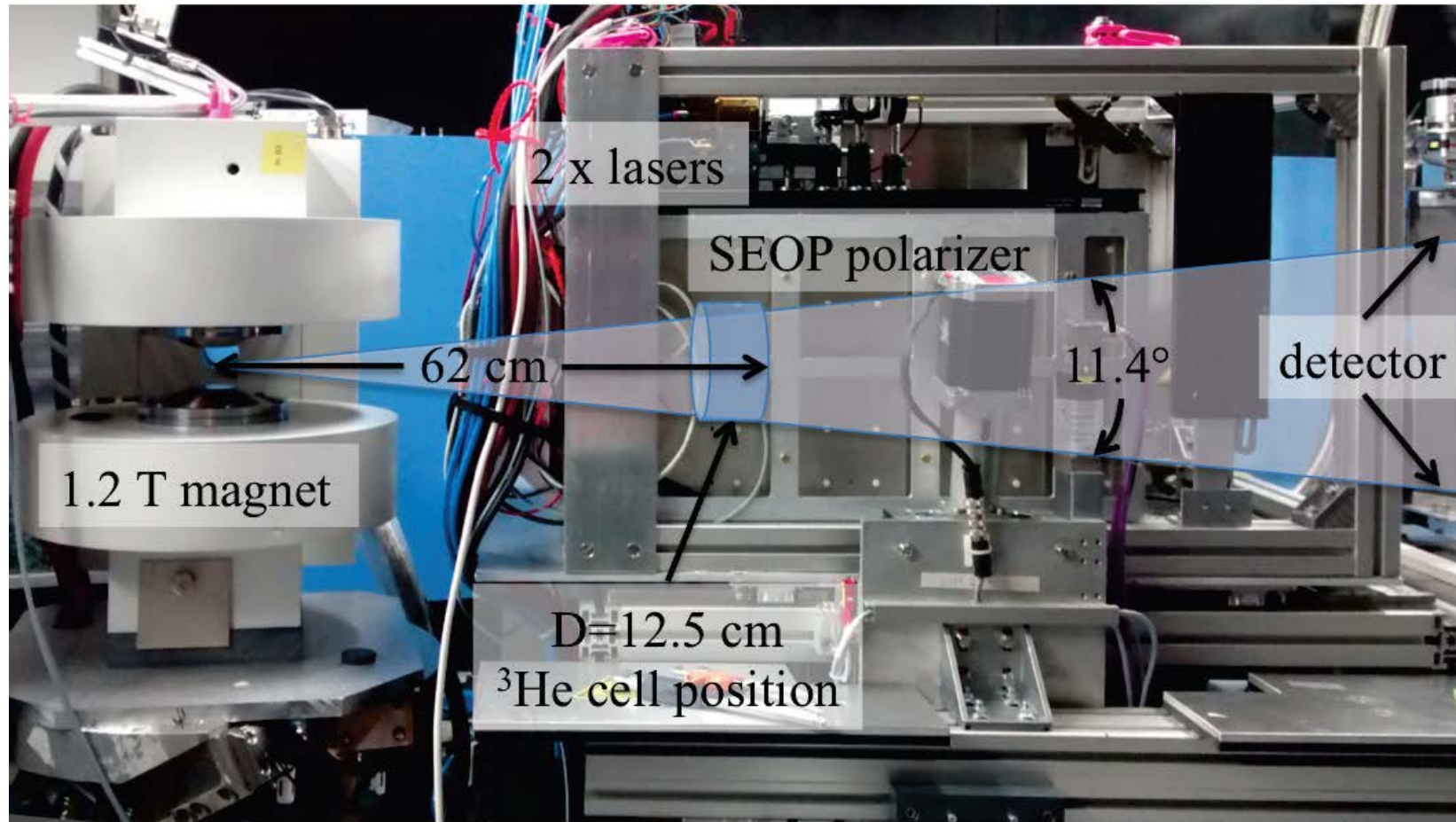


multi-channel V-cavity



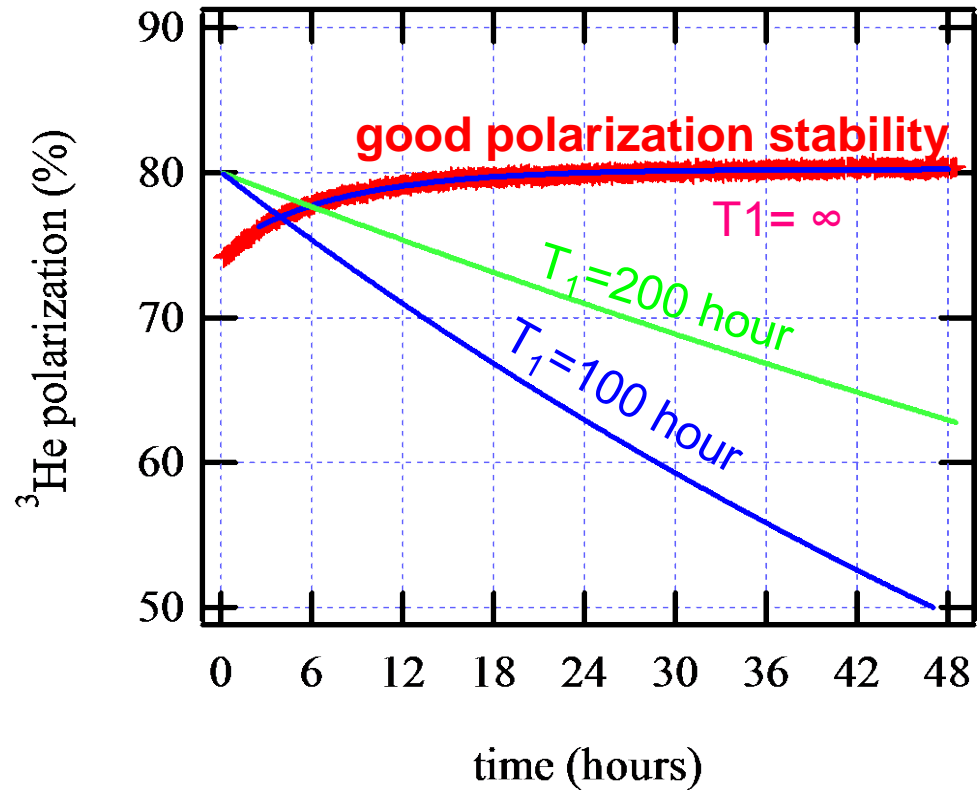
wide angle polarisation analyser

## Анализ поляризации. Pol He3 - filter



# Анализ поляризации. Pol He3 - filter

E. Babcock, S. Mattauch, A. Ioffe, *Nucl. Instrum. Methods A* **625**, 43 (2011).

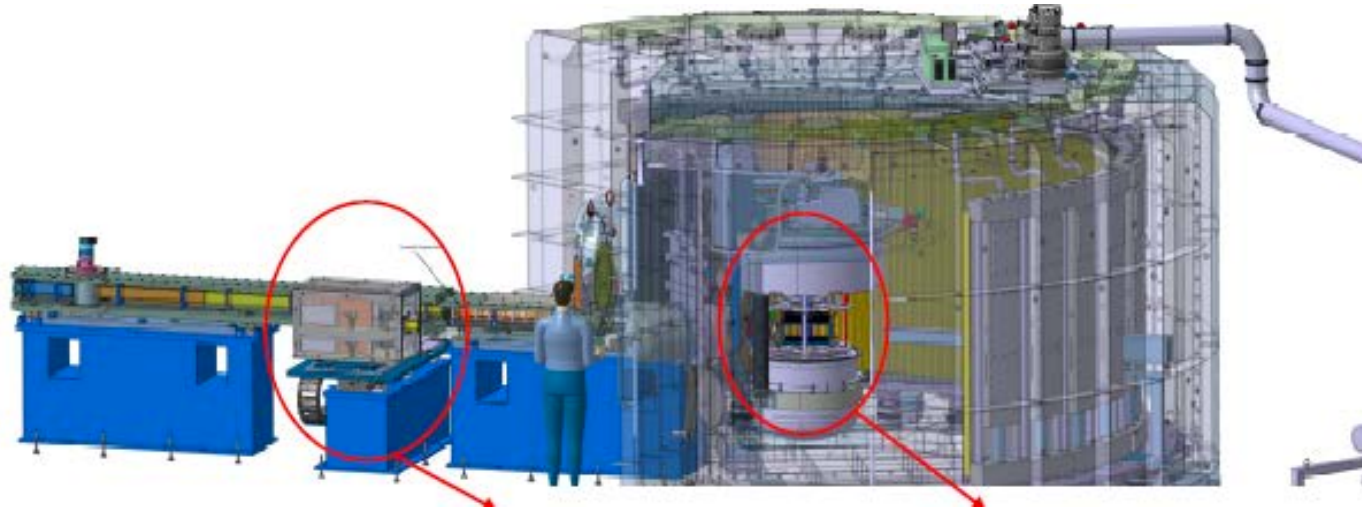


J1 cell with  $D = 6$  cm!  
 $T_{1\text{lab}} = 660\text{h}$

Polarization vs. time of J1 polarized in-situ  
on the JCNS reflectometer

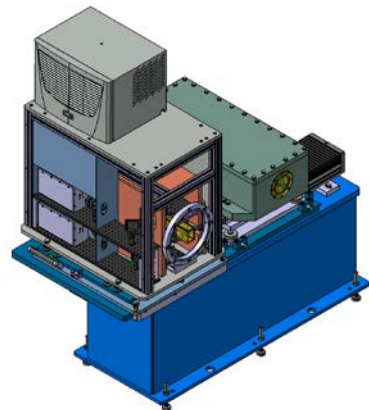
- Very high  $^3\text{He}$  polarization: 80.2% and  $T_1 = \infty$
- AFP flipper of  $^3\text{He}$  polarization – no need in a flipper after the sample

# Анализ поляризации. Pol He3 - filter



**$^3\text{He}$  polarizer**

**$^3\text{He}$  wide-angle Polarization Analyzer:**

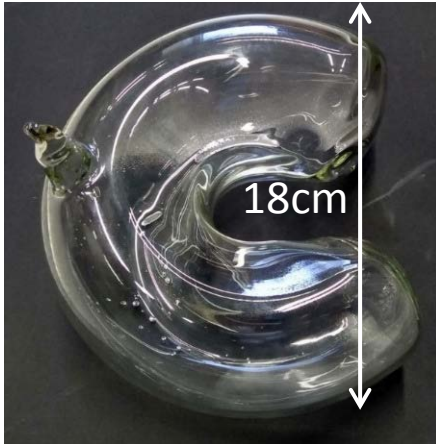


$^3\text{He}$  polarization  $\Rightarrow$  78.5%

Transmission through the polarizer 23.8%  
with neutron polarizing power 97.6% for  
 $0.895\text{\AA}$  neutrons.



# Анализ поляризации. Pol He3 - filter



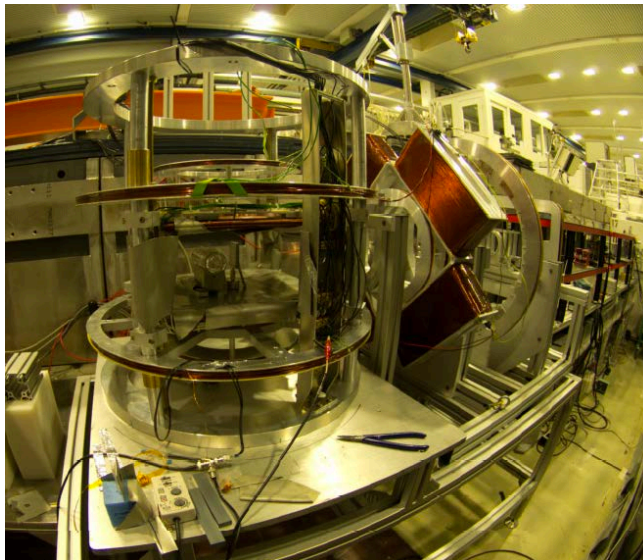
$\theta \approx 240^\circ$

Pressure  $^3\text{He} = 2\text{bar}$

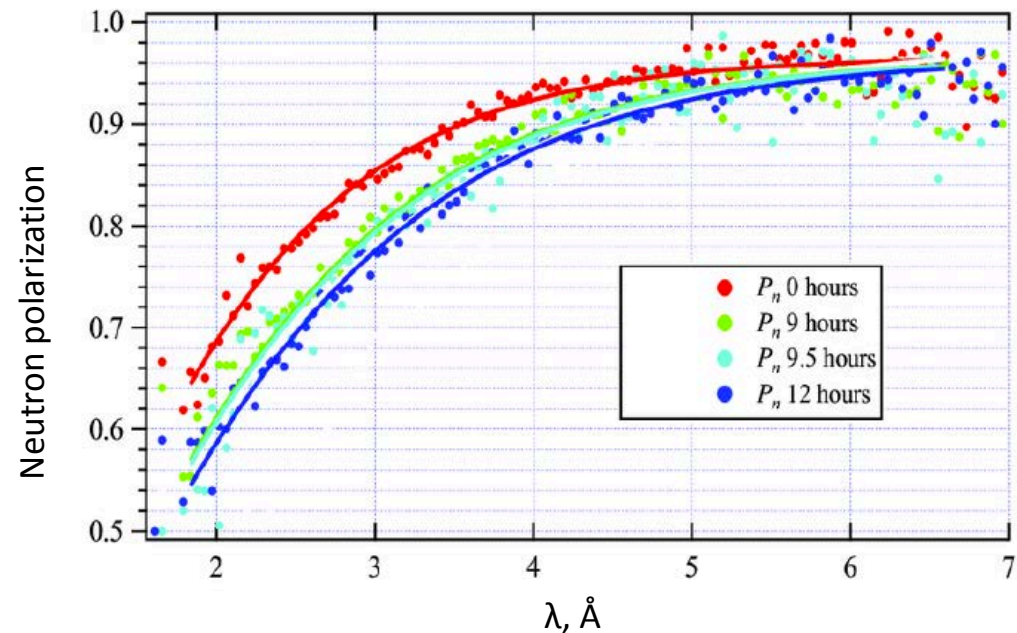
$T_1 = 300$  hours (c.f. theoretical limit  $T_{dipole} = 400\text{h}$ )

Designed to cover hot neutrons,  $\lambda = (0.55 \div 3.3)\text{\AA}$

Covers hot neutrons!

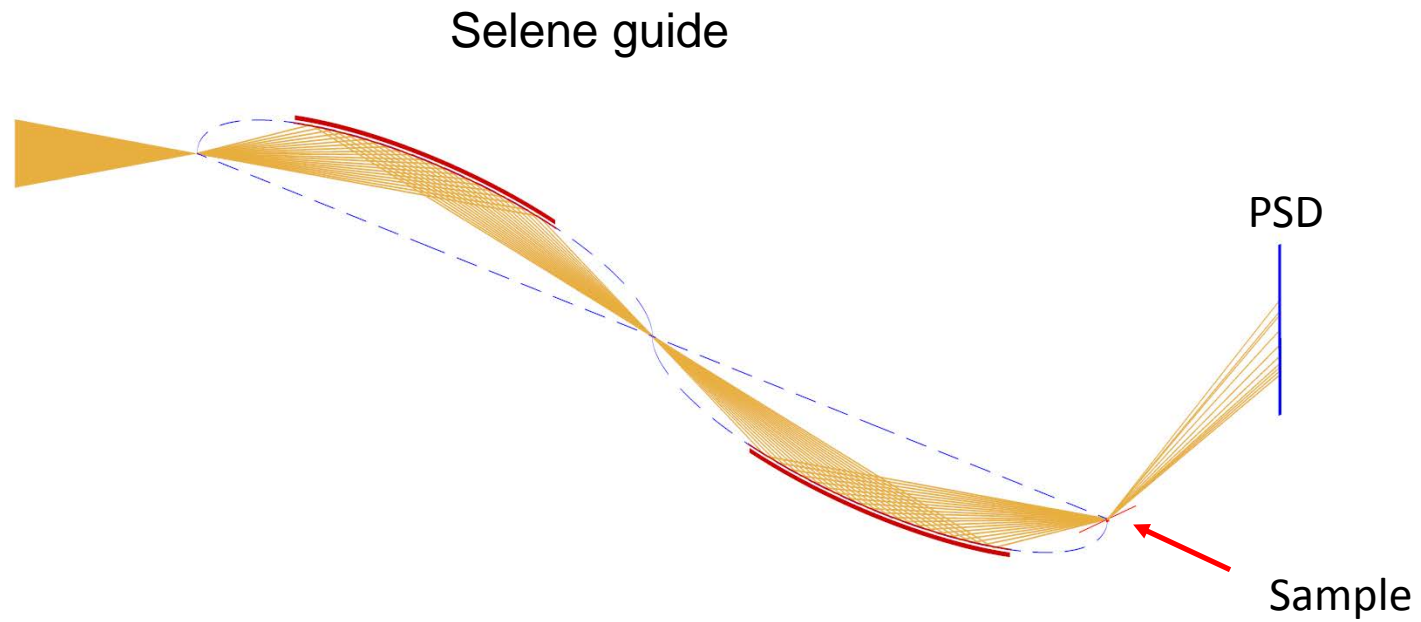


Results of TOF neutron test at V20@HZB



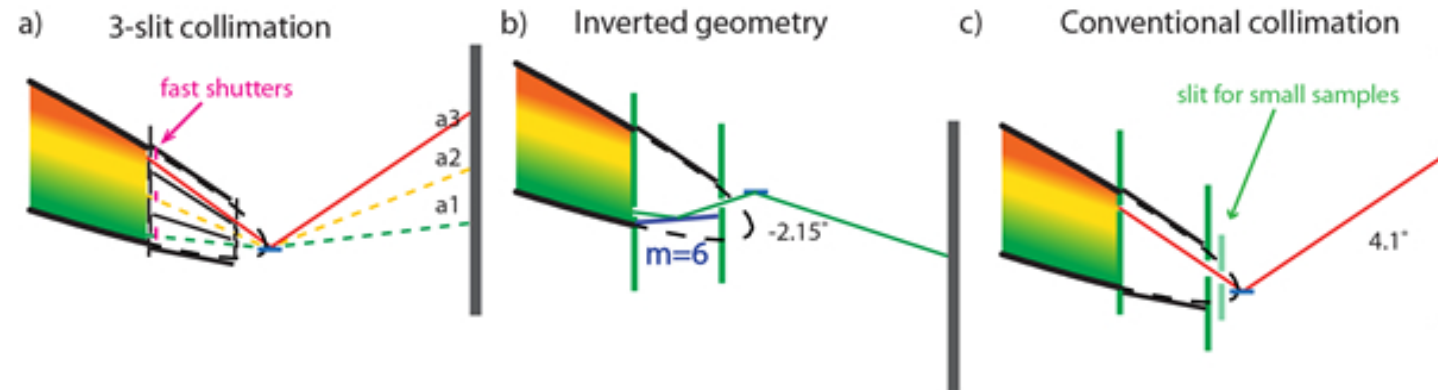
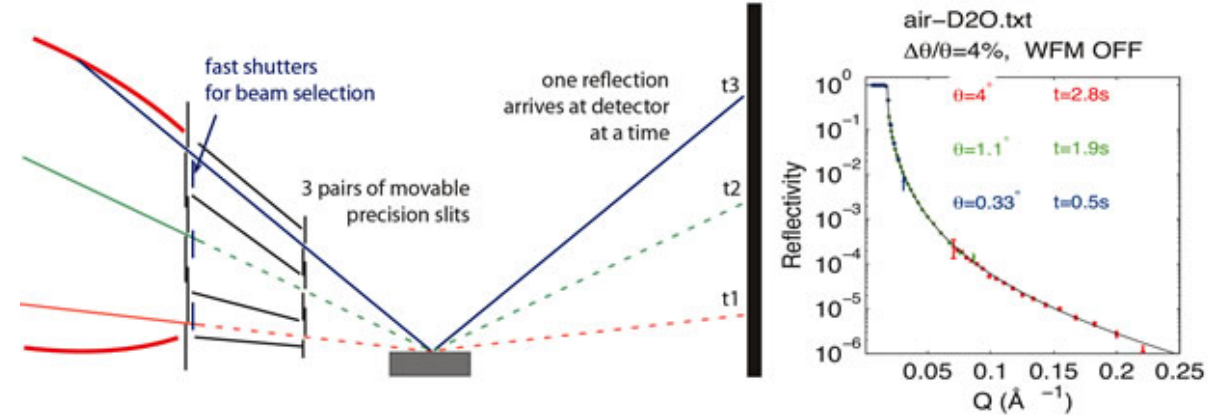
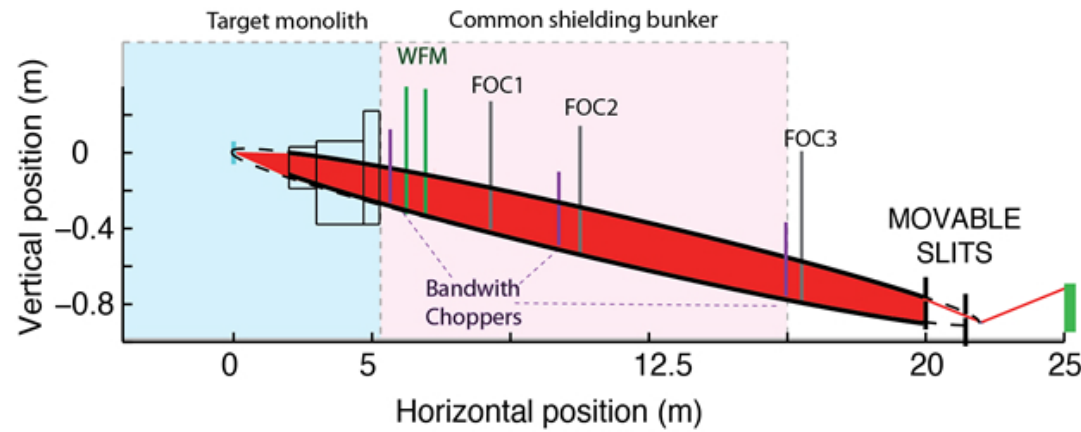
## Future ESS reflectometers

ESTIA . A focusing reflectometer for small samples



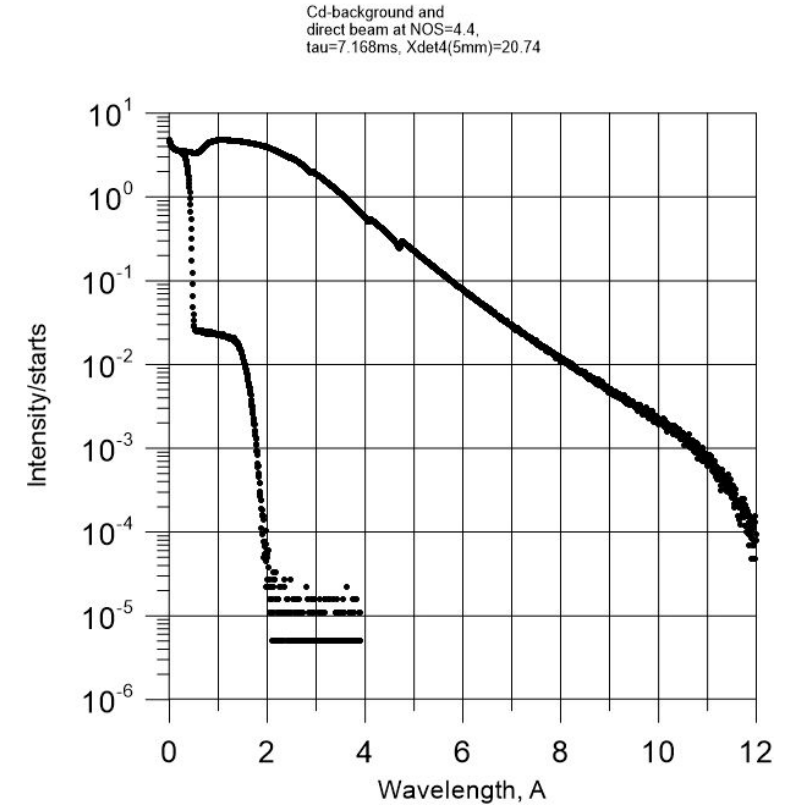
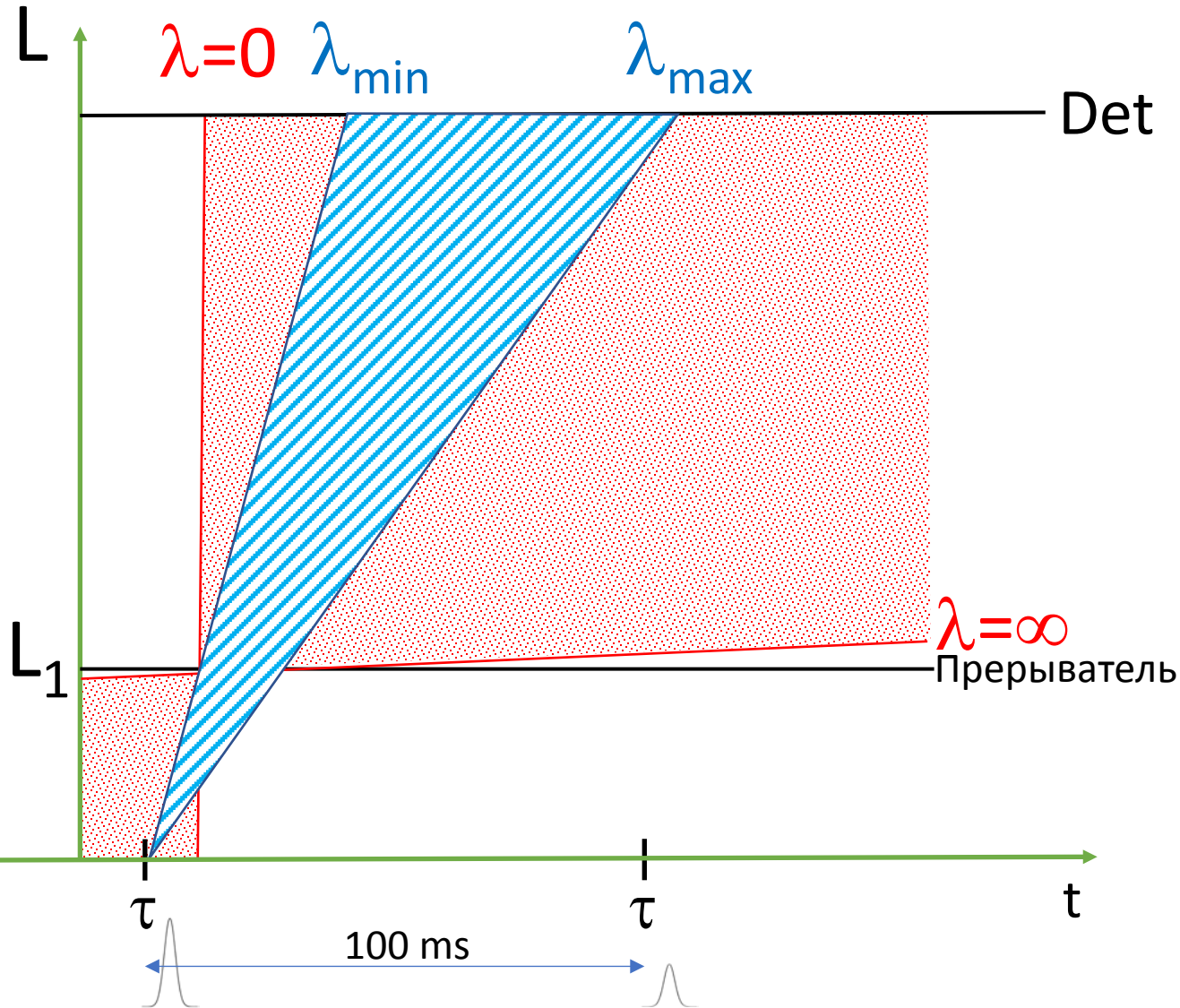
# Future ESS reflectometers

## FREIA . Fast Reflectometer for Extended Interfacial Analysis. Fast Kinetic Studies to Reflectometry



# Проблема фона на импульсном реакторе

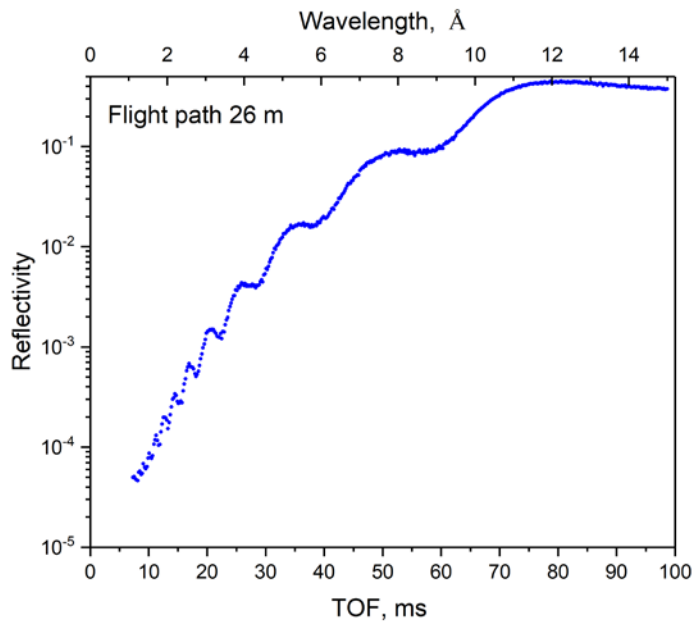
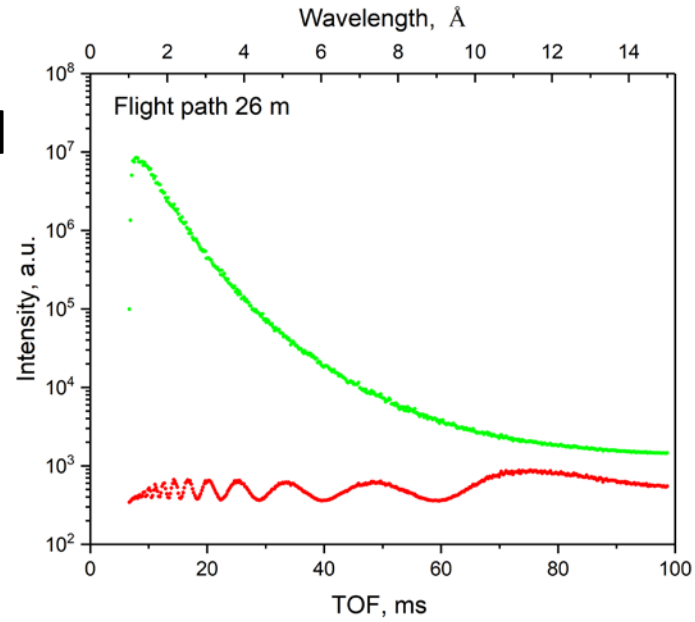
## Схема работы на реакторе ИБР-2



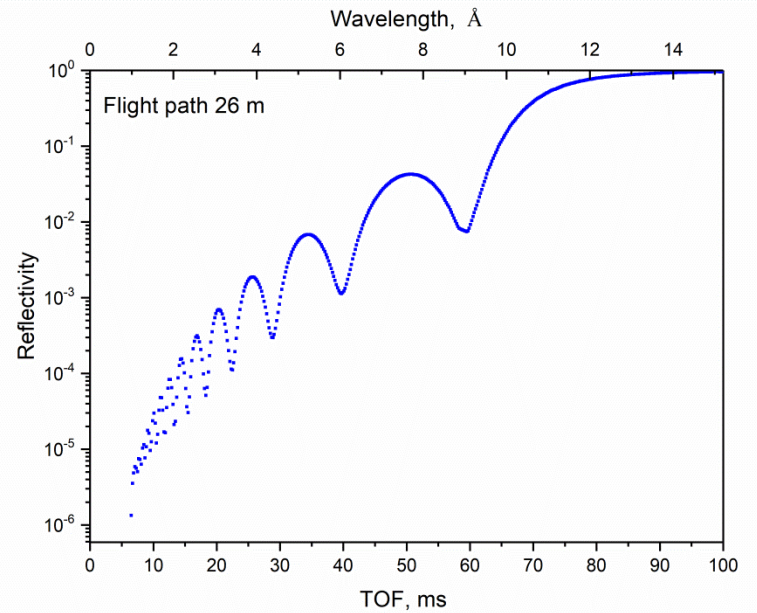
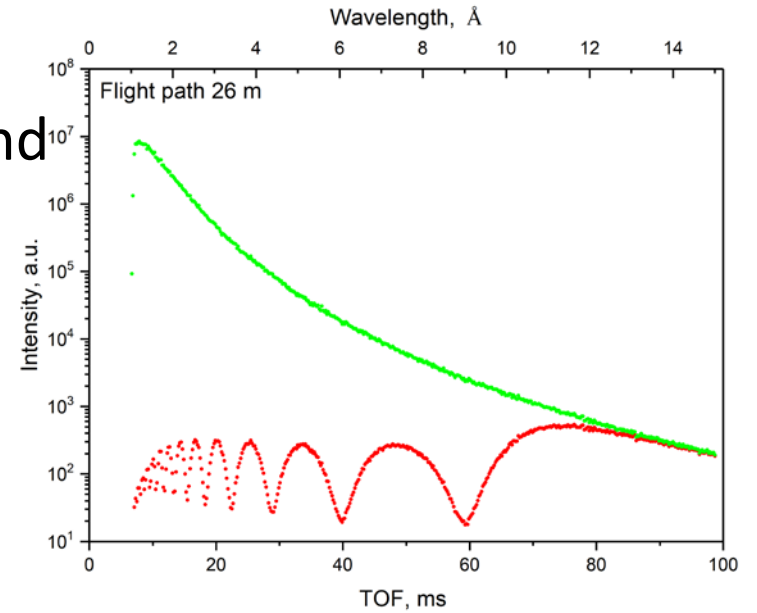
# Проблема фона на импульсном реакторе

Au(500Å)/Si,  $\varphi=14 \cdot 10^{-3}$

With  
5% background  
substrate

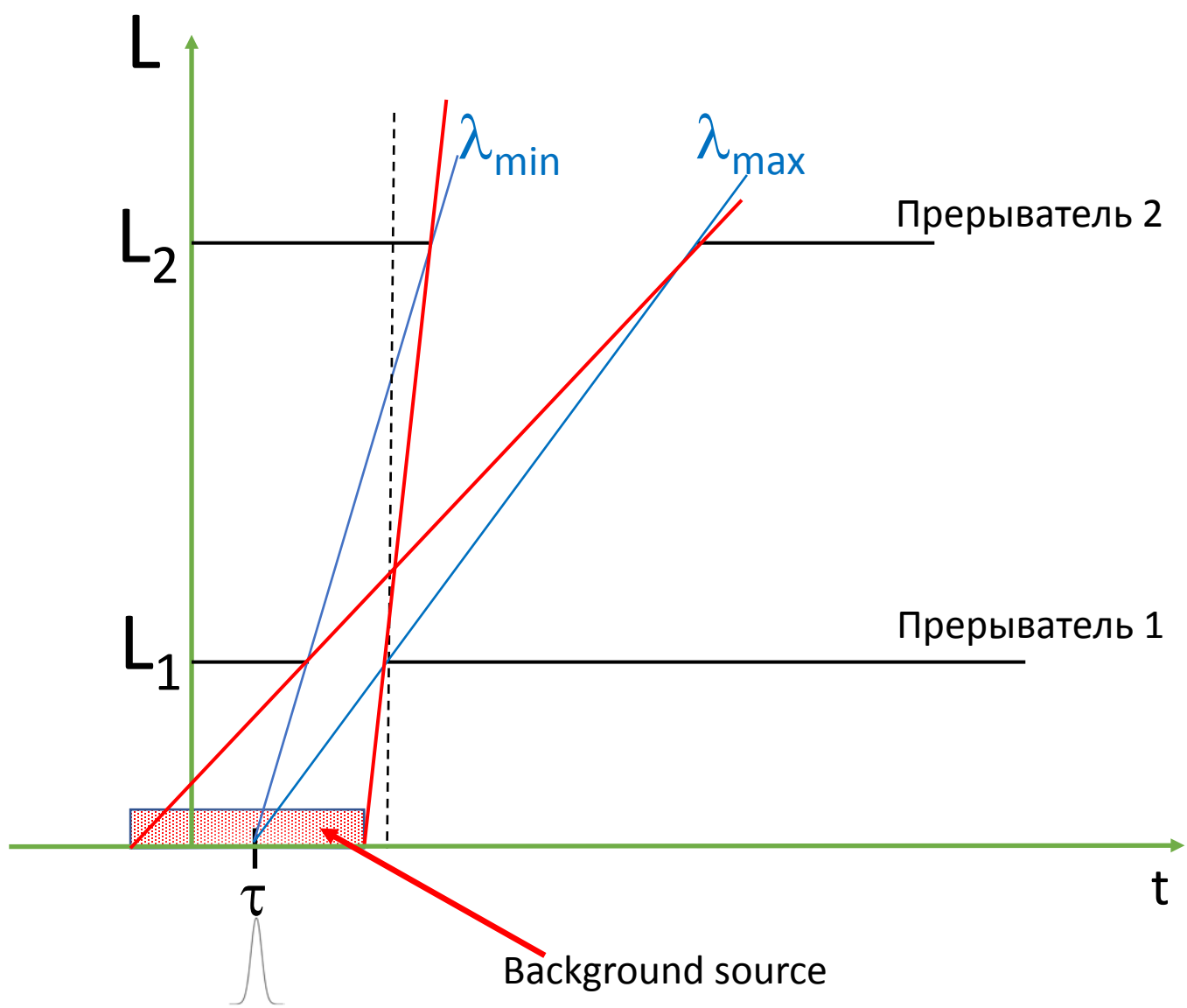


Without  
5% background  
substrate



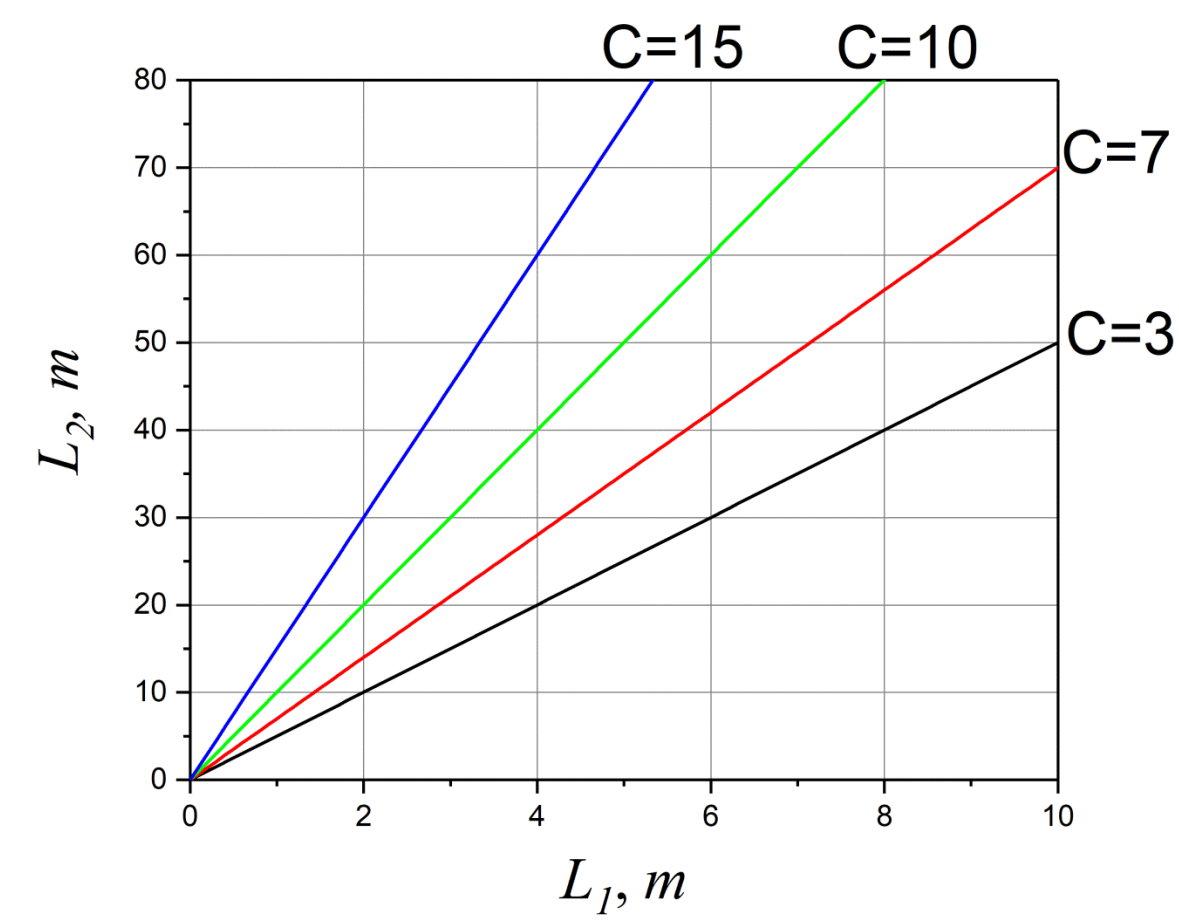
# Проблема фона на импульсном реакторе

## Схема подавления фона на 2-х прерывателях



$$L_{2min} = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} L_1$$

или изогнутый нейтроновод для фильтрации быстрых нейтронов

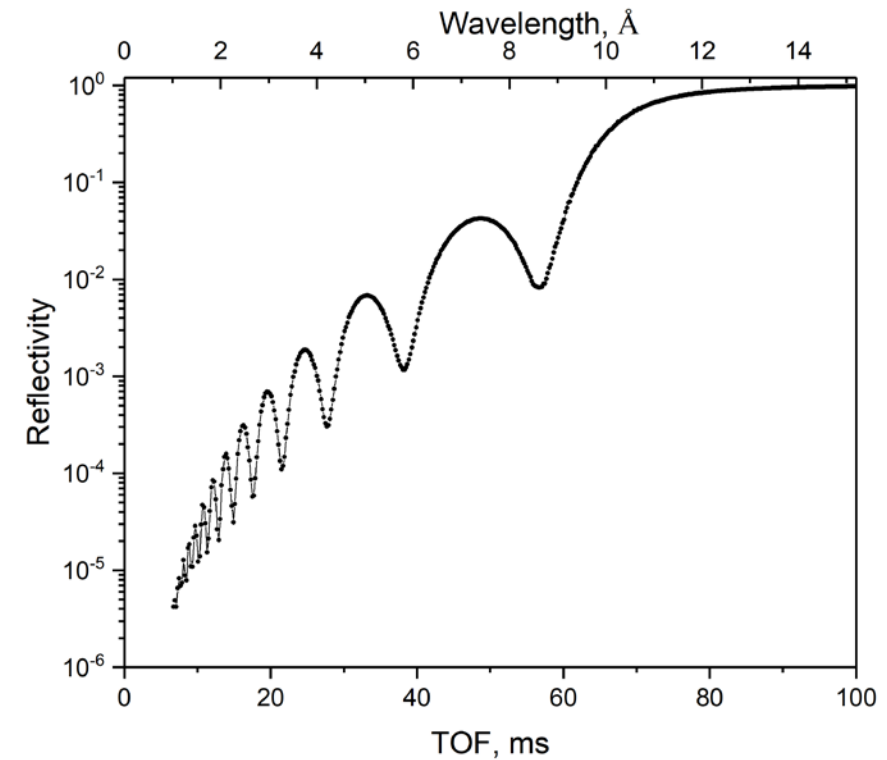
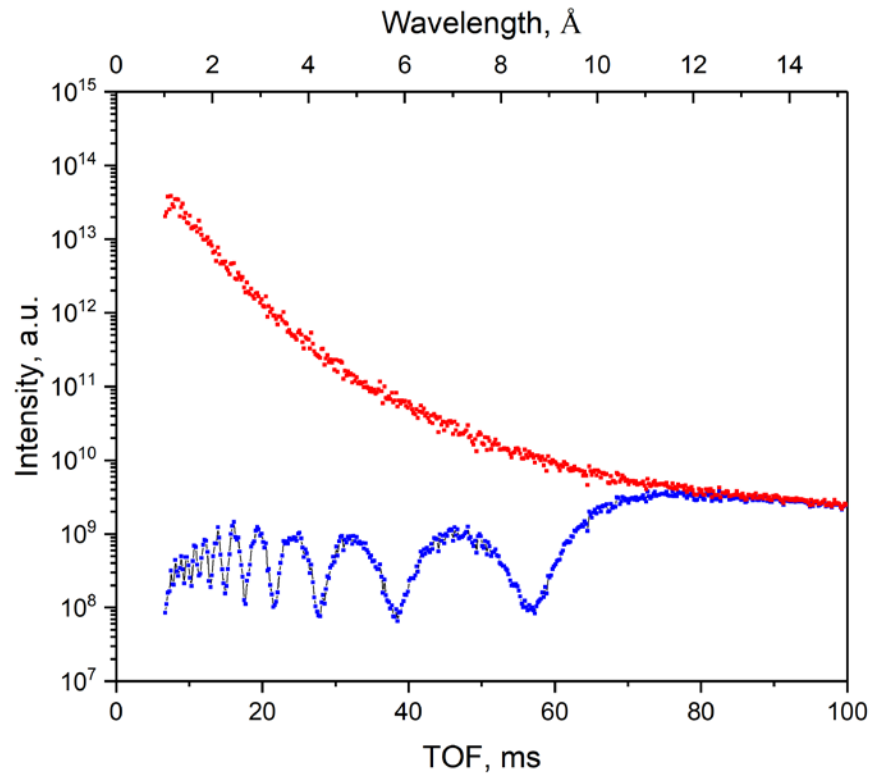


# Проблема фона на импульсном реакторе

Au(500Å)/Si,  $\varphi=14 \cdot 10^{-3}$

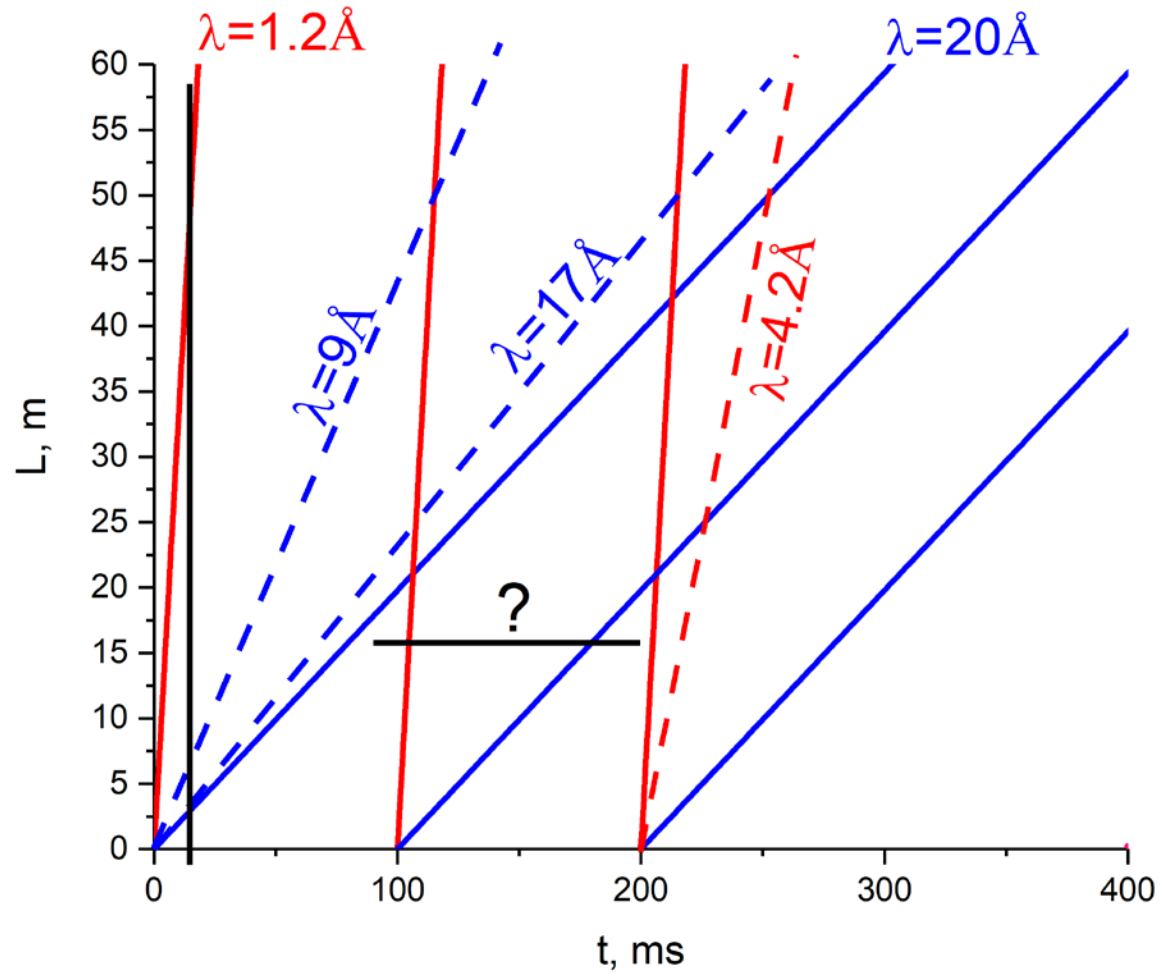
Chopper1 – 1m; Choper2 – 21 m;  $\lambda_{\min} = 1\text{Å}$ ;  $\lambda_{\max} = 15\text{Å}$

Background substrate – 5% of averaged power



# Проблема фона на импульсном реакторе

## Рецикличность



Опция Real-time reflectometry  
(большой Q диапазон)



Дополнительный прерыватель  
для работы на каждой 2-й вспышке  
реактора