

Предложения по созданию рефлектометров на реакторе Нептун

Рабочая группа: Авдеев М.В, Аксёнов В.Л., Боднарчук В.И., Жакетов В.Д., Кожевников С.В., Колупаев Е.Д., Кравцов Е.А., Никитенко Ю.В., Петренко А.В., Тропин Т.В., Хайдуков Ю.Н.

ЛНФ, ОИЯИ

28.06.2022 г.

ПЛАН ДОКЛАДА

1. Рефлектометрия поляризованных нейтронов
2. Возможности реактора НЕПТУН для рефлектометрии
3. Предложения по созданию рефлектометров на реакторе Нептун

Рефлектометрия поляризованных нейтронов

Объекты исследований:

- Металлические низкоразмерные гетероструктуры
- Полимерные плёнки
- Биологические системы
- Свободная поверхность жидкостей
- Магнитные жидкости

$$U = U_{nuc} + U_{mag}$$

$$U_{mag} = -\boldsymbol{\mu}\mathbf{B} = |\mu_n|\sigma\mathbf{B}$$

$$r = \begin{pmatrix} r_{++} & r_{+-} \\ r_{-+} & r_{--} \end{pmatrix}$$

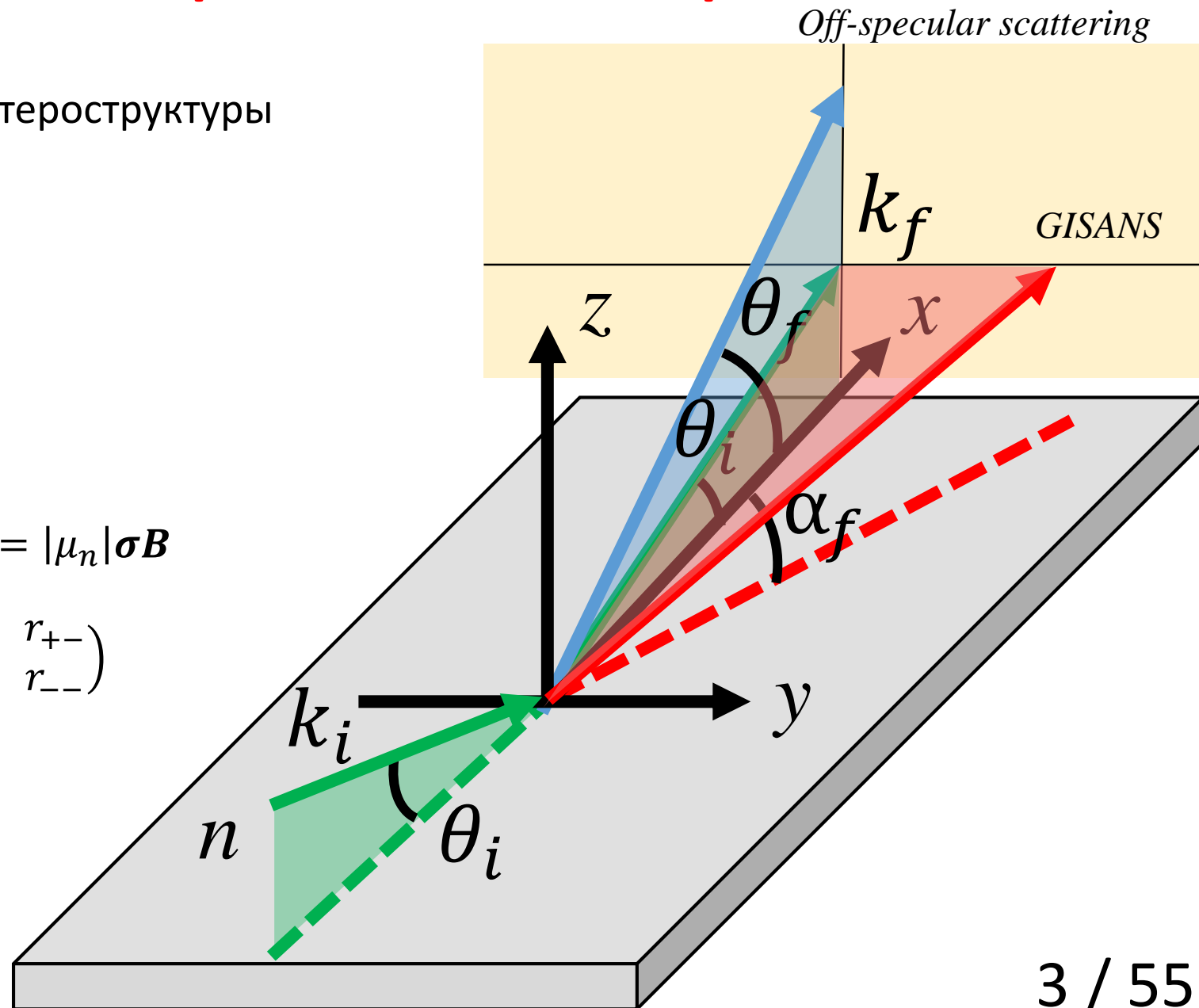
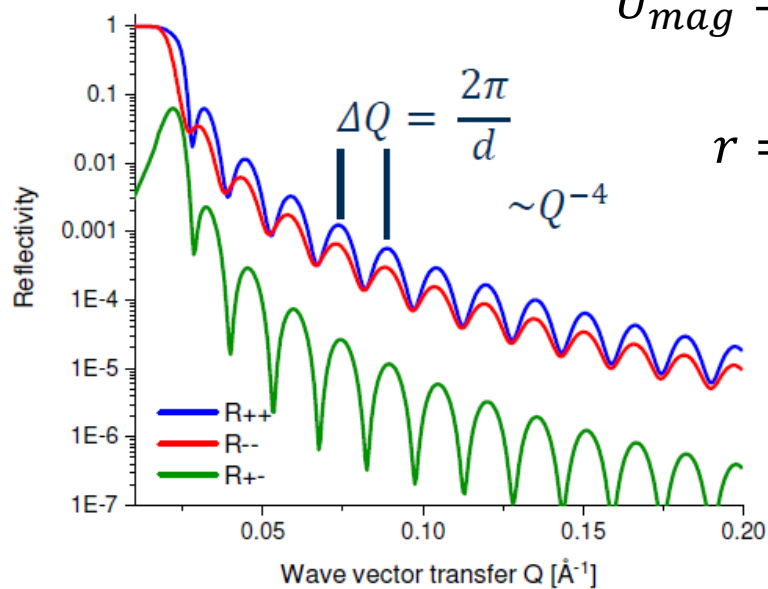
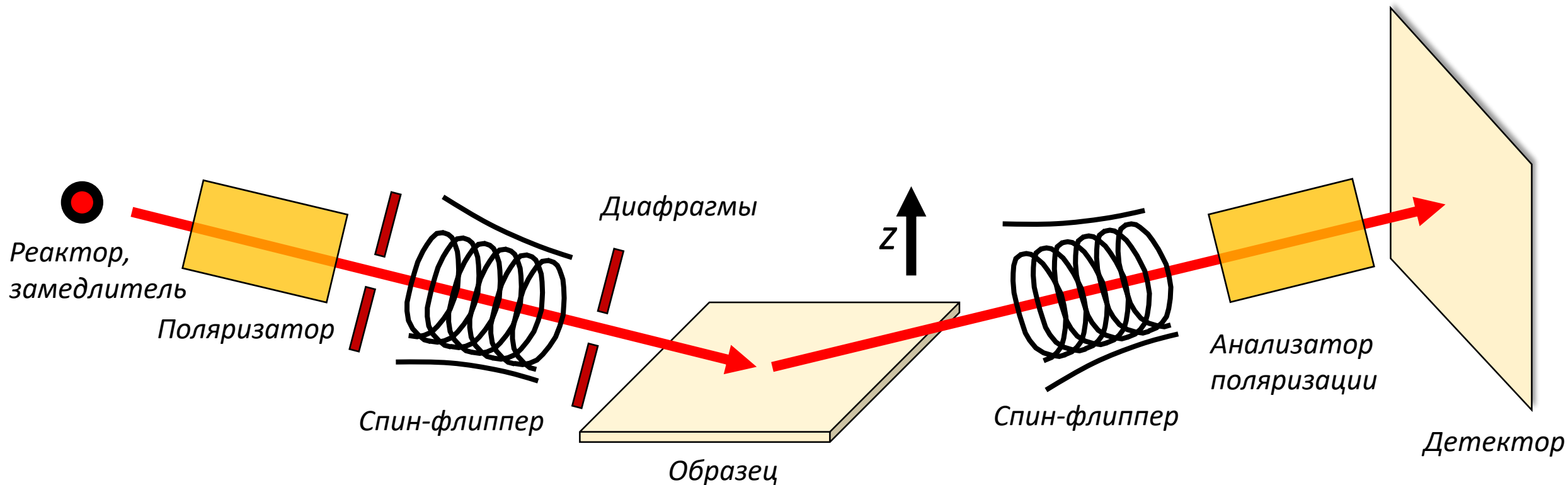


Схема рефлектометрического эксперимента с полным поляризационным анализом



$$Q_z = \frac{4\pi}{\lambda} \theta$$

➔ $\theta = const$
➔ $\lambda = const$

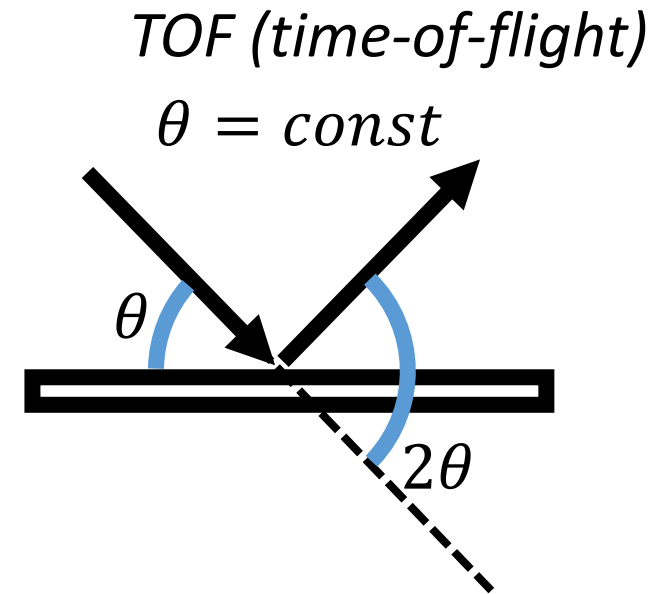
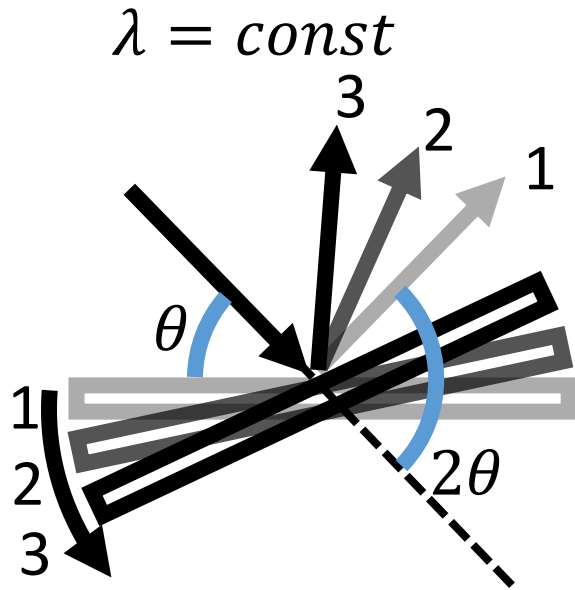
➔ плоскость образца
➔ вертикальная
➔ горизонтальная

Рефлектометрия на импульсном источнике

Два метода измерений в НР:

$$R(Q) = I_R / I_0$$

$$Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta)$$



- На постоянном источнике оба метода дают примерно одинаковую интенсивность
- Времяпролетная техника более удобна для *in situ*-измерений в режиме реального времени
- TOF - Рефлектометр на импульсном источнике более эффективен, чем на стационарном
- Две трети нейтронных рефлектометров в мире – времяпролетные установки

В.И. Боднарчук и др. Нейтронная рефлектометрия в России: Текущее состояние и перспективы // Кристаллография, 2022, том 67, №1, с. 57-71

В.Д. Жакетов и др. Релаксация магнитного состояния ферромагнитно-сверхпроводящей слоистой структуры. // ЖЭТФ, 2017, том 152, вып. 3(9), стр. 565-580.

Сравнение рефлектометров SuperADAM (ILL), Figaro (ILL) и ESTIA (ESS)

Parameters	SuperADAM (ILL)	FIGARO (ILL)	ESTIA (ESS)
Neutron flux at the sample, $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$8 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$(1 \div 5) \cdot 10^7$
Average power, MW	58.3	58.3	5

Devishvili A. et al. SuperADAM: Upgraded polarized neutron reflectometer at the Institut Laue-Langevin // REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 84, 025112 (2013)

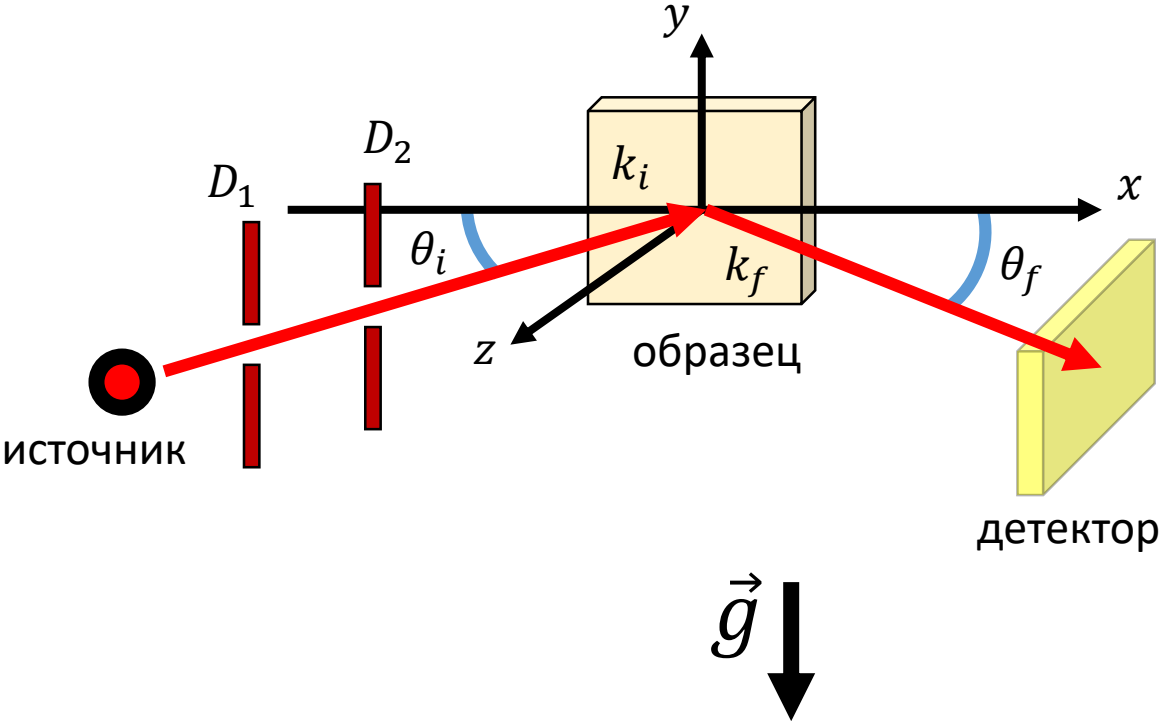
R.A. Campbell et al. FIGARO: The new horizontal neutron reflectometer at the ILL // Eur. Phys. J. Plus (2011) 126: 107.

F. Piscitelli. The Multi-Blade Boron-10-based Neutron Detector for high intensity Neutron Reflectometry at ESS // arXiv:1701.07623v1 (2017)

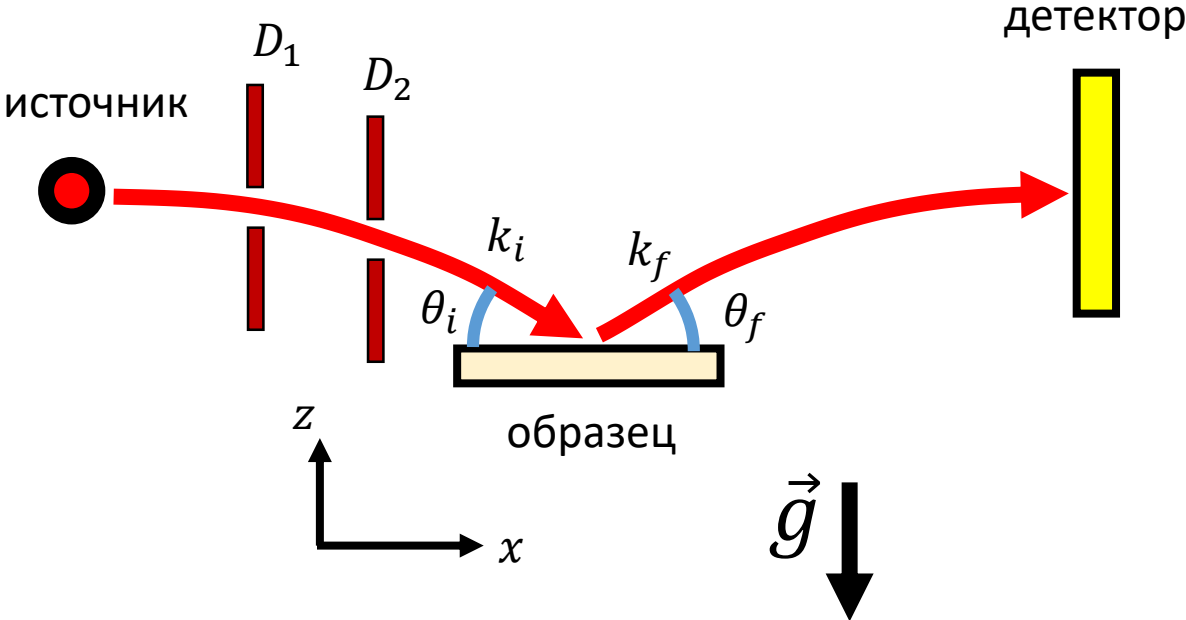
Roland Garoby et al. The European Spallation Source Design // Phys. Scr. 93 (2018) 014001 (121pp).

Рефлектометры с горизонтальной и вертикальной геометрией образца

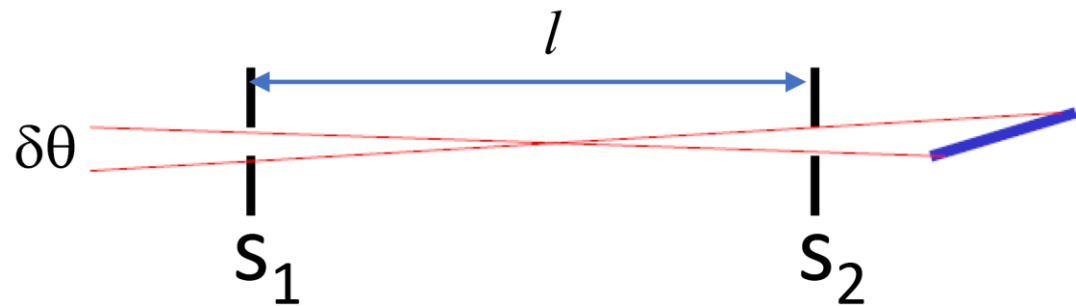
Рефлектометр с вертикальной геометрией



Рефлектометр с горизонтальной геометрией



Разрешение рефлектометра

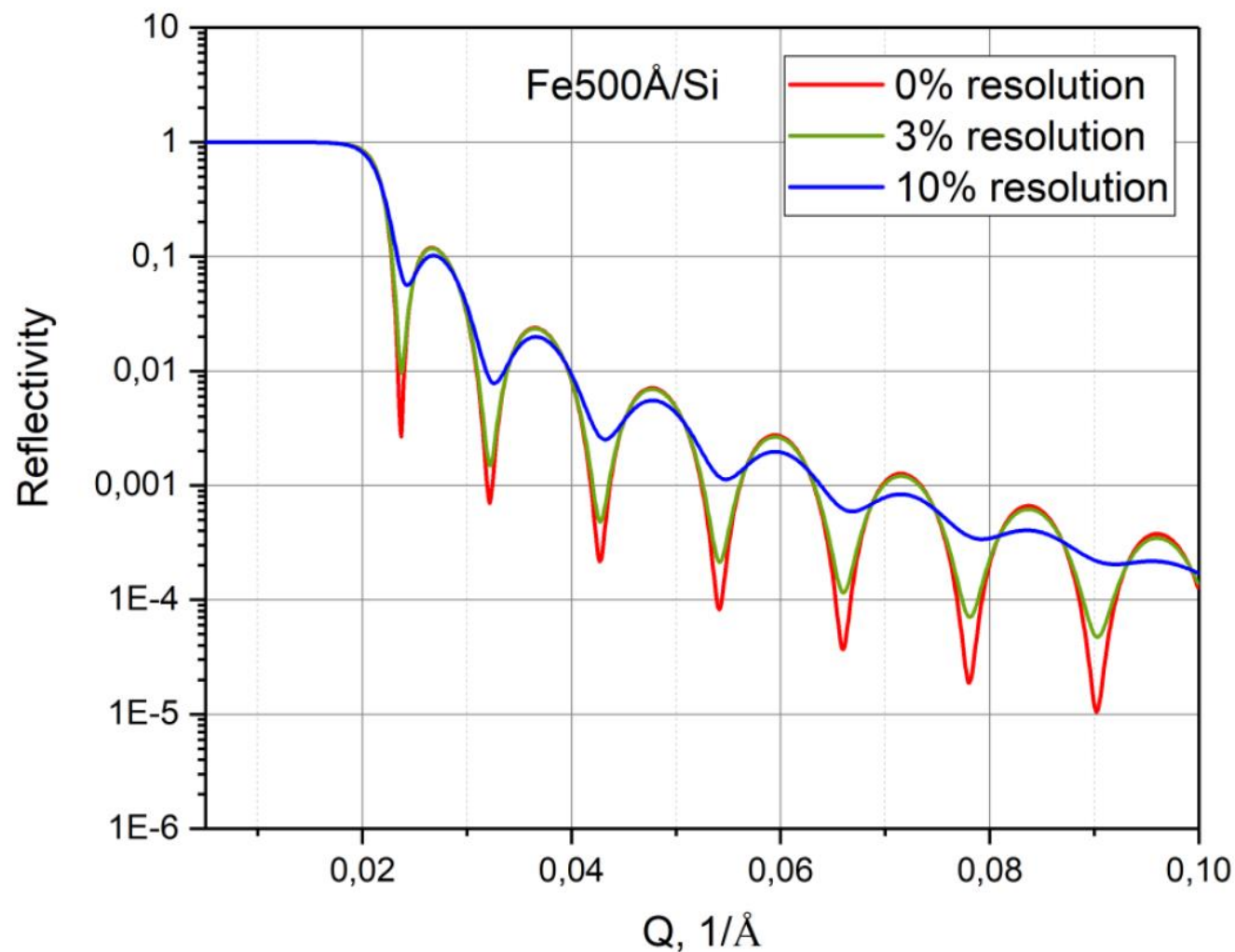


$$\delta\theta = (s_1^2 + s_2^2/3)^{1/2} / l$$

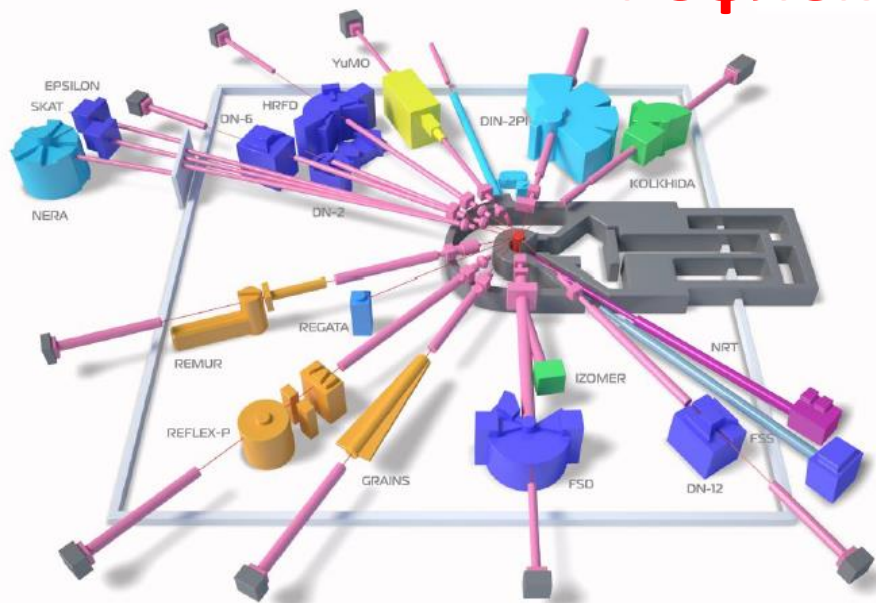
$$\delta\lambda = 3.956 \cdot \sqrt{\frac{(\tau/2)^2 + (\Delta t/2)^2}{3}} \cdot L^{-1}$$

τ – ширина импульса

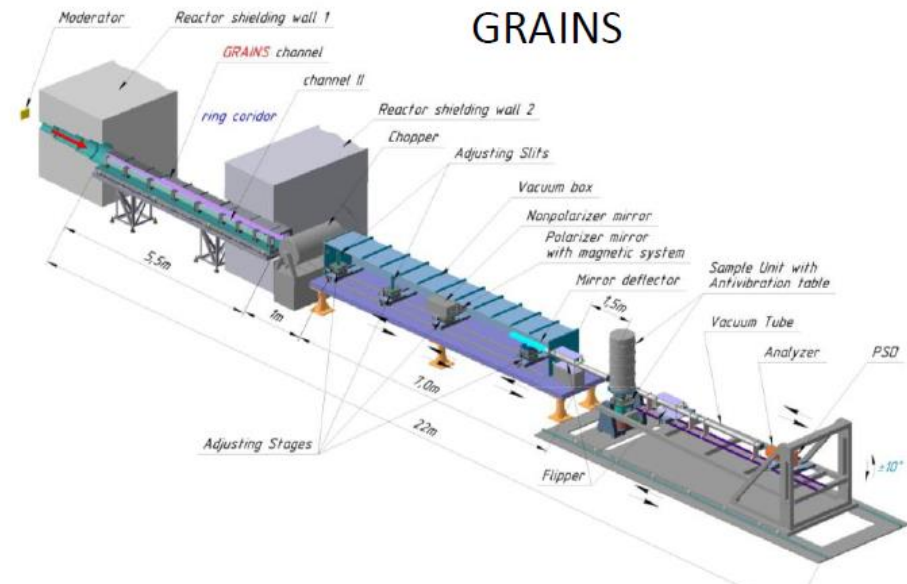
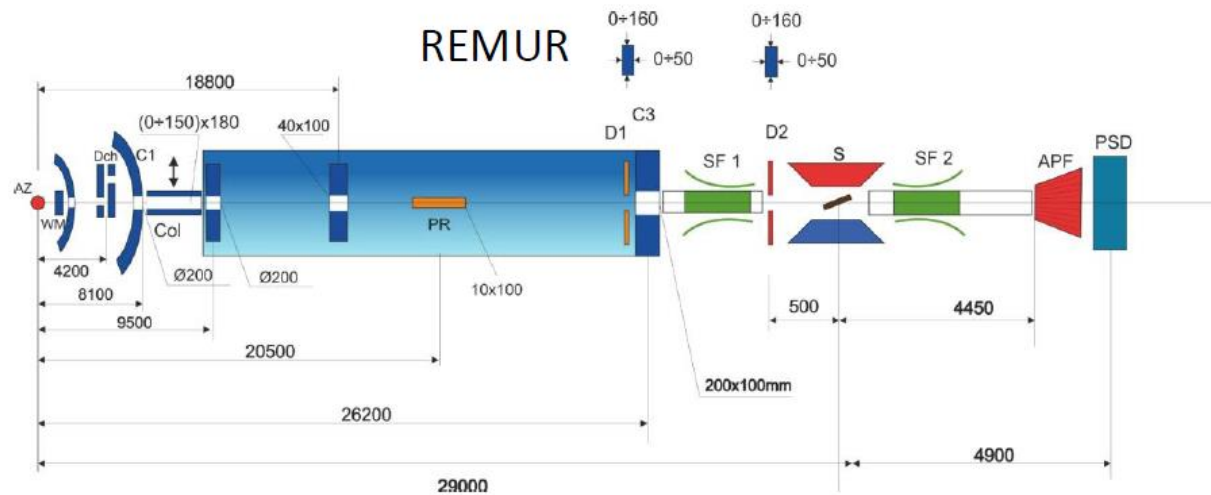
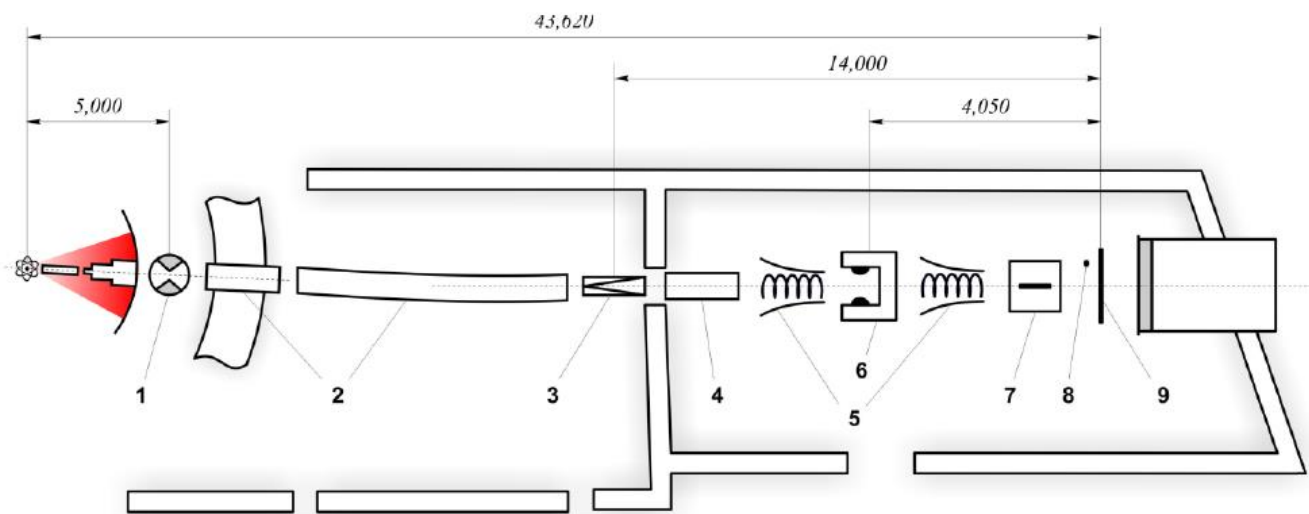
L – расстояние от замедлителя до детектора



Рефлектометры на реакторе ИБР-2

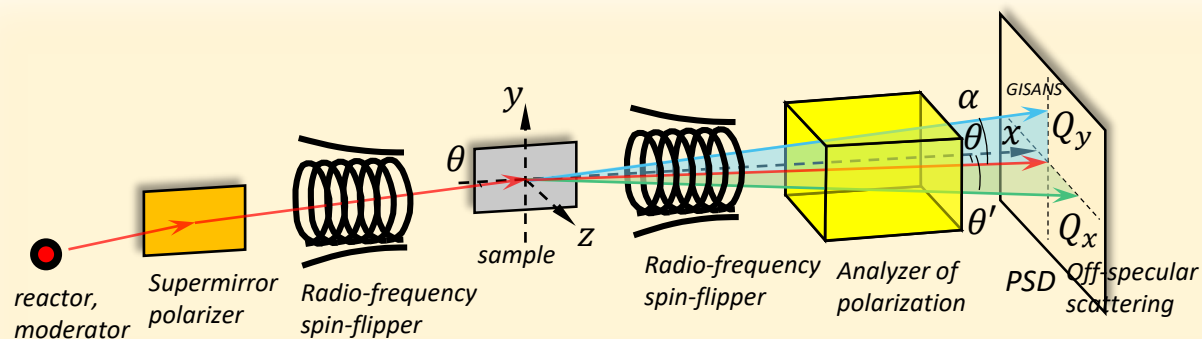
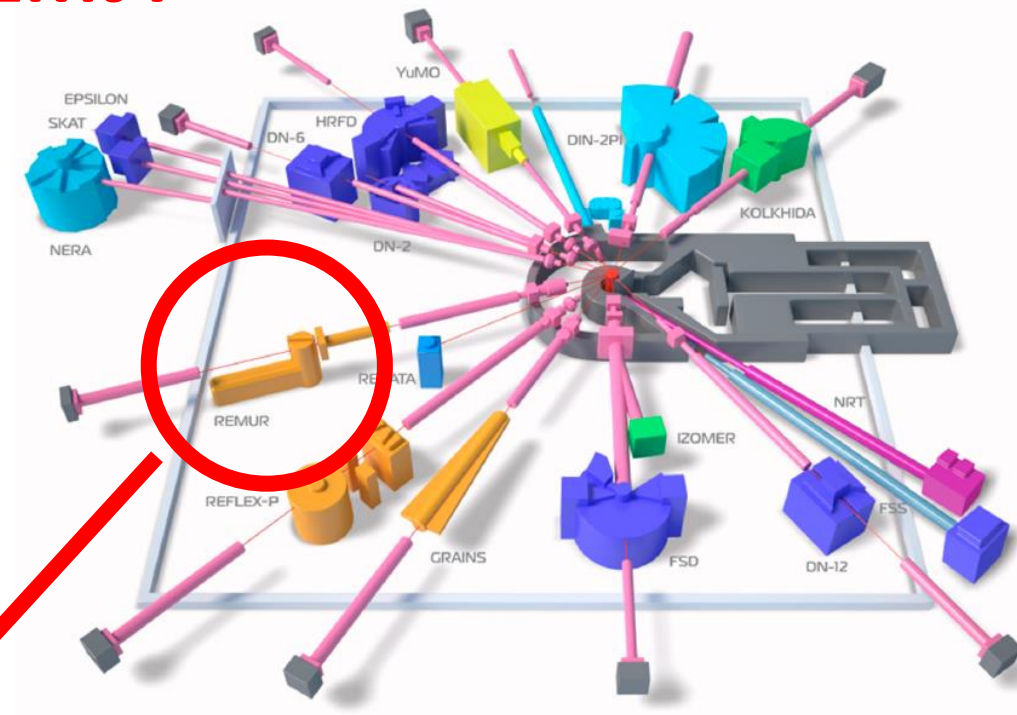


REFLEX



Рефлектометр РЕМУР

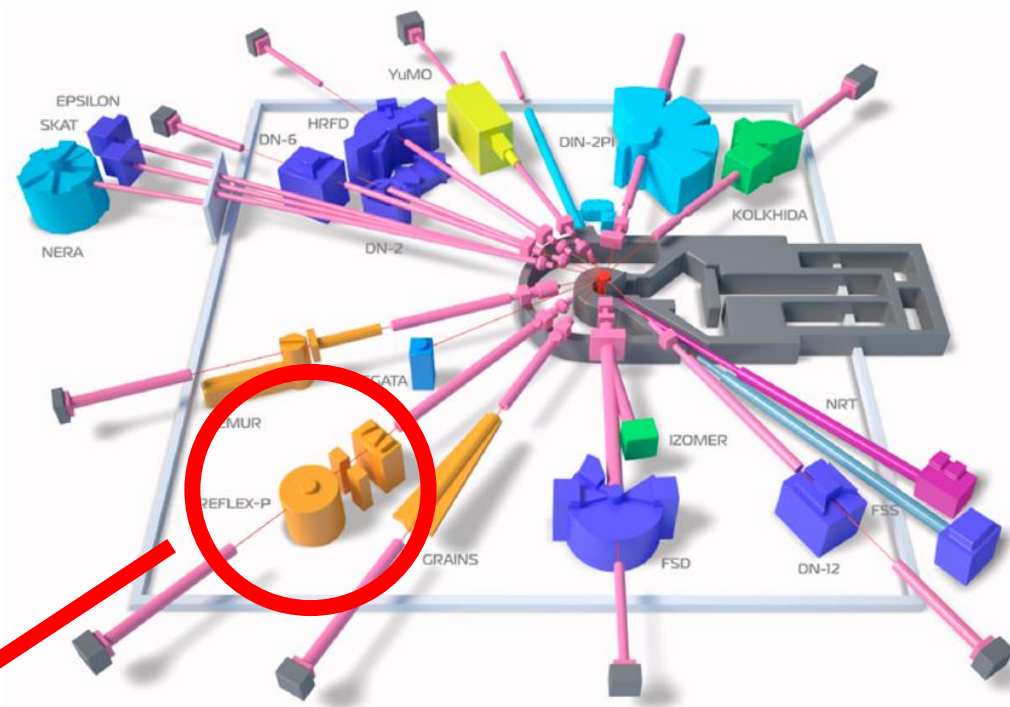
Диапазон длин волн, Å	0.9 – 15 (23.5)
Диапазон по Q, Å ⁻¹	10 ⁻³ – 2
Поток нейтронов на образце, с ⁻¹ см ⁻²	3·10 ⁵
Разрешение по Q, %	10 ⁻³
Макс. длина пролетной базы (расстояние замедлитель-детектор), м	34
Расстояние образец-детектор, м	0.7 – 4.9



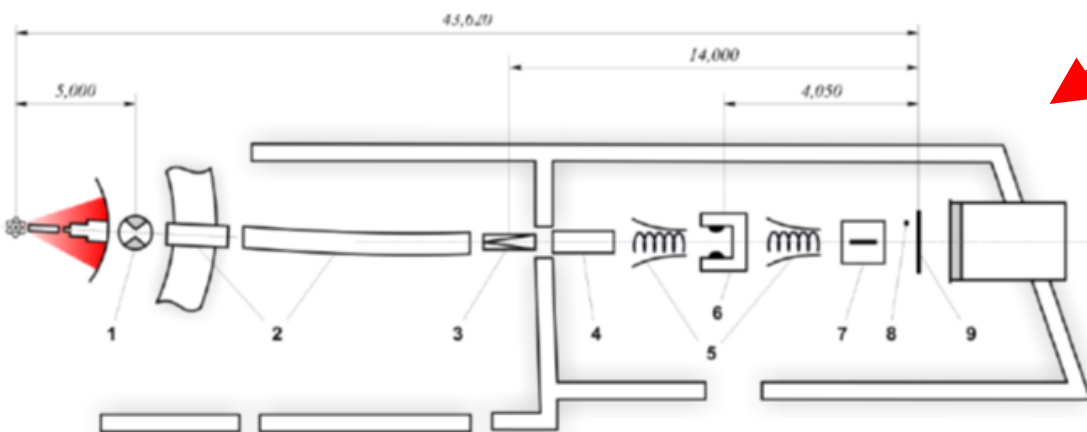
Минимальные размеры образца	5 x 5 мм ²
Магнитное поле на образце, Т	< 1.5
Спин-флипперы	2 радиочастотных адиабатических спин-флиппера
Поляризатор	Суперзеркало m=2
Анализатор	Веерный суперзеркальный m=2
Детекторы	D ПЧД 200x200 мм ² , He ³
Система формирования пучка	Нейтронотвод отсутствует

Рефлектометр РЕФЛЕКС

Система формирования пучка	Суперзеркальный ($m=1.2$) нейтроновод, длина 27 м, поперечное сечение пучка $10 \times 80 \text{ мм}^2$
Диапазон длин волн, Å	1.4 – 10
Диапазон по Q, Å^{-1}	0.001 – 0.13
Поток нейтронов на образце, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$	10^5
Разрешение по Q, %	3 – 10
Макс. длина пролетной базы (расстояние замедлитель-детектор), м	43
Расстояние образец-детектор, м	2 - 4

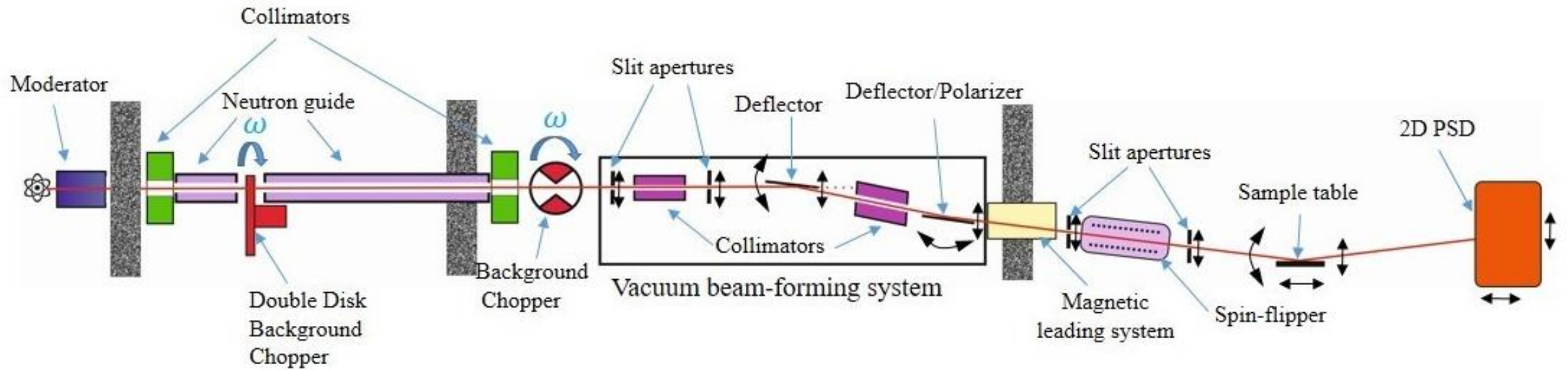


REFLEX



Минимальные размеры образца	$20 \times 20 \text{ мм}^2$
Магнитное поле на образце, Т	< 0.4
Спин-флипперы	2 радиочастотных адиабатических спин-флиппера
Поляризатор	V форма, Fe/Si
Анализатор	FeCo/TiZr суперзеркало ($m=2$)
Детекторы	D ПЧД $200 \times 200 \text{ мм}^2$, He^3 ; 2 счетчика He^3

Рефлектометр ГРЭЙНС



Neutron flux at the sample	$2 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
Wavelength range	0.05 – 1 nm
Angle range	2 – 20 mrad
Q-range	0.05 – 3 nm^{-1}
Q-resolution	< 5%

Рефлектометры на реакторе ИБР-2

Instrument	Geometry	Polarization	Flux at the sample position	Q-range	λ – range, Å
REMUR	Vertical	Yes	$3 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$10^{-3} - 2 \text{ nm}^{-1}$	$0.9 \div 15$ (23.5)
REFLEX	Vertical	Yes	$1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$0.01 - 1.3 \text{ nm}^{-1}$	$1.4 \div 10$
GRAINS	Horizontal	No(Yes)	$2 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$0.05 - 3 \text{ nm}^{-1}$	$0.5 \div 10$

Реактор НЕПТУН

	Neptun	SNS	ESS
Time-average flux density, n/cm ² /s	$5 \cdot 10^{14}$	$0.1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$
Half-width of fast neutrons	200 μ s	(20÷50) μ s	2860 μ s
Pulse repetition rate	10 Hz	60 Hz	14 Hz
Background power	3.2 %	<1%	<1%
Number of beam ports	20-32	22	42

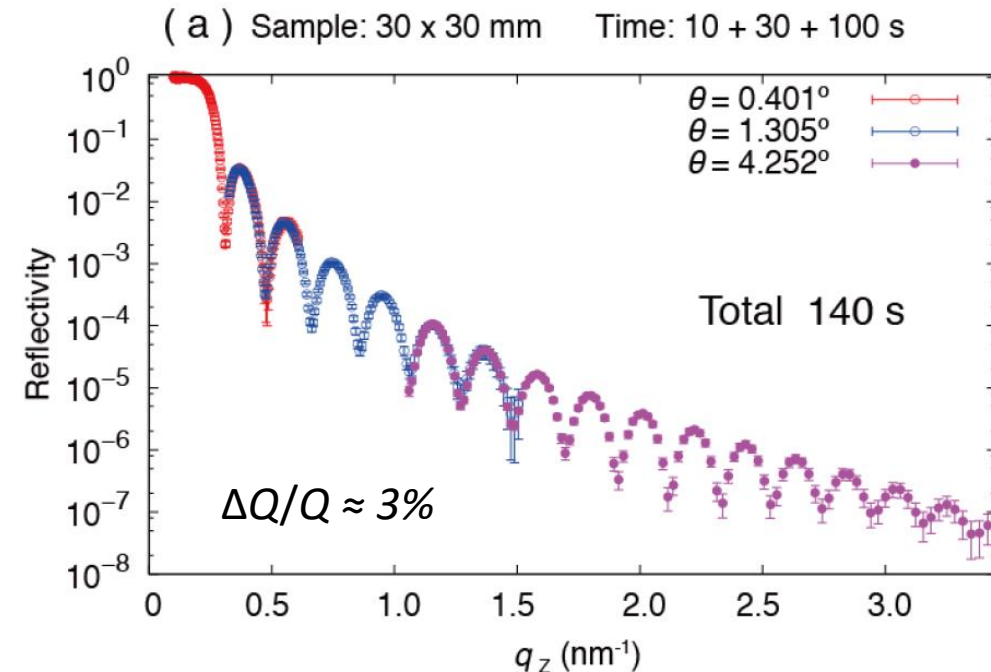
Возможности реактора НЕПТУН для рефлектометрии и чего нет на ИБР

Ключевая характеристика реактора НЕПТУН – рекордно высокий поток по сравнению с другими источниками:

$$\Phi_0 \approx 5 \cdot 10^{14} \frac{\text{H}}{\text{cm}^2 \cdot \text{c}}$$

Что это даёт для нейтронной рефлектометрии:

1. Получение коэффициентов отражения до $10^{-9} \div 10^{-10}$ в большом диапазоне $q_z = 10^{-4} \div 8 \text{ \AA}^{-1}$
2. Развитие методик GIND / GISANS / OSR
3. Измерения real-time / in-situ / in-operando с секундным разрешением
4. Измерения с разрешением $\Delta Q/Q \sim 10^{-3}$
5. Получение спектров вторичного излучения от элементов с $\sigma_{min} < 0.3$ барн для слоя 5 нм
6. Использование микропучков из торца волновода
7. Сканирование микропучком поверхности образца



Reflectivity from SHARAKU reflectometer at J-PARC

Рефлектометры на импульсных источниках

№	Instrumental	Facility	Geometry	Polarization	Moderator
1	ESTIA	ESS	Vertical	Yes	supercritical hydrogen at 17 K
2	FREIA	ESS	Horizontal	No	supercritical hydrogen at 17 K
3	Multipurpose reflectometer	CSNS	Vertical	Yes	C, L H 2 (20 K)
4	Liquid reflectometer	CSNS	Horizontal	No	C, L H 2 (20 K)
5	SHARAKU	J-PARC	Vertical	Yes	Coupled moderator
6	SOFIA	J-PARC	Horizontal	No	Coupled moderator
7	Magnetism reflectometer	SNS	Vertical	Yes	Coupled supercritical hydrogen
8	Liquids reflectometer	SNS	Horizontal	No	Coupled supercritical H2
9	ASTERIX	LANSCCE	Vertical	Yes	Lower-tier coupled liquid-hydrogen moderator
10	PolRef	ISIS – Target 2	Horizontal	Yes	Coupled grooved cold H2/CH4
11	OffSpec	ISIS – Target 2	Horizontal	Yes	Coupled Grooved H2/CH4
12	Inter	ISIS – Target 2	Horizontal	No	Coupled grooved cold H2/CH4
13	CRISP	ISIS – Target 1	Horizontal	Yes	25 K liquid hydrogen (lower) moderator.
14	SURF	ISIS – Target 1	Horizontal	No	25 K liquid hydrogen (lower) moderator.
15	REMUR	IBR-2	Vertical	Yes	Water / cold moderator
16	REFLEX	IBR-2	Vertical	Yes	Water / cold moderator
17	GRAINS	IBR-2	Horizontal	No	Water / cold moderator

Рефлектометры на реакторе Нептун

№.	Спектрометр	Назначение спектрометра	Замедлитель	Поток, н/с/см ²	Плоскость образца	Разрешение, $\Delta Q/Q$	База	Диапазон длин волн
1	Высокопоточный рефлектометр стандартного типа с регистрацией вторичного излучения	Низкофоновый, широкодиапазонный, светосильный рефлектометр с фокусировкой (?) Магнитная структура бислоёв и мультиструктур; Магнитная и ядерная структура поверхности и тонких магнитных слоёв	Биспектральный 20 К / 300 К	10^8	V	$10^{-2} \div 10^{-1}$	30 м	1÷13.2 Å (1÷26.4 Å)
2	Рефлектометр для исследования жидкости	Свободная поверхность жидкостей, магнитные жидкости, биологические системы, полимерные плёнки	Биспектральный 20 К / 300 К	10^8	H	$10^{-2} \div 10^{-1}$	30 м	1÷13.2 Å (1÷26.4 Å)
3	Рефлектометр с использованием ларморовской прецессии	Диффузия и колебания макромолекул и кластеров на поверхности и в слоях структуры	Биспектральный 20 К / 300 К	10^7	H	$10^{-1} \div 0.5$	30 м	1÷13.2 Å (1÷26.4 Å)
4	Рефлектометр высокого разрешения	Магнитная и ядерная структура единичной границы раздела слоистой структуры; GISANS	Биспектральный 20 К / 300 К	$10^2 \div 10^3$	V	10^{-3}	100 м	1÷4.0 Å (1÷7.9 Å)

Частота повторения импульсов в нейтронной рефлектометрии

$$\lambda_{max} = \frac{\Delta\tau[\text{мкс}]}{252.7 \cdot L[\text{м}]}$$

$$f = 10 \text{ Гц}$$
$$L = 30 \text{ м}$$

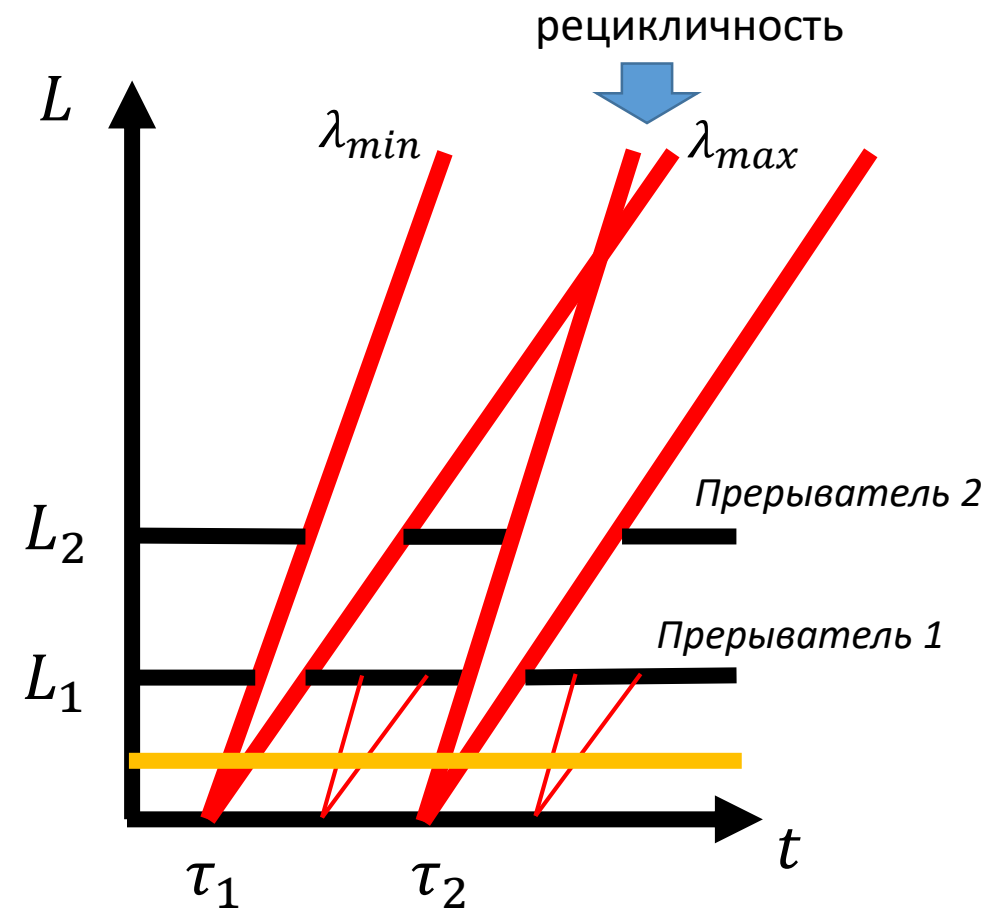


$$\lambda_{max} = 13.2 \text{ \AA}$$

$$f = 2 \text{ Гц}$$
$$L = 30 \text{ м}$$



$$\lambda_{max} = 66 \text{ \AA}$$



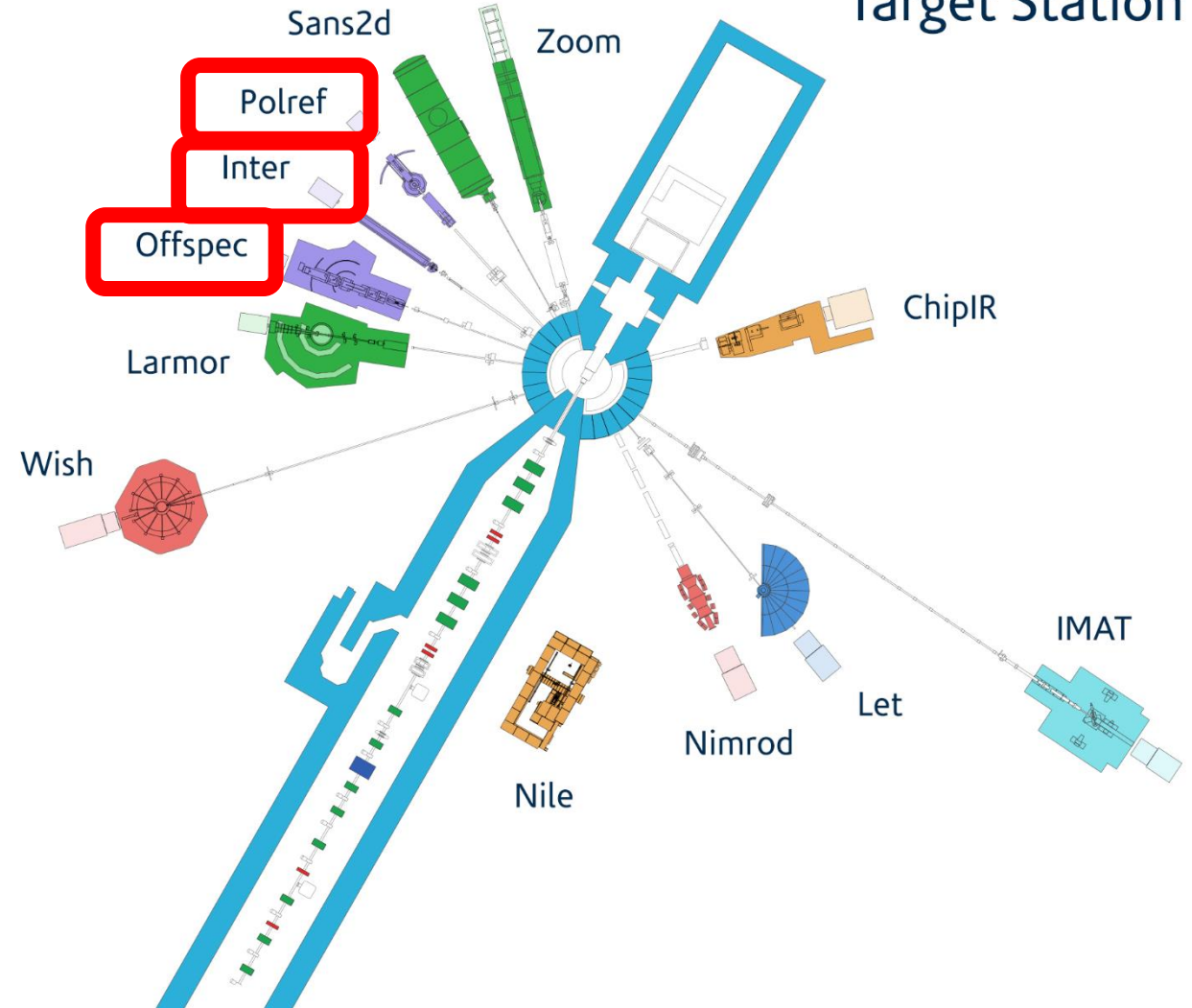
Для нейтронной рефлектометрии при одном и том же среднем потоке лучше иметь меньшую частоту повторения импульсов

Расположение рефлектометров на ISIS

Target Station 1



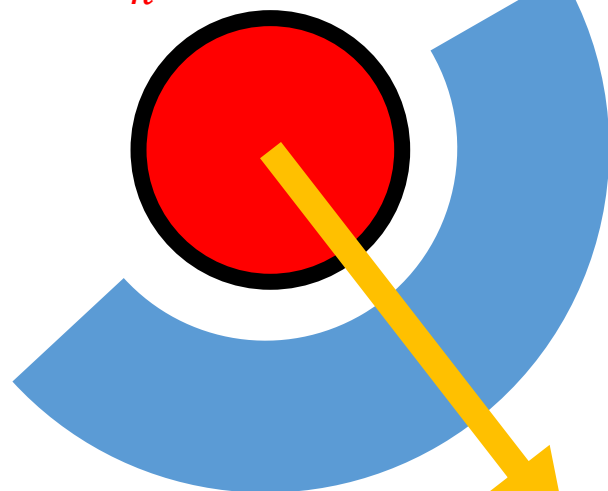
Target Station 2



Замедлители нейтронов на рефлектометре РЕМУР

ИСТОЧНИК

$E_n > 0.1$ МэВ

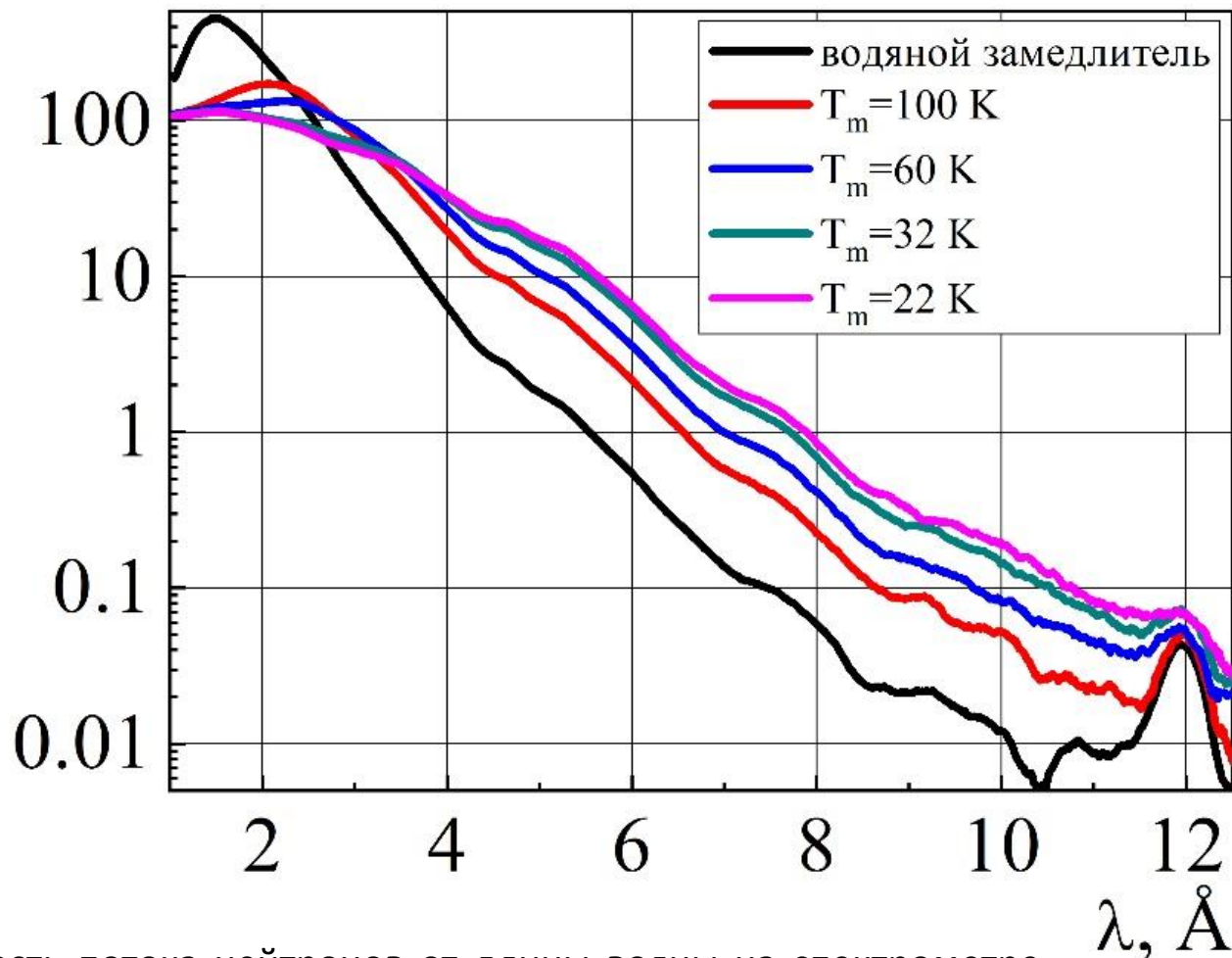


$E_n \sim 25$ мэВ

замедлитель

n

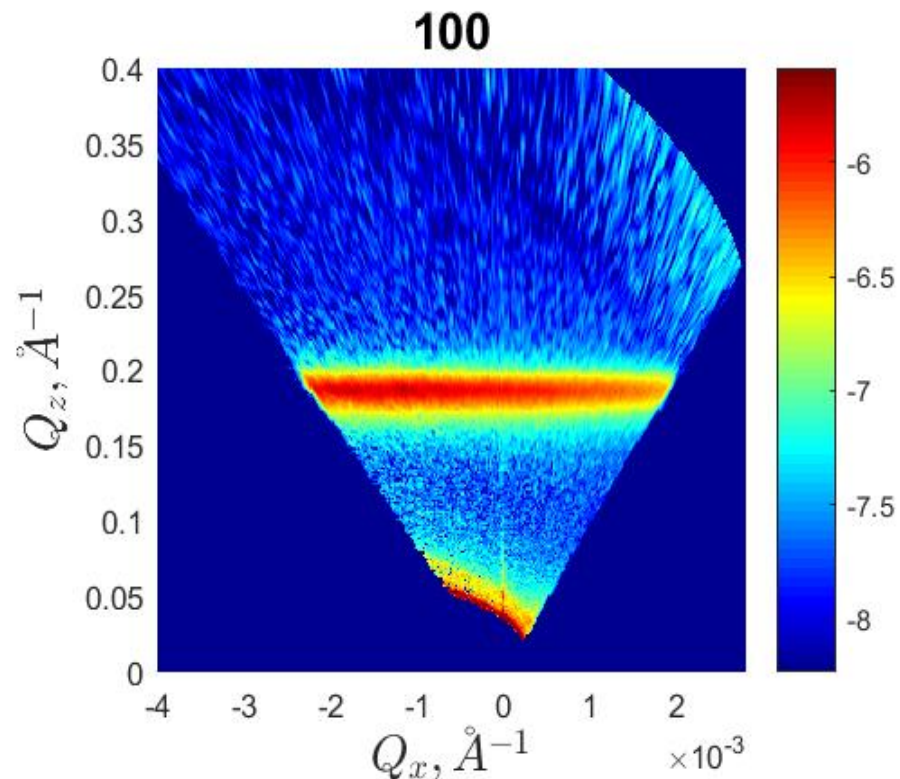
$n / (c \cdot cm^2 \cdot \text{Å})$



Зависимость потока нейтронов от длины волны на спектрометре РЕМУР при различных температурах криогенного замедлителя.

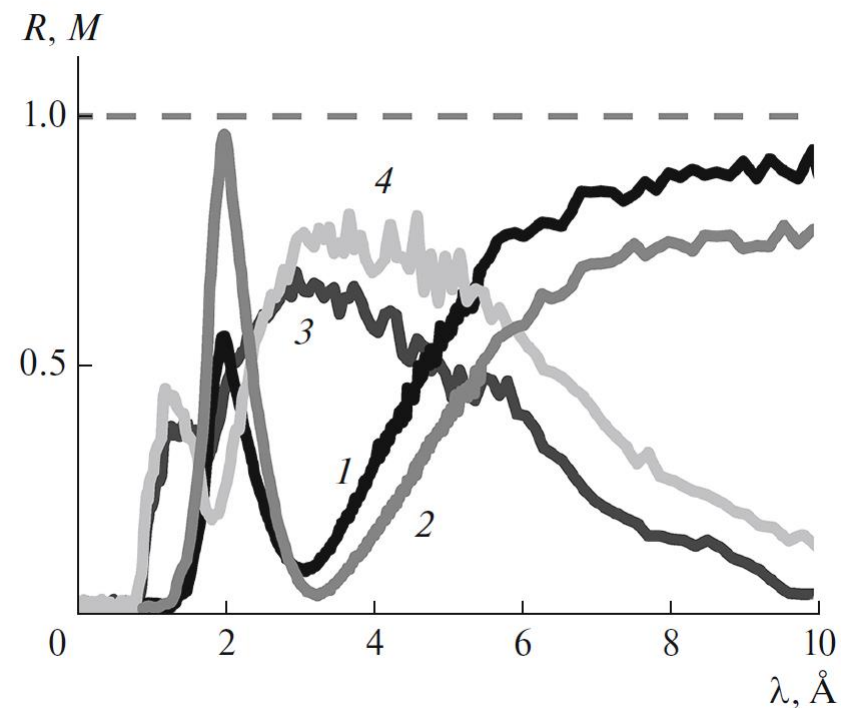
Эффекты наблюдаемые в различных диапазонах длин волн

Регистрация сигнала от магнитного геликоида в структуре Dy (2000 \AA)



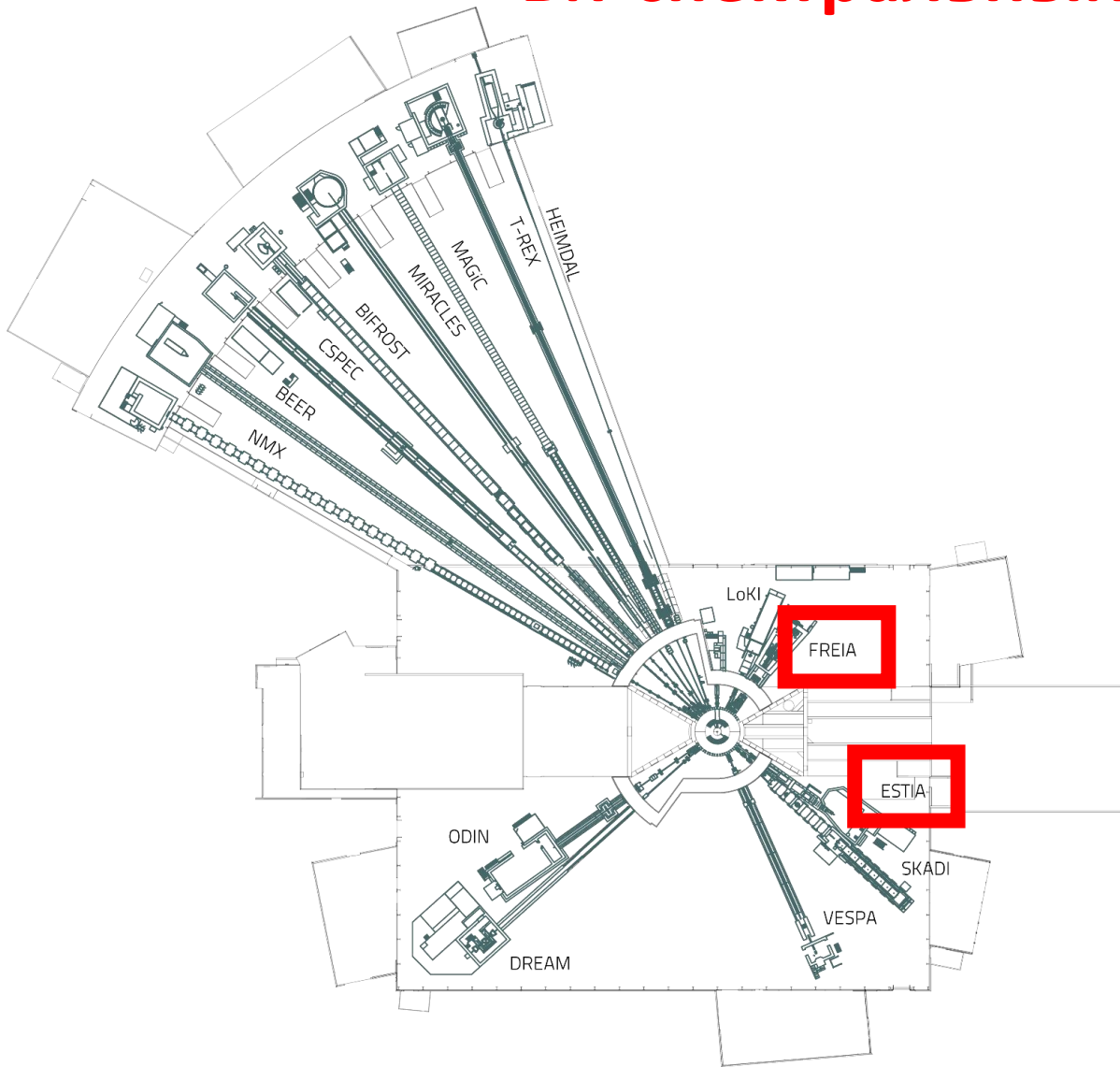
$d_{he} \sim 30 \text{ \AA}$ $\theta \sim 20 \text{ mrad}$ $\lambda \sim 1.2 \text{ \AA}$

Регистрация гамма-сигнала от структуры со слоем гадолиния $d(\text{Gd})=5 \text{ нм}$

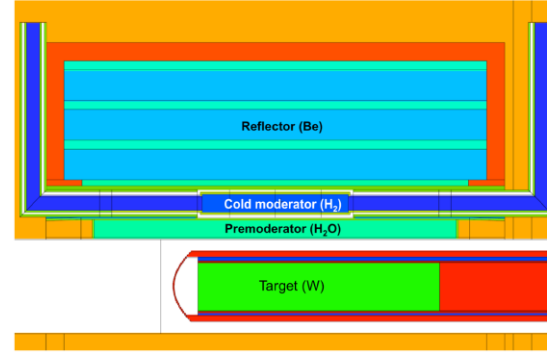


$\lambda \sim 2 \div 10 \text{ \AA}$

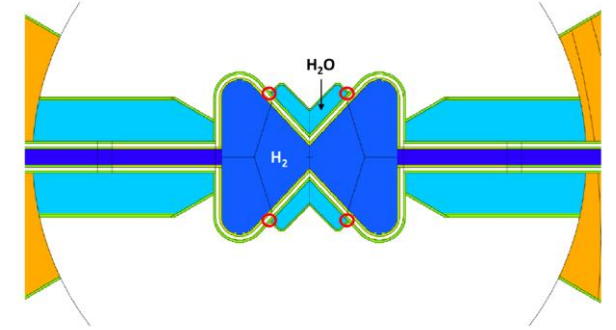
Би-спектральный замедлитель на ESS



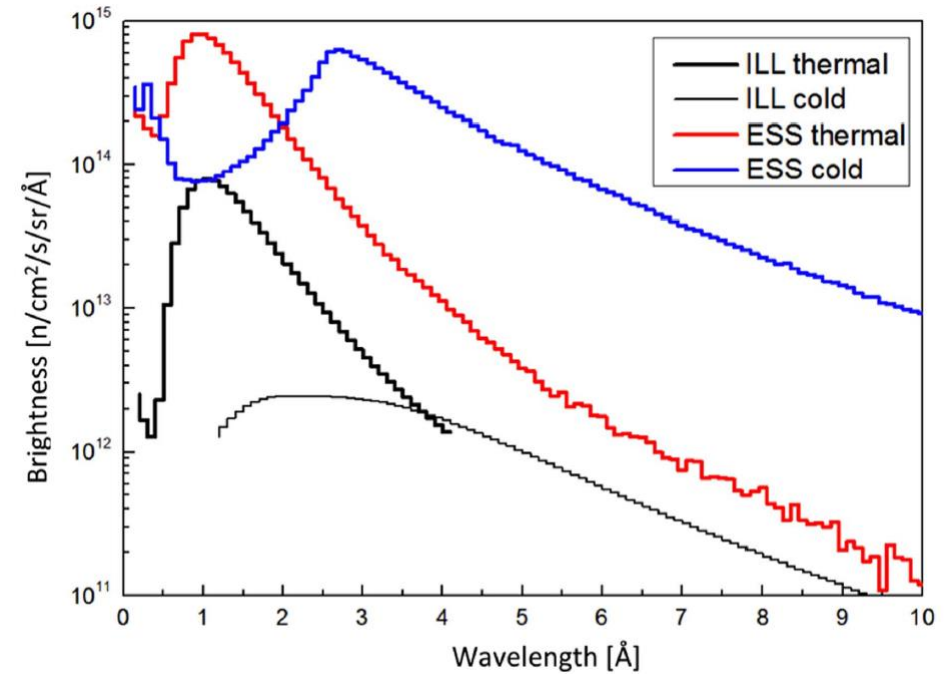
Side view to moderator



Top view to moderator

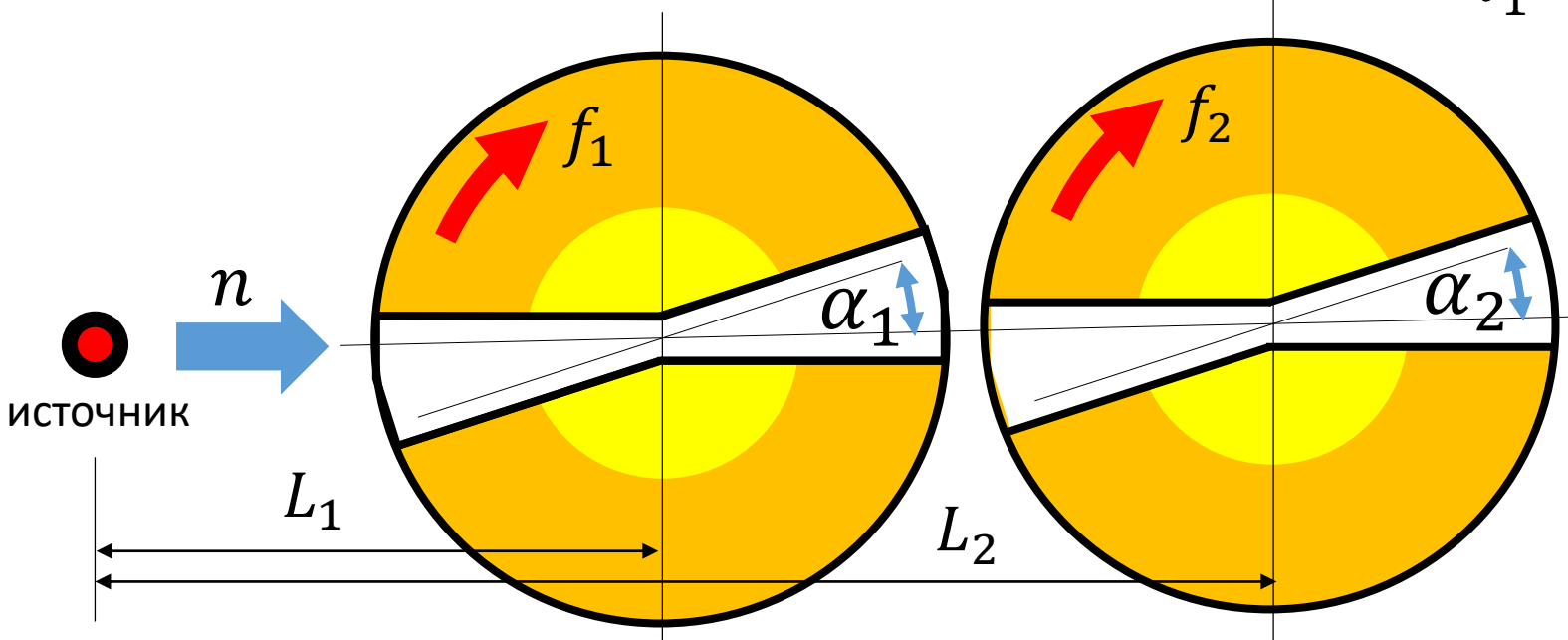
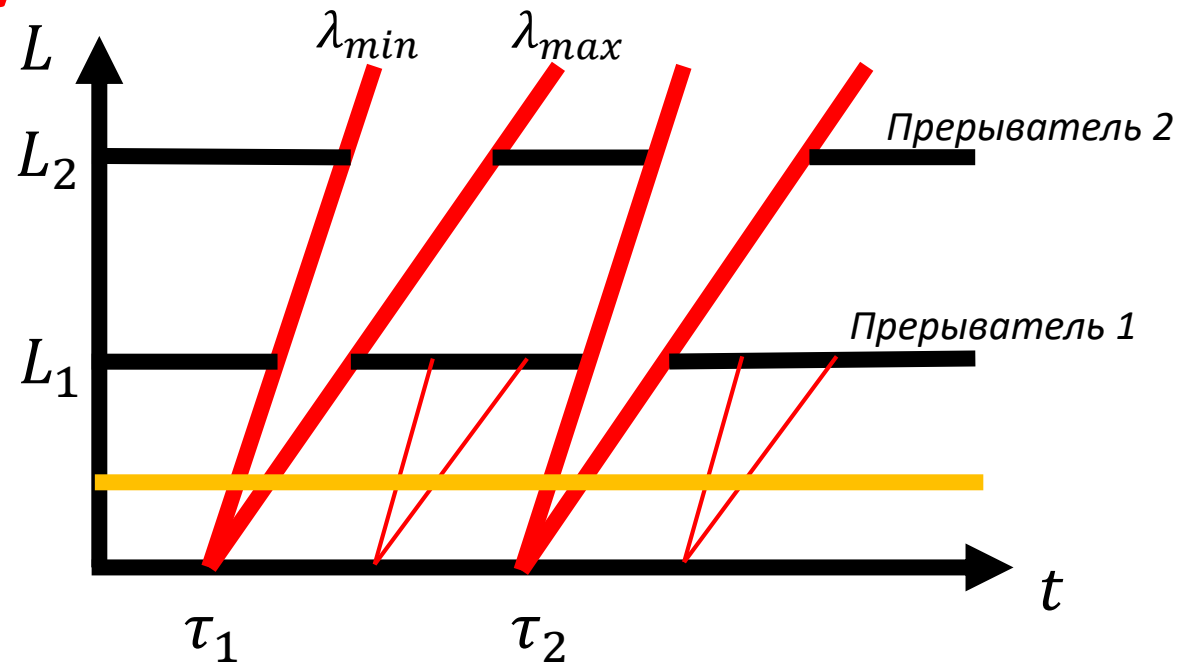
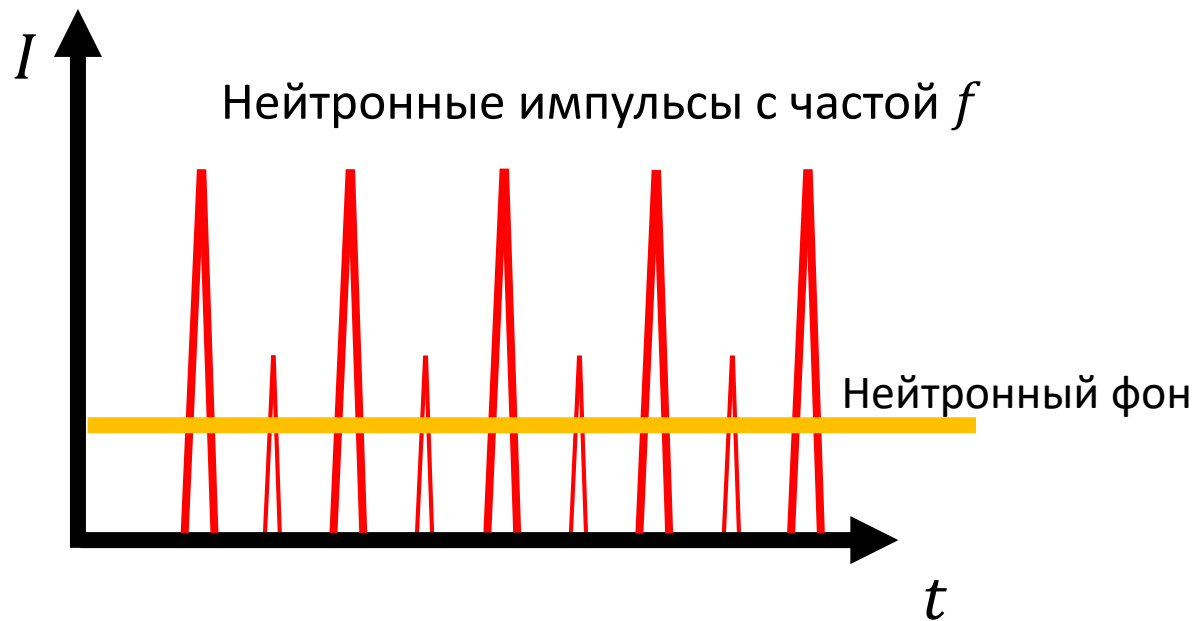


L. Zanini et al. The neutron moderators for the European Spallation Source // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1021 (2018) 012066



Roland Garoby et al. The ESS Design // Phys. Scr. 93 (2018) 014001

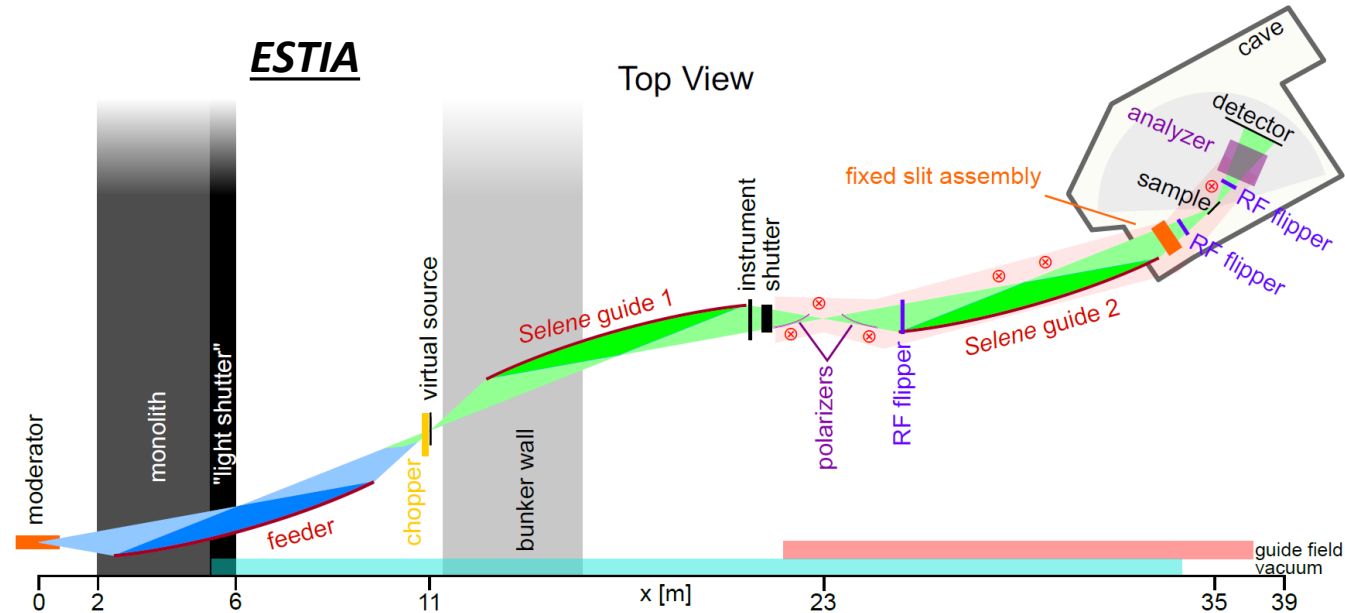
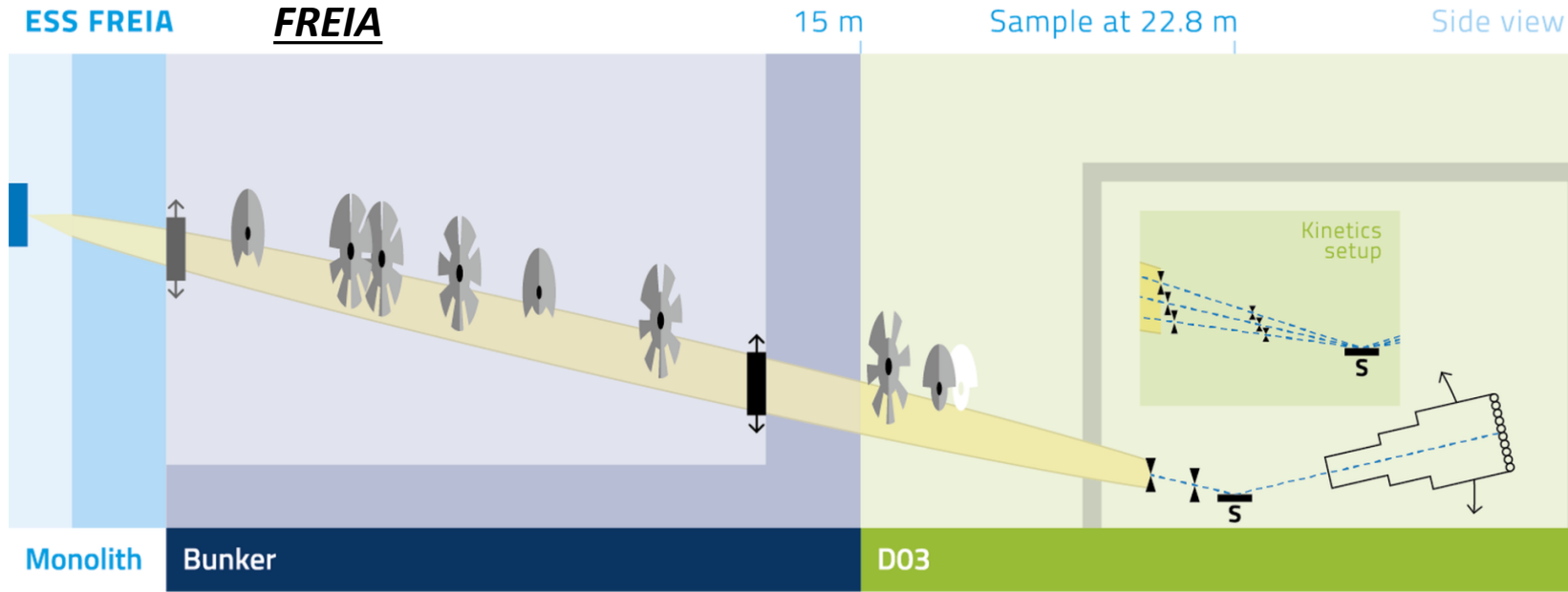
Прерыватели на импульсном источнике



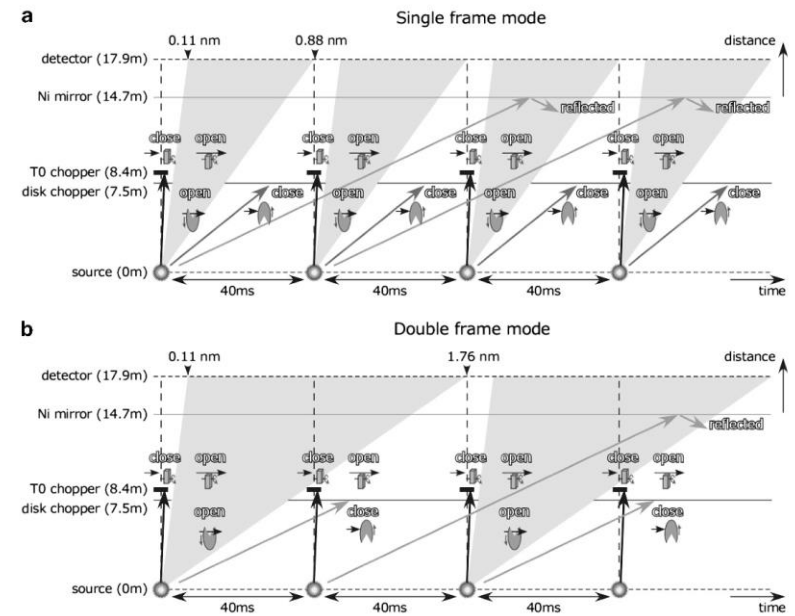
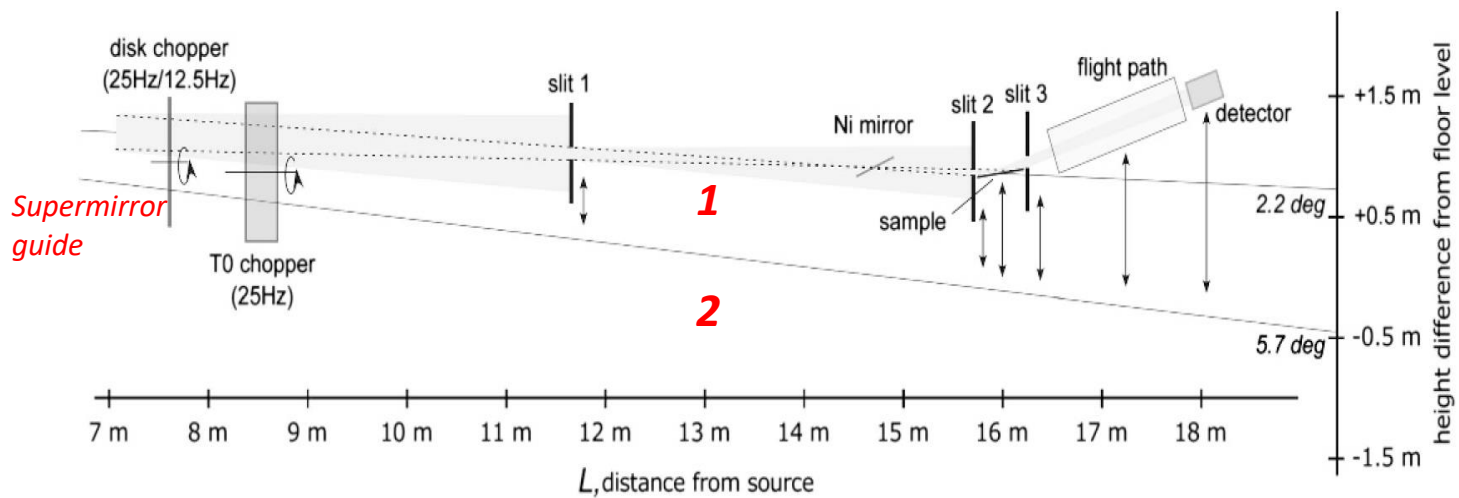
$$T[\text{мкс}] = 252.7 \cdot L[\text{м}] \cdot \lambda[\text{\AA}]$$

$$\alpha[\text{град}] = q[\text{град/мс}] \cdot T[\text{мс}]$$

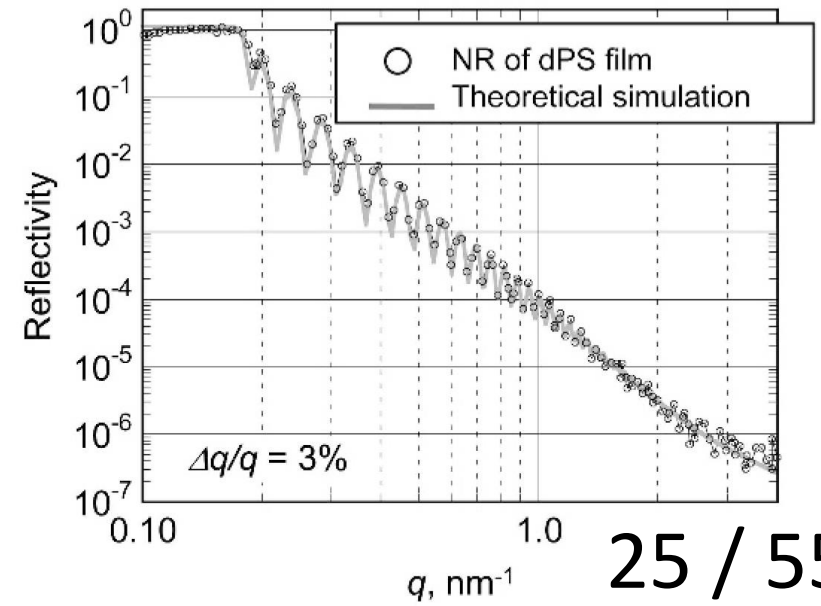
Прерыватели на рефлектометрах ESTIA и FREIA (ESS)



Прерыватели на рефлектометре SOFIA (J-PARC)



Moderator	Coupled hydrogen moderator
Incident neutron energy or wavelength	0.2 nm <math>< \lambda < 0.88</math> nm (single frame mode) 0.25 nm <math>< \lambda < 1.76</math> nm (double frame mode)
Scattering angle	$\Theta < 4</math> deg.$
Optics	double slit optics or focusing mirror optics
Observable reflectivity	$R > 10^{-7}$ (strongly depends)
Accumulation time	$Q < 1</math> nm-1, R < 10^{-4}: 1 minutesQ < 2</math> nm-1, R < 10^{-7}: 30 minutes$
Detector	2-dimensional scintillation counter (off-specular reflectivity measurement is available)
Sample environment	High-temperature cell (RT-250°C) Low temperature cell (0°C-100°C) Langmuir trough et al.

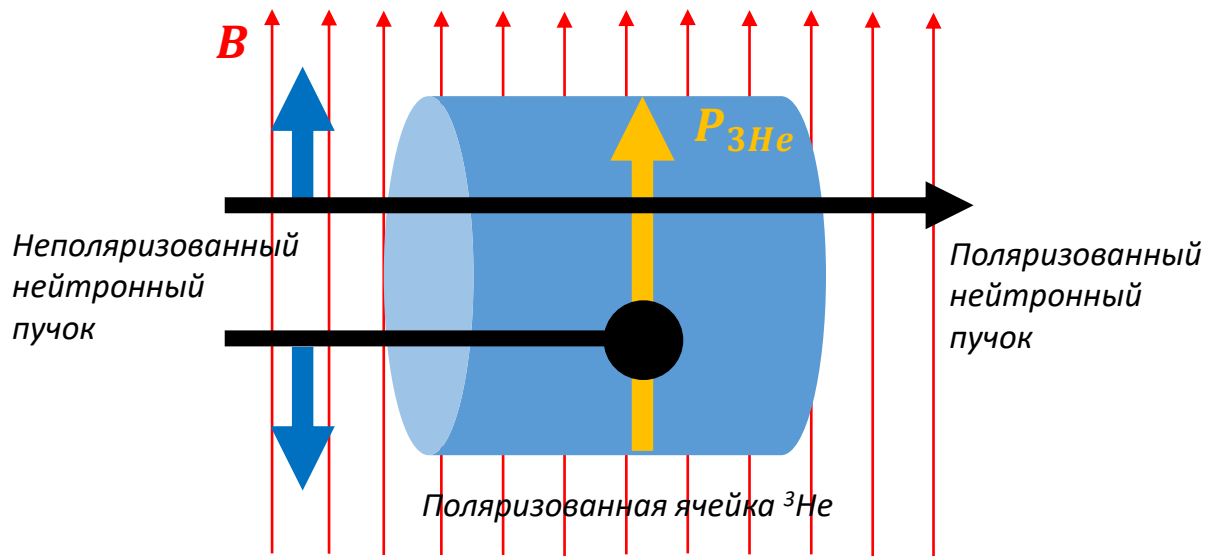


Поляризаторы

Есть 4 способа поляризовать тепловые нейтроны:

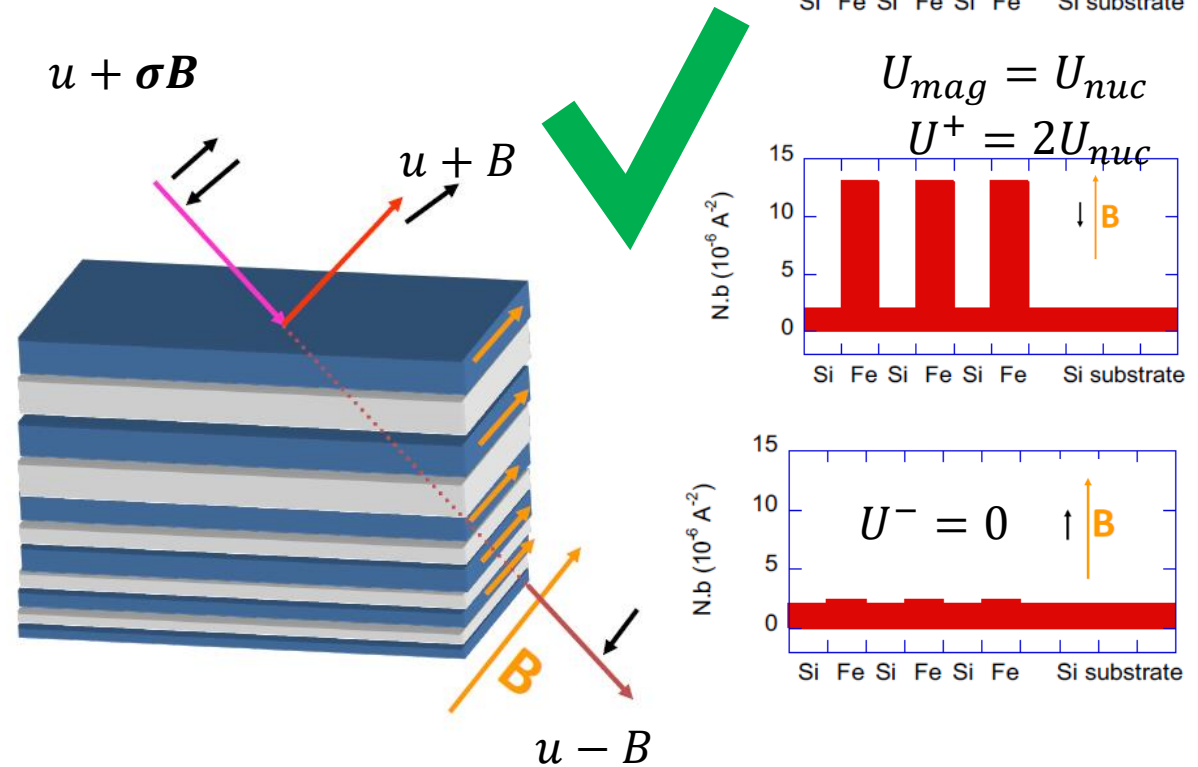
- Пропускание через поляризованный газ ^3He
- Пропускание и отражение от намагниченных зеркал
- Пропускание через намагниченные плёнки
- Дифракция от кристалла

$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$



$$\sigma_{\uparrow\uparrow} = 0 \quad \sigma_{\uparrow\downarrow} = 6000 \text{ барн}$$

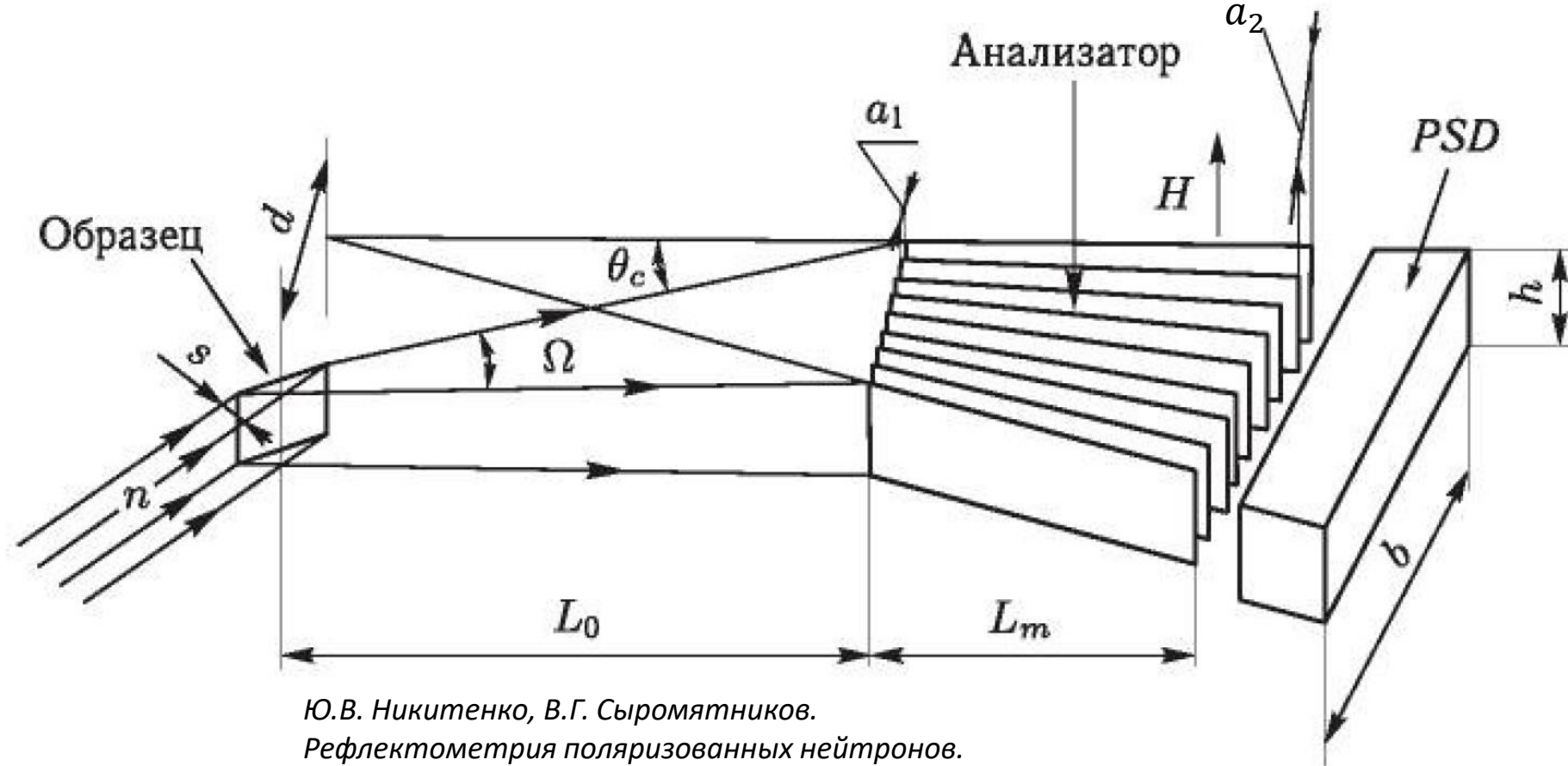
Метод позволяет получить широкие пучки, но при этом высокие потери интенсивности, поляризация составляет около 80%



Высокая степень поляризации $P \sim 99\%$, работает при малых углах падения

Веерный анализатор поляризации

Принцип действия анализаторов – такой же, как у поляризаторов. Анализатор – это фильтр, который в случае пленок или зеркал пропускает только нейтроны, поляризованные против поля, или отражает в основном нейтроны, поляризованные по полю, а в случае гелиевого анализатора пропускает только нейтроны, поляризованные параллельно поляризации ядер гелия.



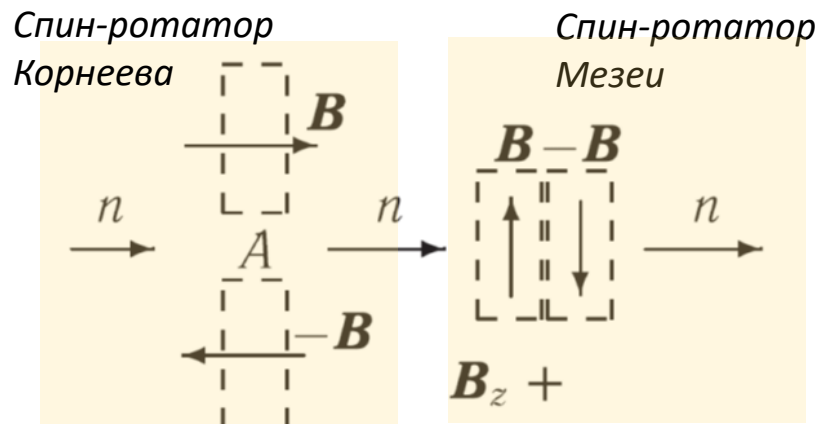
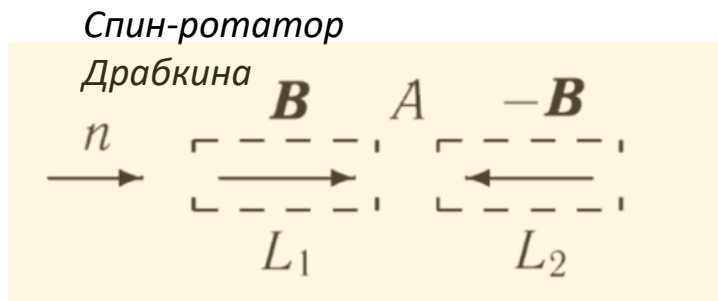
Конструкция анализатора может значительно отличаться от конструкции поляризатора в случае необходимости регистрации диффузно рассеянных нейтронов. Таким примером является веерный анализатор поляризации.

Спин-флипперы

Повернуть спин можно двумя способами:

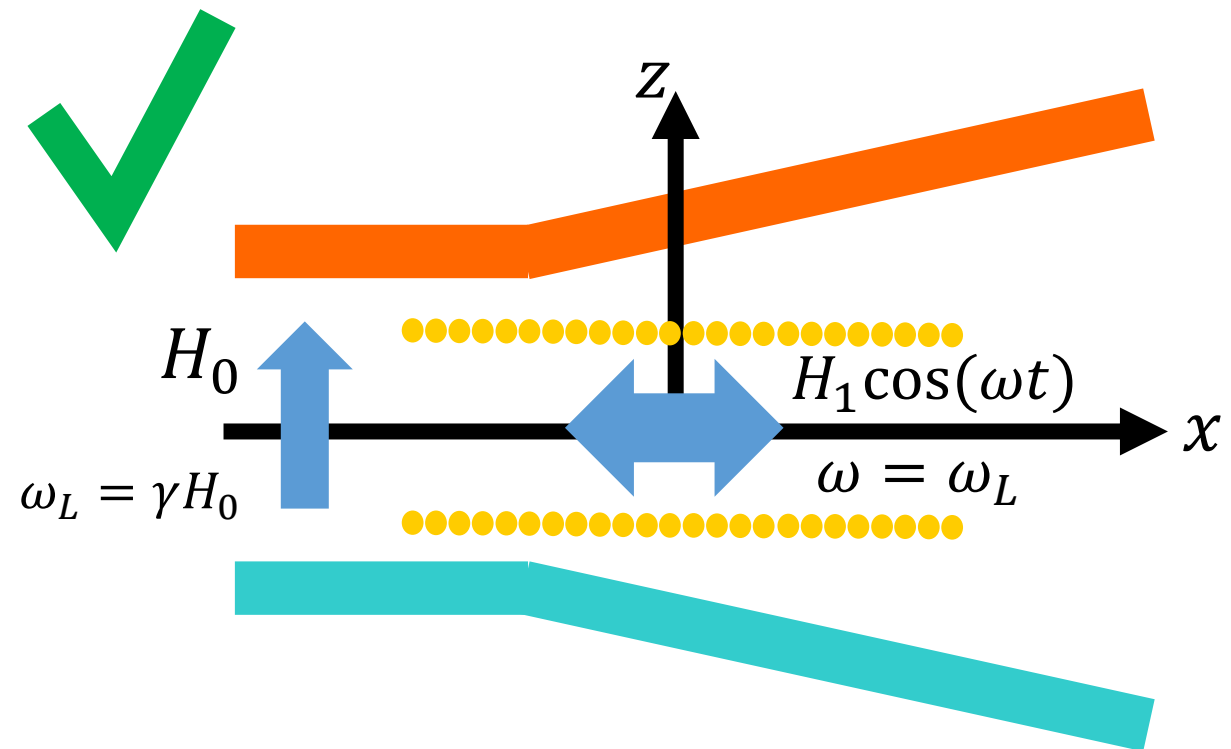
- постоянным во времени, но быстро меняющемся в пространстве магнитным полем
- комбинацией постоянного и радиочастотного полей

1. Метод токовой фольги;
2. Метод нулевого поля (флипперы Драбкина и Корнеева)
3. Спин-ротатор Мезеи



В.К. Игнатович. Нейтронная оптика

Спин нейтрона может быть повернут с помощью слабого радиочастотного поля (метод спинового резонанса), под действием которого спин нейтрона переворачивается относительно более сильного ведущего поля.

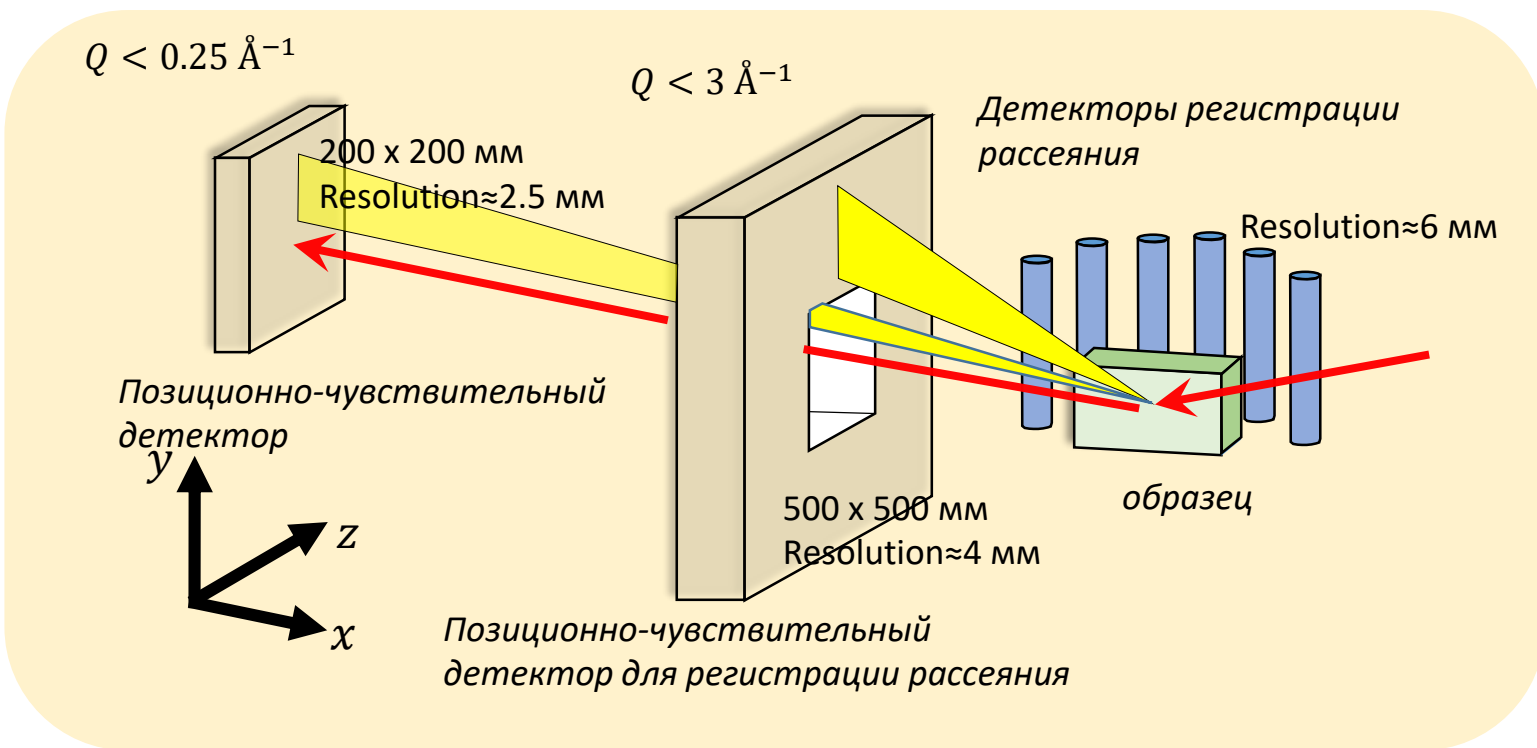


Детекторы нейтронов

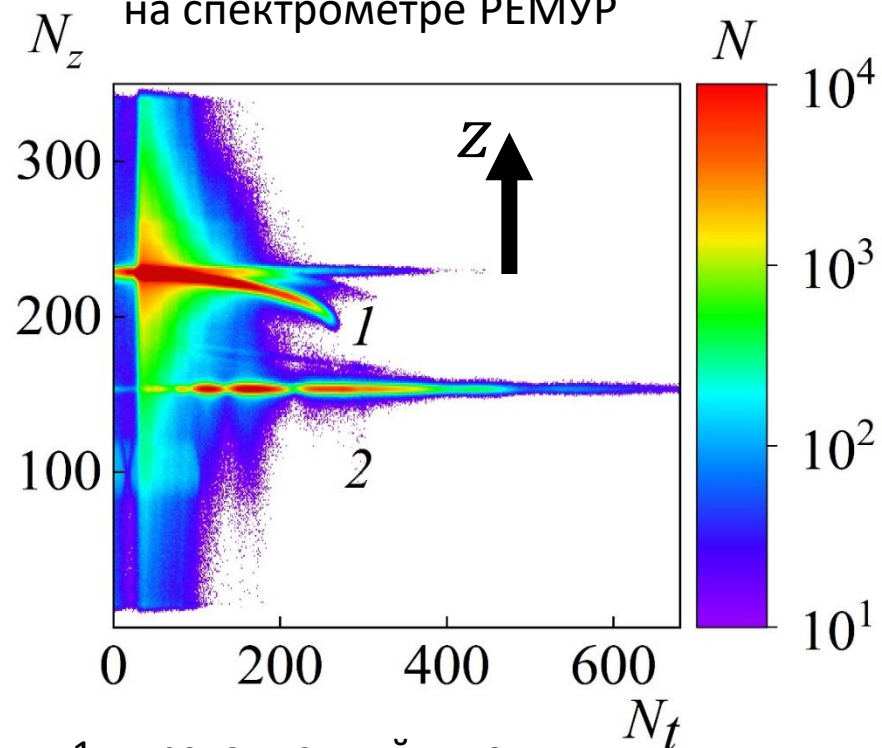
По физическому принципу работы: газовые и сцинтилляционные

По принципу действия: позиционно-чувствительные детекторы (двумерные), линейные (одномерные) и точечные

Разрабатываемая система детекторов на спектрометре РЕМУР

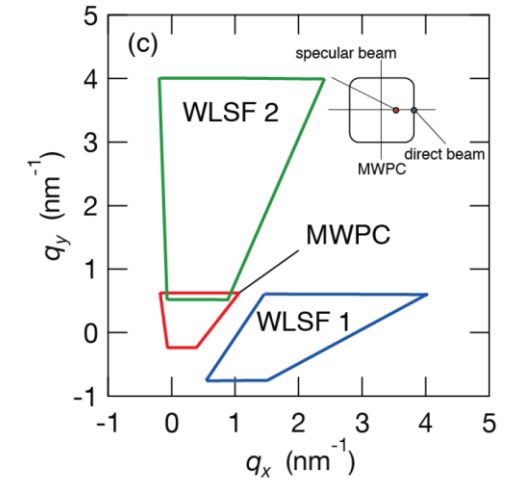
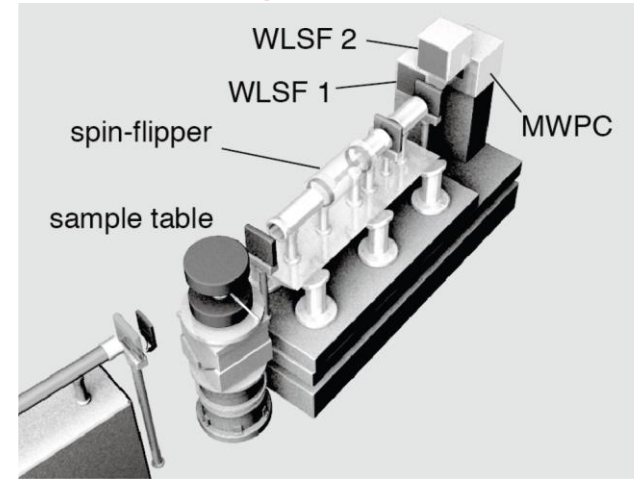
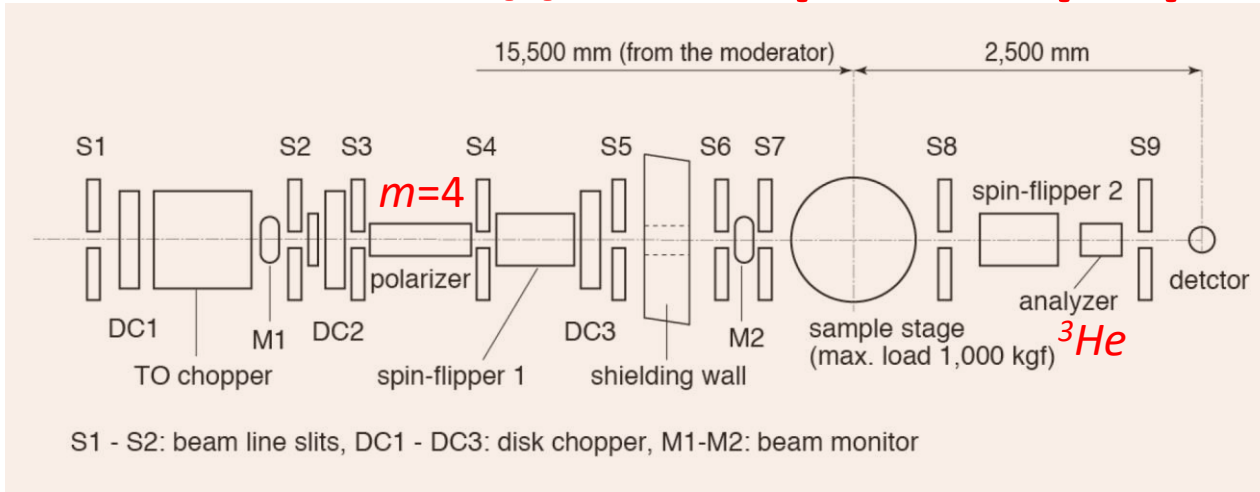


Спектр полученный с помощью ПЧД на спектрометре РЕМУР

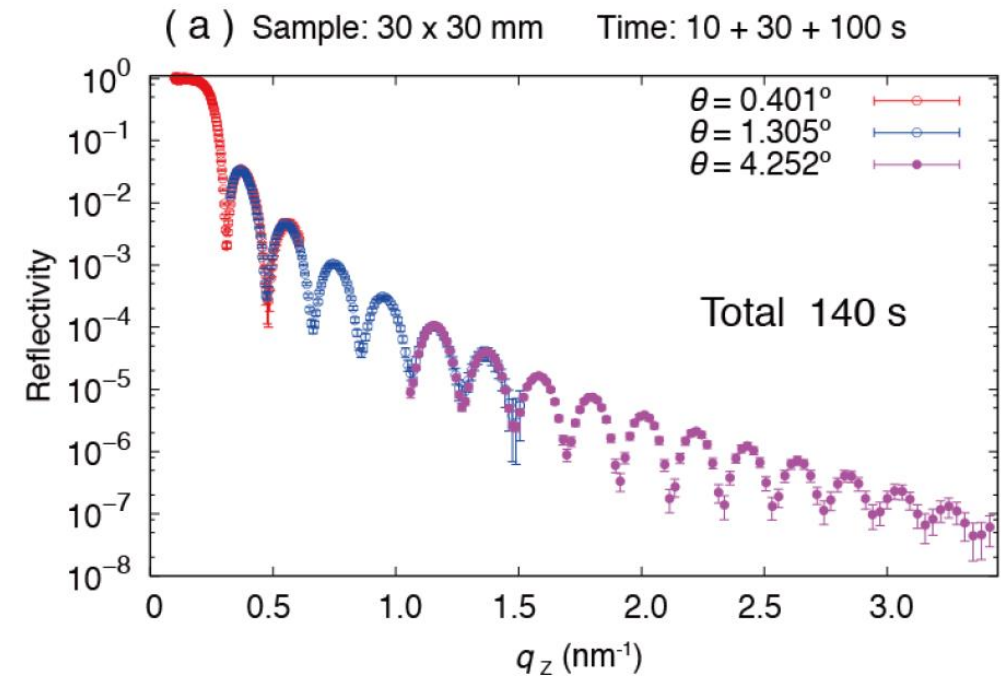


1 – преломленный пучок
2 – отраженный пучок.

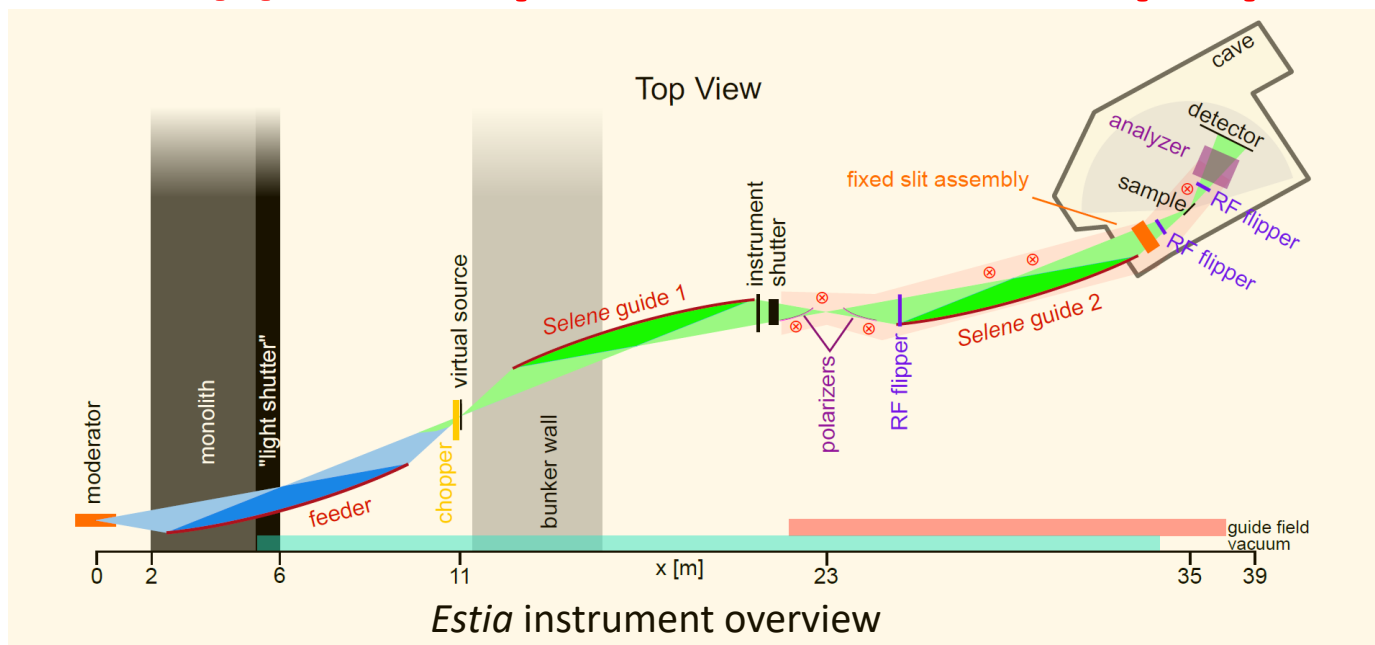
Система детекторов на рефлектометре SHARAKU (J-PARC)



Total flight-path	18 m (moderator-sample 15.5 m, sample-detector 2.5 m)
Moderator	coupled hydrogen moderator
Wavelength band in the first time-of-flight frame	λ_g 0.2-0.84 nm (polarized mode) 0.1-0.88 (unpolarized mode)
q -range	$q = 0.1$ -12 nm ⁻¹ (polarized mode) 0.05 -25 nm ⁻¹ (unpolarized mode)
Scattering-angle range	$2\theta = -5^\circ$ to 20°
Detectors	Zero-dimensional ³ He gas detector Two-dimensional multi-wire proportional counter (sensitive area 128 x 128 mm ²) Two-dimensional scintillator detectors (sensitive area 265 x 256 mm ²)
Spin-flippers	non-adiabatic two-coil spin-flipper (Mezei-flipper for off-specular reflectivity)
Sample surrounding	Electromagnet: 10 kOe with rotating 90° Cryocooler: T=4 K Cryostat: T=50 mK with H=70 kOe

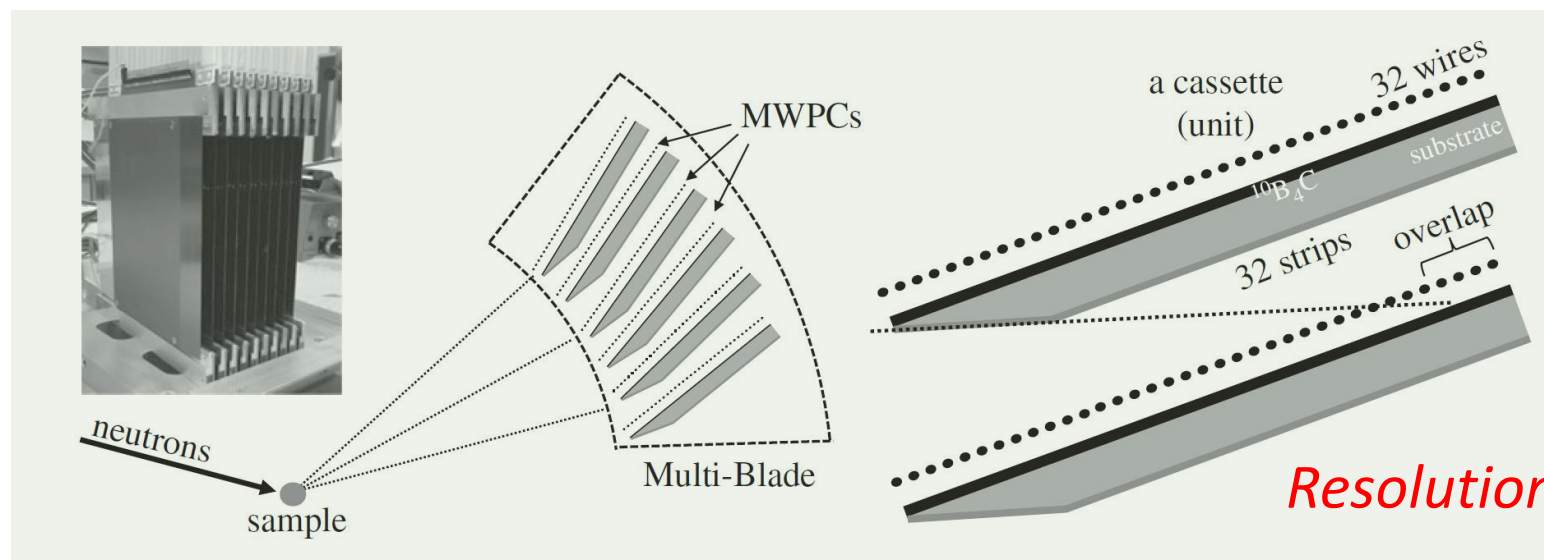


Детекторная система на рефлектометре ESTIA (ESS)



Schematic view of the cross-section of the Multi-Blade detector made up of identical units (cassettes) arranged adjacent to each other.

Mauri G et al. // Proc. R. Soc. A 474: 20180266.



Система 'Multi-Blade' на рефлектометре высокого разрешения ?

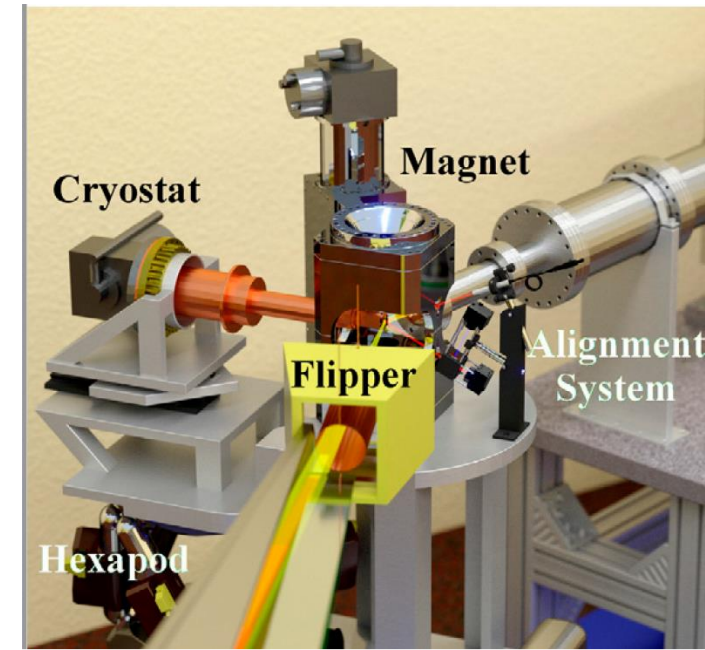
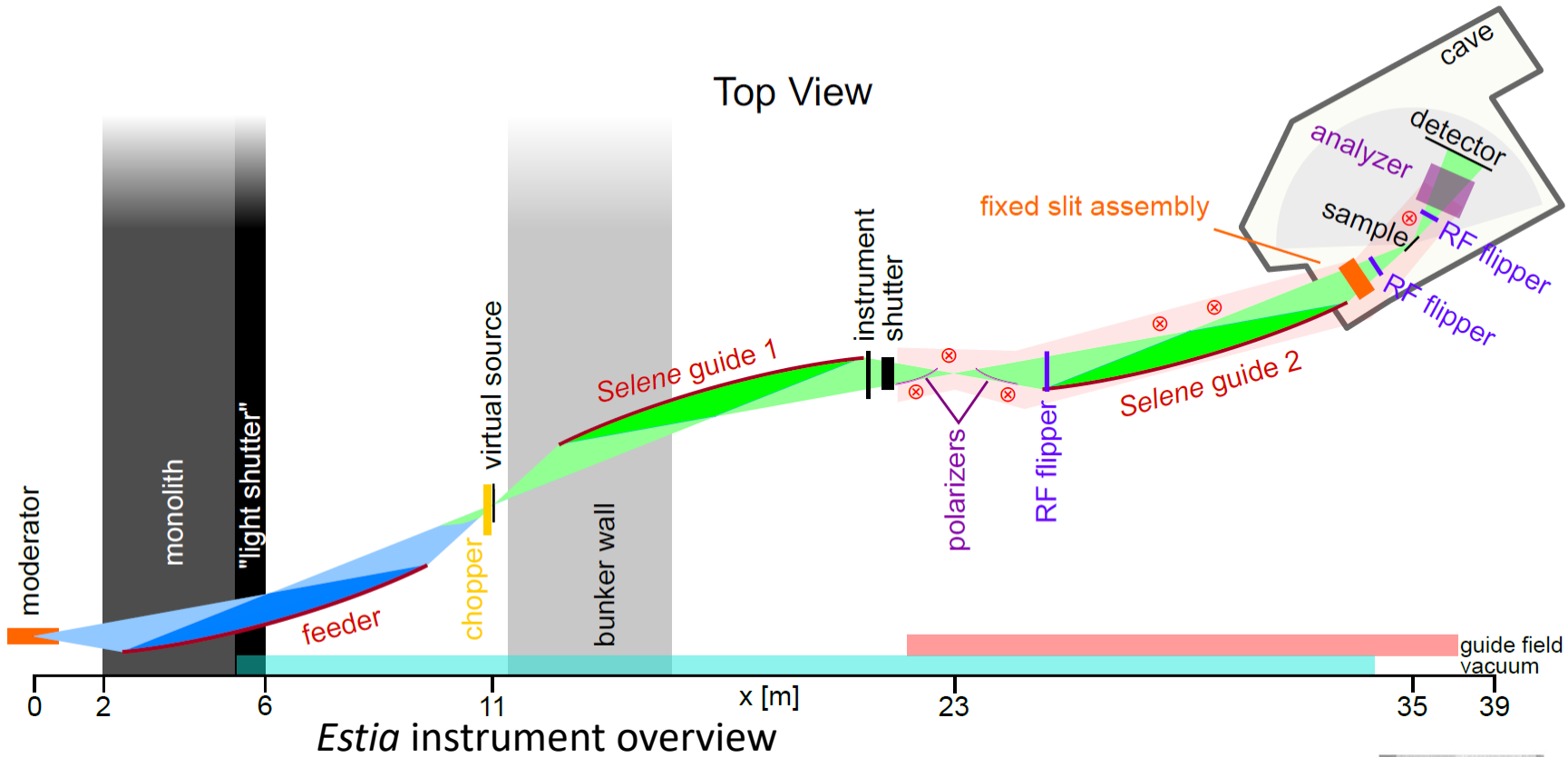
Формирование нейтронного пучка на нейтронном рефлектометре

1. Нейтроновод типа Selene
2. Эллиптический нейтроновод (Estia, ESS)
3. Проект Heritage
4. Формирование пучка на рефлектометре Candor
5. Bender + Straight + Taper
6. Формирование пучка без нейтроновода
7. Ларморовская прецессия

H.J. Lauter et al. Larmor precession reflectometry // Physica B 350 (2004) e759–e762

М.Н. Жерненков и др. // Кристаллография, 2008, том 53, №2, с. 334-341

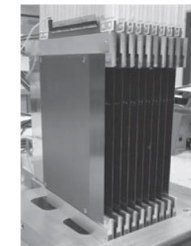
Формирование нейтронного пучка на рефлектометре ESTIA (ESS)



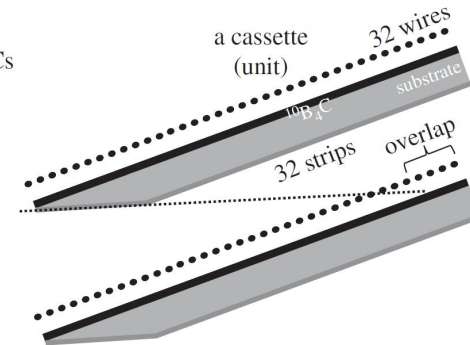
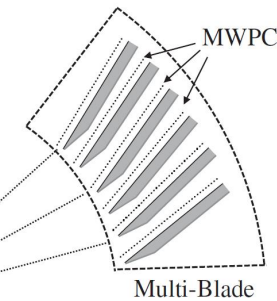
Close up of the area around the sample with a view on the cryostat on top of the hexapod, magnet, spin-flipper and laser alignment system.

Swiss neutron news, Number 48, September 2016

Distance moderator-sample	35 m	Wavelength	Band 6.9 Å between 4 and 25 Å Resolution 0.3 Å
Beam-line	Elliptical feeder guide at 2m Selene guide m=4	Q-range	0.005 Å ⁻¹ – 3.0 Å ⁻¹
Chopper	14 Hz at 10.7 m	Polarization	Supermirror m=4
Slit after chopper	Height up to 20 mm Width 60 μm ÷ 5 mm	Flippers	RF
Distance sample-detector	4 m	Analyzer	Fan
Detector	2D PSD 500 x 250 mm ² Resolution 0.5 x 2 mm Multi-Blade Boron system	Minima sample	1 x 1 mm ²
		Sample environment	TEFI & FLUCO
		Reflectivity	10 ⁻⁷



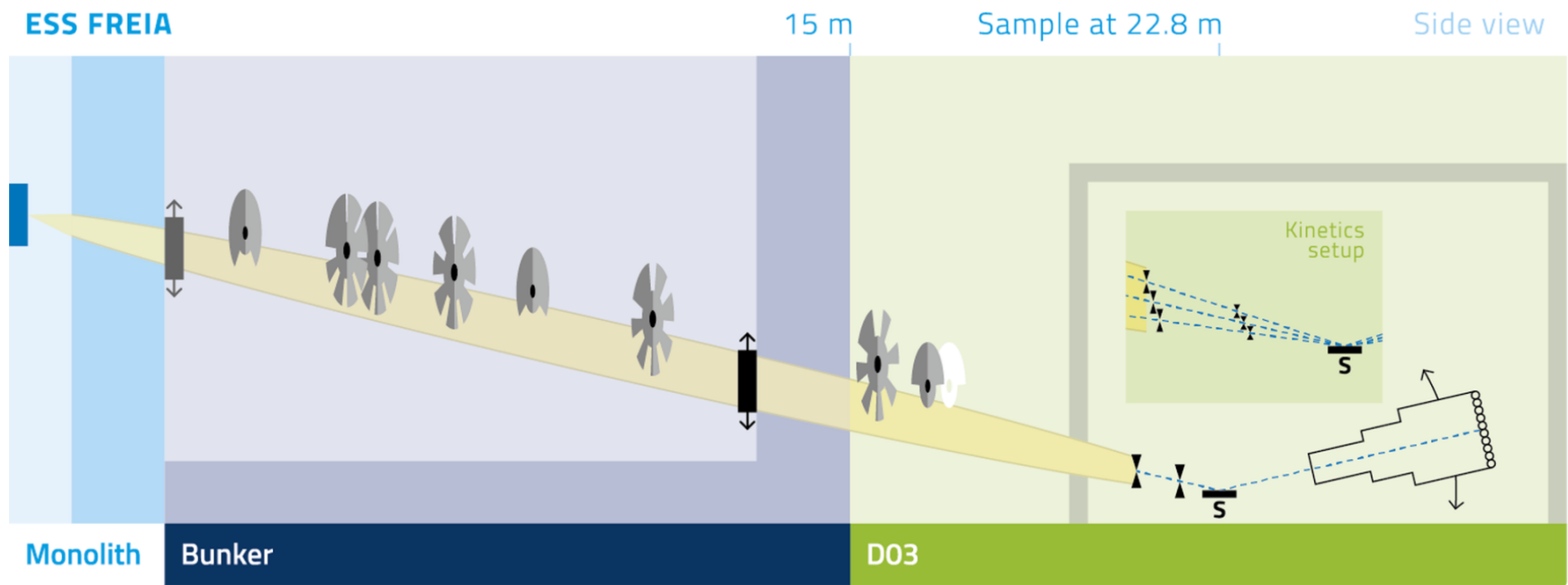
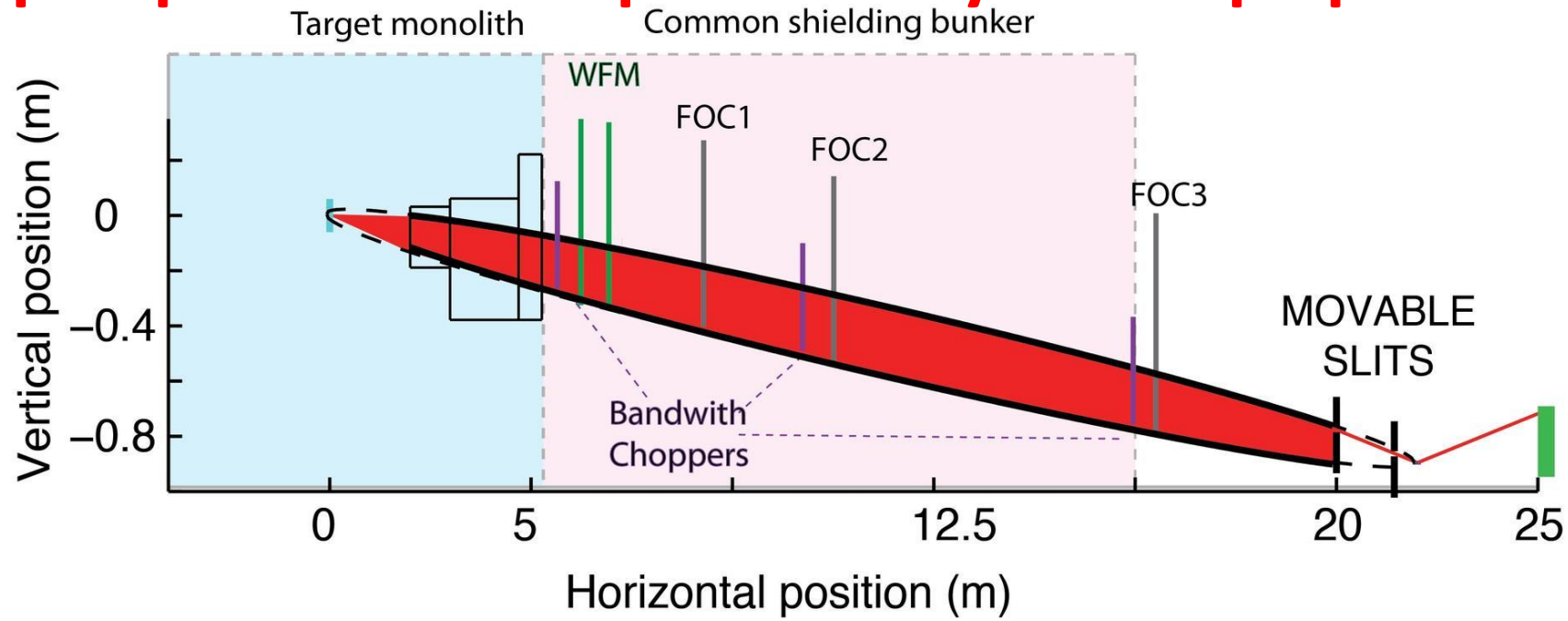
neutrons
sample



Schematic view of the cross-section of the Multi-Blade detector made up of identical units (cassettes) arranged adjacent to each other.

Mauri G et al. // Proc. R. Soc. A 474: 20180266.

Формирование нейтронного пучка на рефлектометре FREIA (ESS)



HERITAGE project for ESS. Focusing neutron guide and GISANS

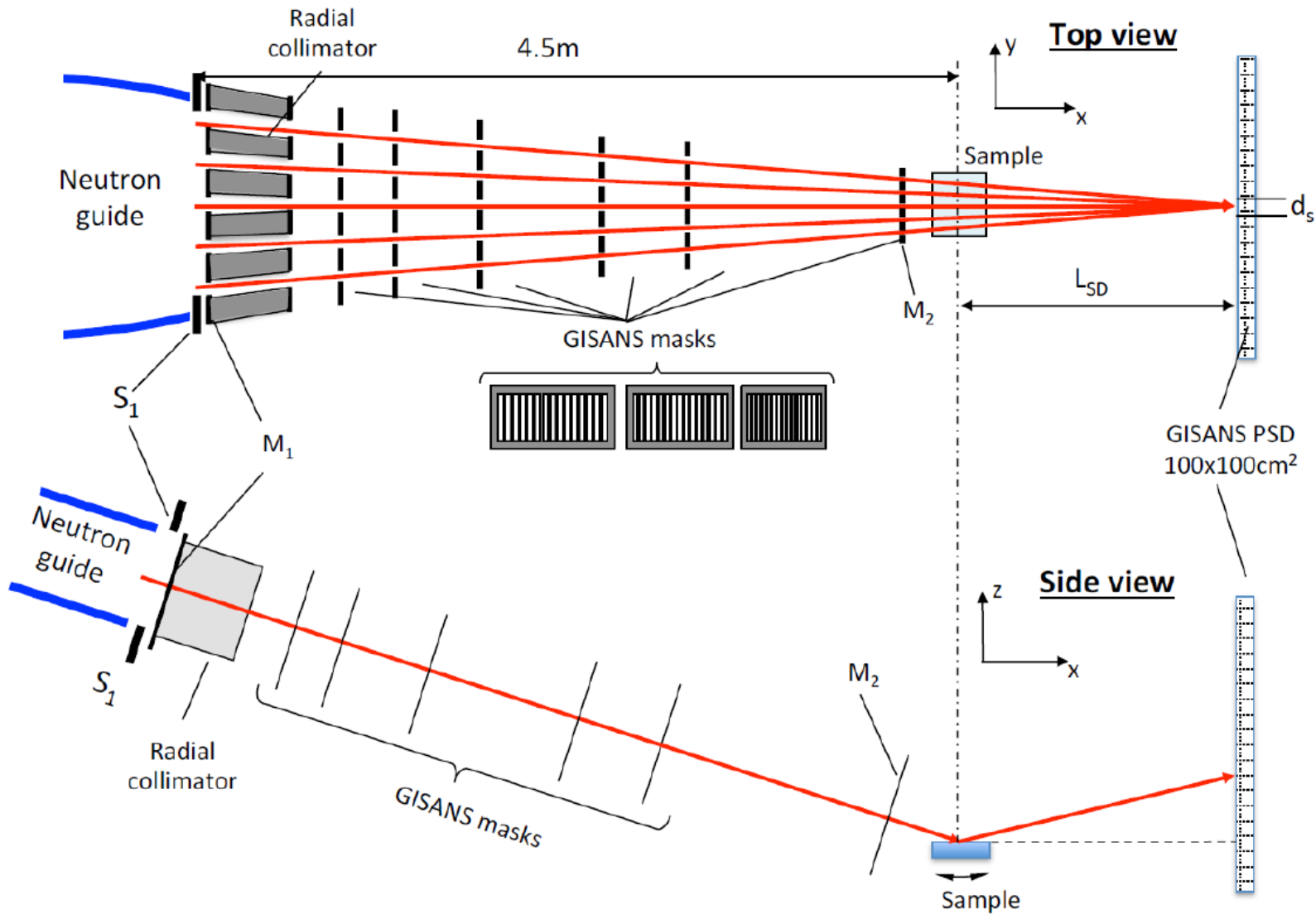


Схема спектрометра CANDOR (NIST)

Chromatic Analysis Neutron Diffractometer Or Reflectometer

CANDOR

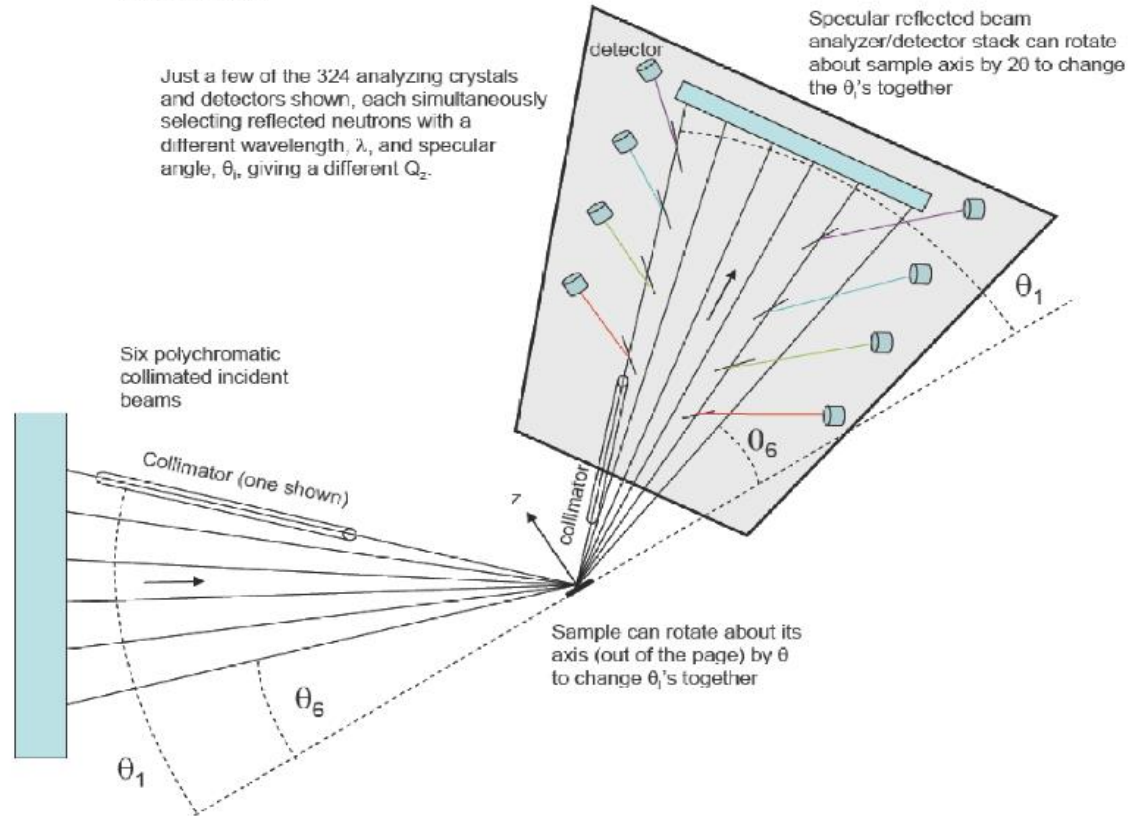
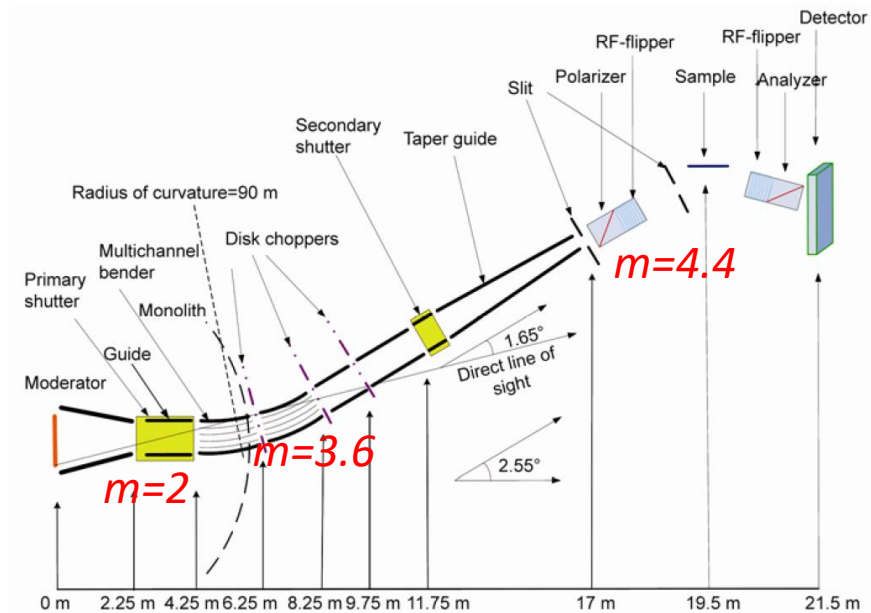


Fig. 1. Overhead schematic representation of the polychromatic instrument CANDOR described in this paper. In practice the beam incident on the sample spans a single angular range, whether narrow or broad, and is not divided into discrete segments. (Thanks to R. Cappelletti for the drawing.)

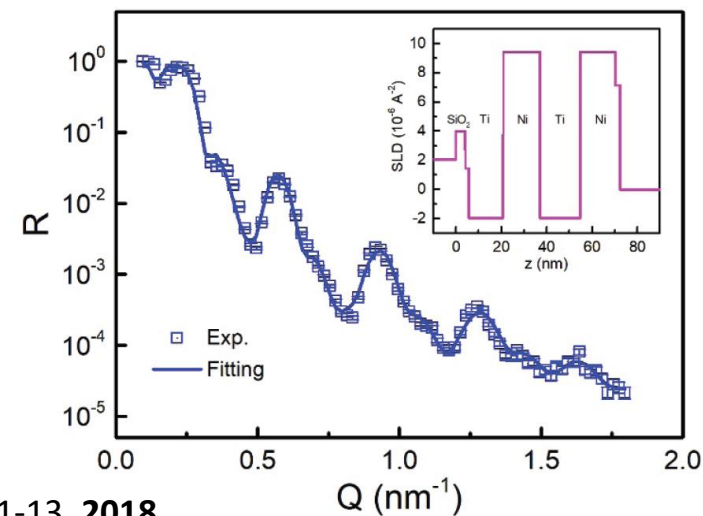
Формирование нейтронного пучка на рефлектометре MR (CSNS)



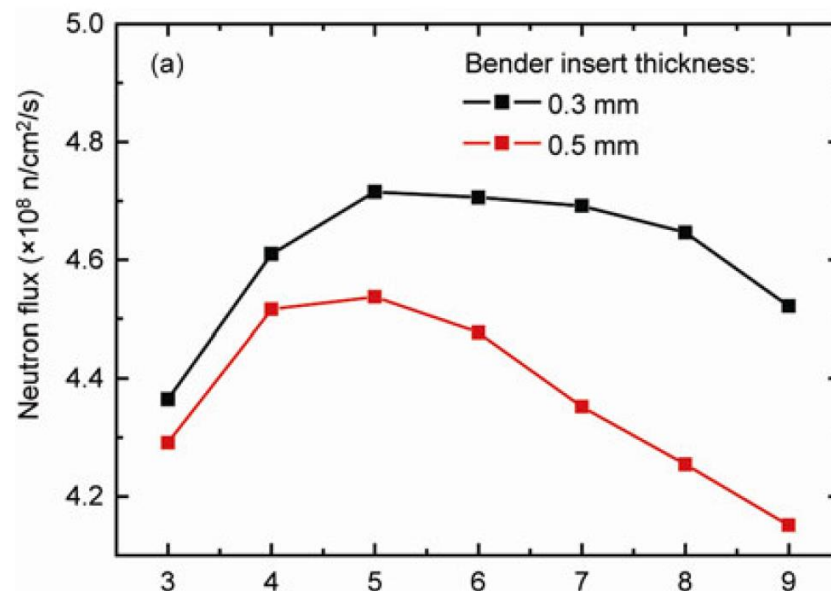
Wang F.W. et al. // Sci China-Phys Mech Astron, **2013**, 56: 2410-2424.



Tao Zhu et al. // Neutron News, 29:2, 11-13, **2018**

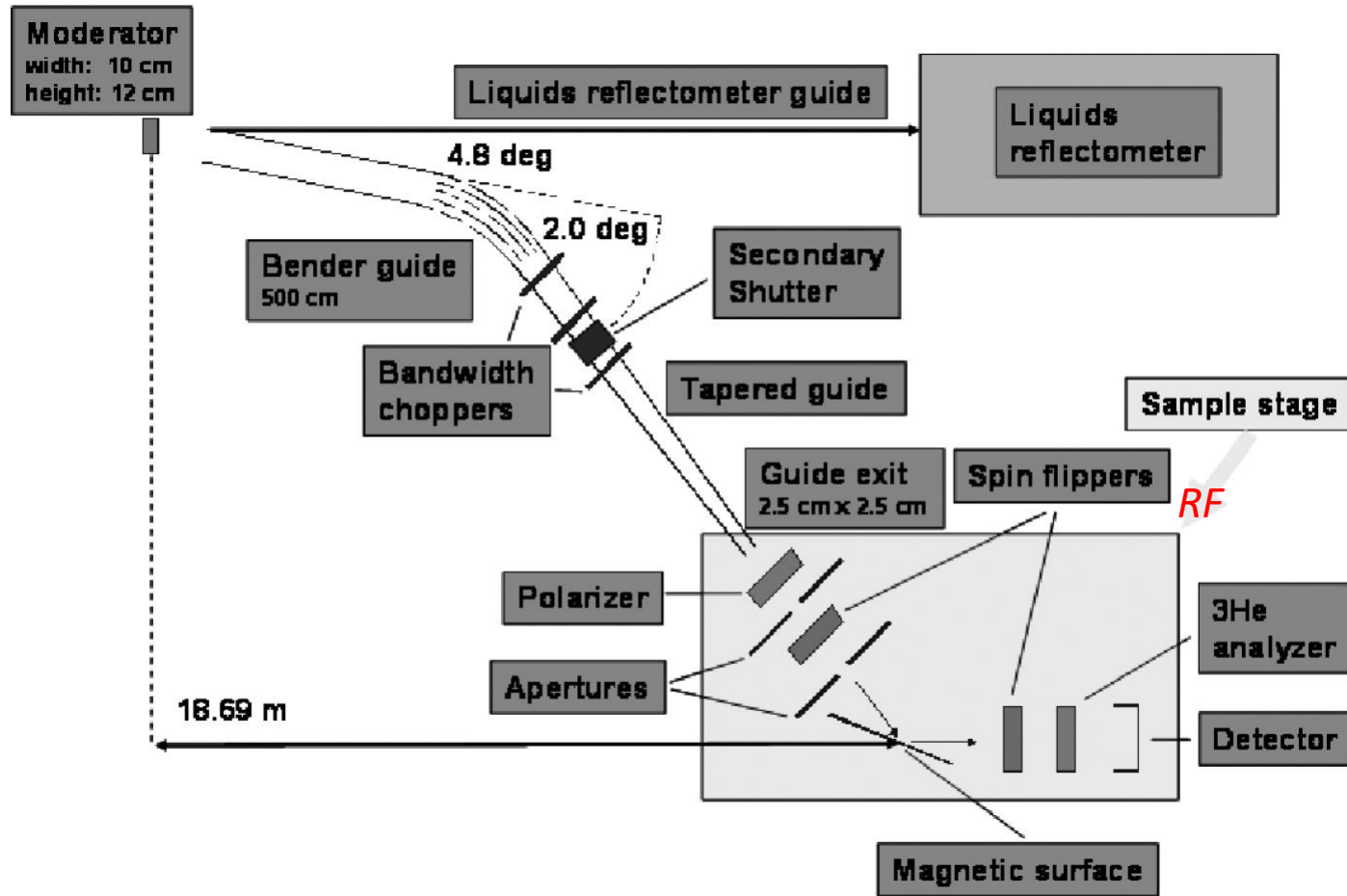


Moderator	CHM (20 K)
Bandwidth ($\Delta\lambda$)	6 Å
Guide	Bender + Straight + Taper 40-60 → 20-30 mm ²
SS distance L_1	19.5 m
SD distance L_2	2 m
Sample table	Supermirror type
Polarizer / analyzer	Supermirror type
Detector	2D position-sensitive detector Position resolution: 2 mm
$\Delta Q / Q$	< 1%
Sample surrounding	vertical field of 1-T electrical magnet and a cryostat ranging from 5 to 800 K are installed on the 6-axis sample stage

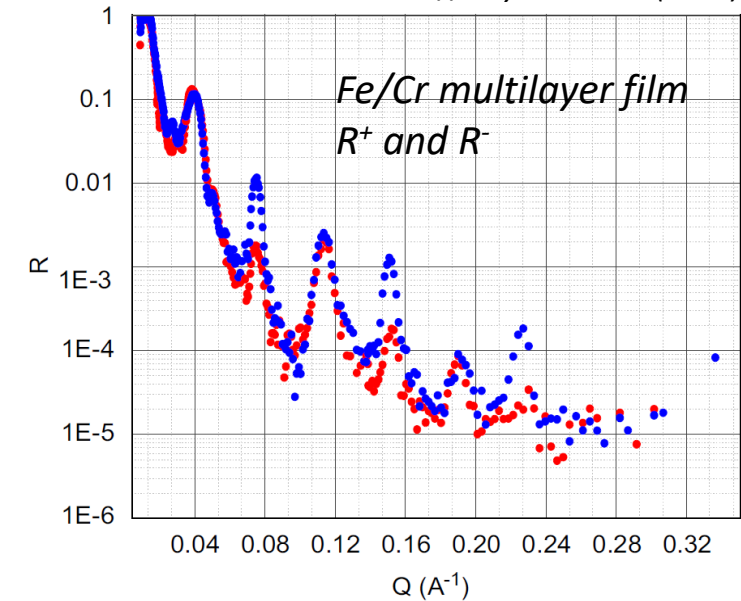


Wang F.W. et al. // Sci China-Phys Mech Astron, **2013**, 56: 2410-2424.

Формирование нейтронного пучка на рефлектометре MAGREF (SNS)



Valeria Lauter et al. // Physica B 404 (2009) 2543–2546



Source-to-sample distance	18.703 m
Sample-to-detector distance	2.2972 m
Detector size ^3He	21 x 18 cm ²
Detector resolution	1.4 mm
Moderator	Coupled supercritical hydrogen
Bandwidth	60 Hz ($\Delta\lambda=3 \text{ \AA}$), 30 Hz ($\Delta\lambda=6 \text{ \AA}$)
Wavelength range	$1.8 \text{ \AA} < \lambda < 14.0 \text{ \AA}$
Q range	$0 \text{ \AA}^{-1} < Q < 3.5 \text{ \AA}^{-1}$
Magnetic field max	1.2 T with a gap of 50 mm and 3 T with a gap of 10 mm
Polarization	Reflection Polarizer P = 99%-96% λ (2 \AA – 10.5 \AA) Transmission Polarizer P = 96%-90% λ (4.5 \AA – 12 \AA)
T range	5-750 K
Minimum reflectivity	10^{-8}

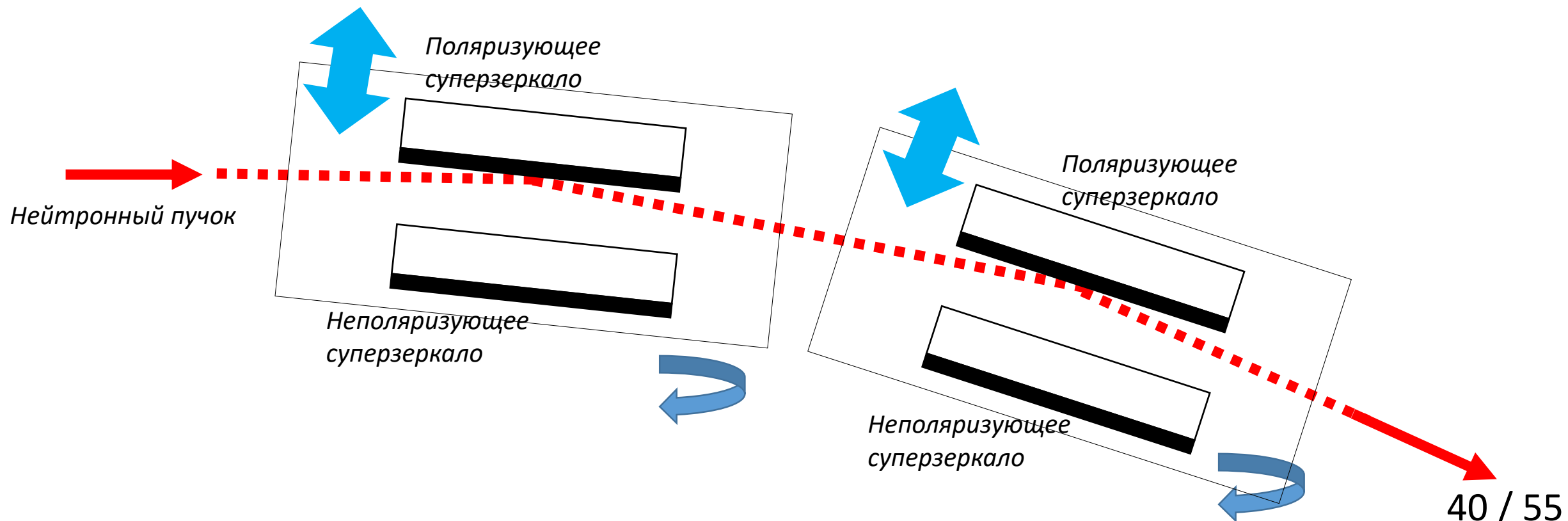
H. Ambaye et al. // Neutron News, Vol.19, Num.3 (2008)

Новый узел поляризации на РЕМУР

Узел поляризации может состоять из системы нескольких магнитных зеркал. На рисунке представлена одна из возможных схем узла поляризации. Её преимущества состоят в следующем:

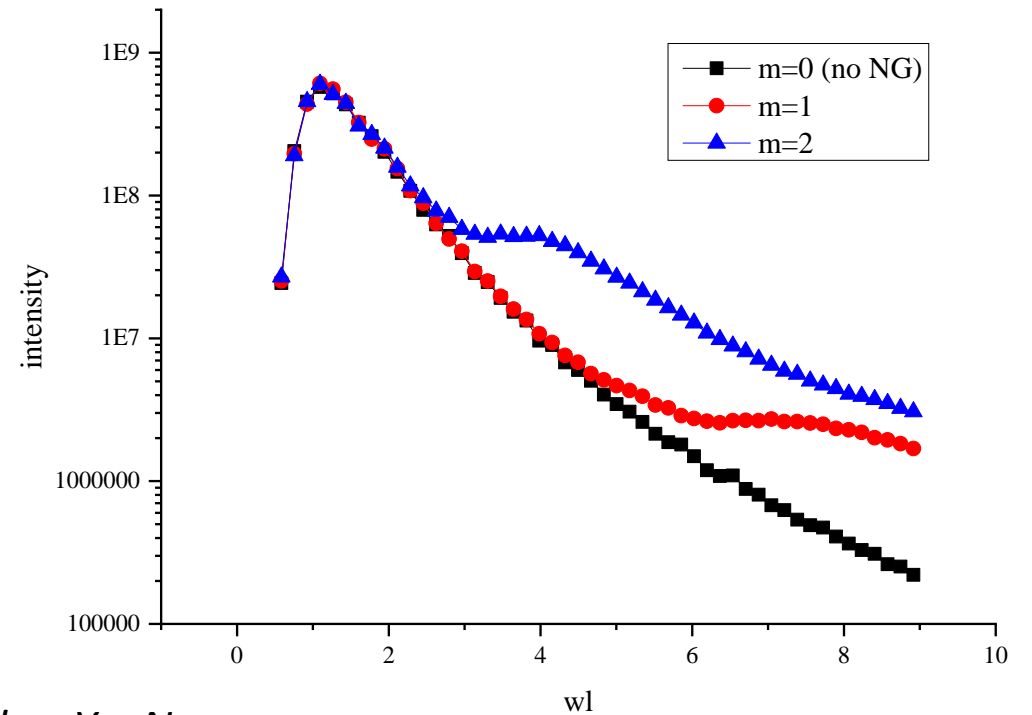
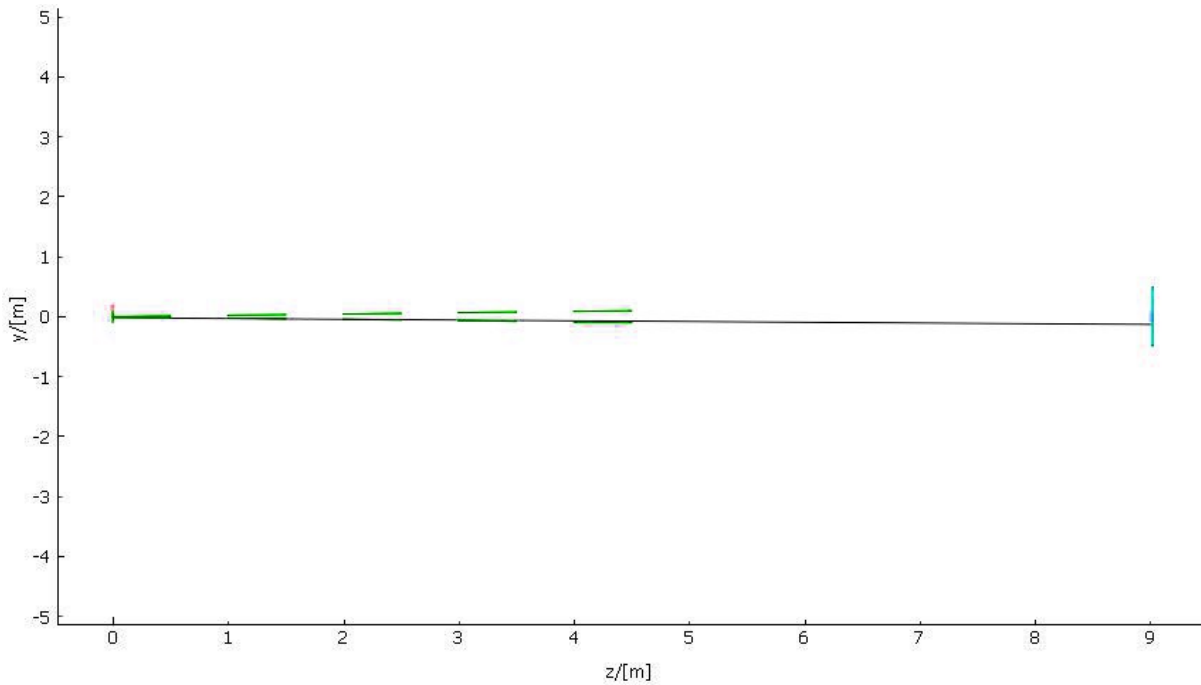
- Смена поляризующей / неполяризующей моды без изменения направления пучка
- Изменение поляризующей эффективности для конкретной длины волны за счёт поворота системы поляризующих зеркал
- За счёт двойного отражения от поляризующих зеркал возрастает поляризующая эффективность.

При этом достаточно параметра $m=2$, благодаря чему зеркала будут менее изгибаться.



Расчёт нейтроноводной системы на рефлектометре РЕМУР

Расчёты показали что нейтроновод на начальном отрезке пути после замедлителя позволяет на порядок увеличить нейтронную интенсивность в больших длинах волн



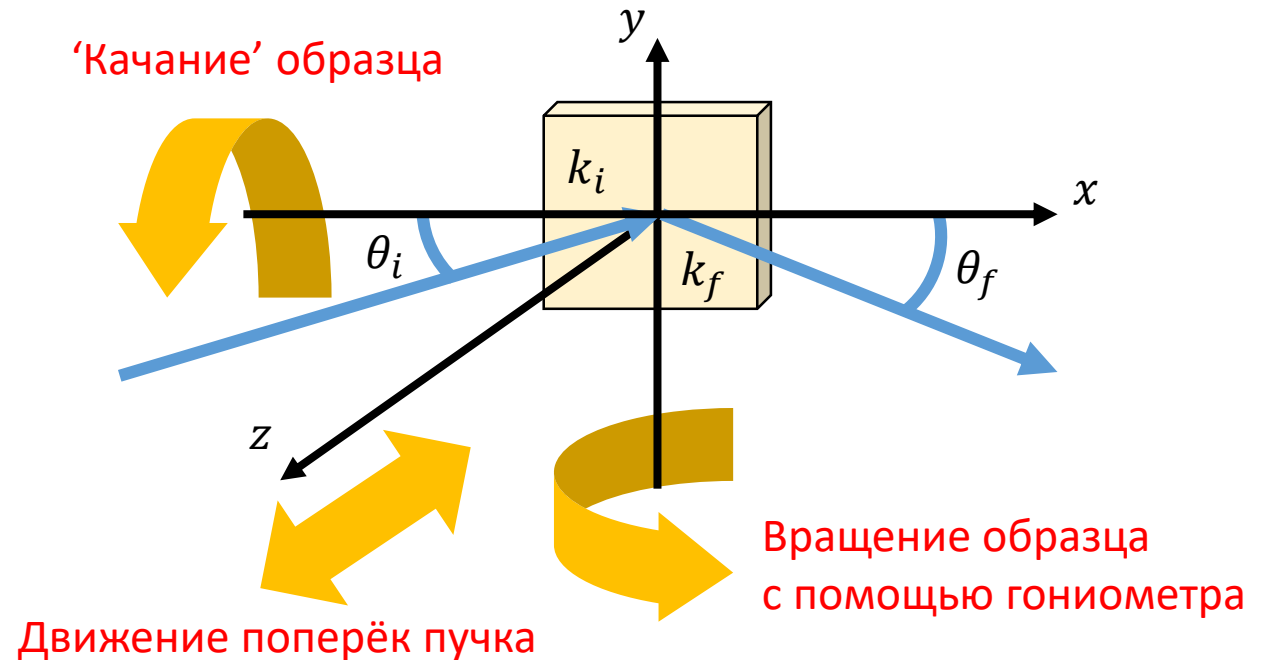
@ Khaydukov Yu. N.

Окружение образца

Системы окружения образца:

1. Системы позиционирования образца
2. Электромагнит
3. Криостат
4. Регистрация вторичных излучений
5. Осциллирующее магнитное поле
6. In-situ исследования
7. Ультразвуковое возбуждение
8. Техника для исследования 'soft-matter'
9. Подавление вибраций

Система позиционирования образца на спектрометре РЕМУР



Разработка новых криостатов на спектрометре РЕМУР

Предлагается два криостата:

1. Криостат для работы с двумя каналами регистрации – нейтронов и гамма-излучения до $T=0.5\text{ K}$
2. Криостат для сверхнизких температур до $T=50\text{ мК}$

Требования к криостату №1:

- Минимальная температура: $T=1.5\text{ K}$ с ^4He и $T=0.5\text{ K}$ с ^3He
- Возможность регистрации гамма-излучения
- Магнитное поле $H=0 \div 3\text{ Тл}$, отсутствие 'нулевой' точки на нейтронном пути
- Режим работы: замкнутый цикл
- Время смены образца 3-6 часов, охлаждение от $T=300\text{ K}$ до 10 K за 2-4 часа
- Тип загрузки образца: 'top loading' с помощью держателя образца

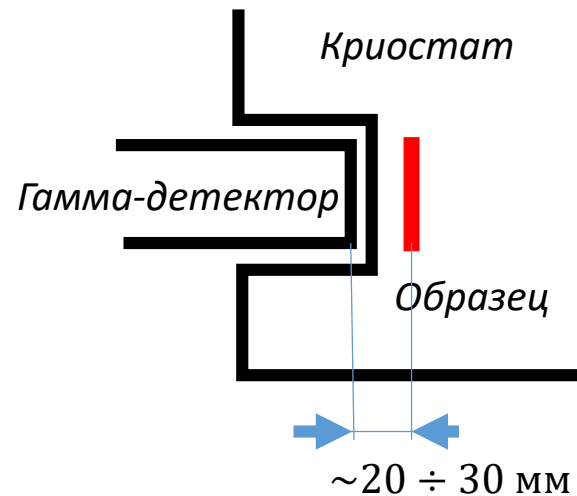
Срок исполнения – 1.5 года

Требования к криостату №2:

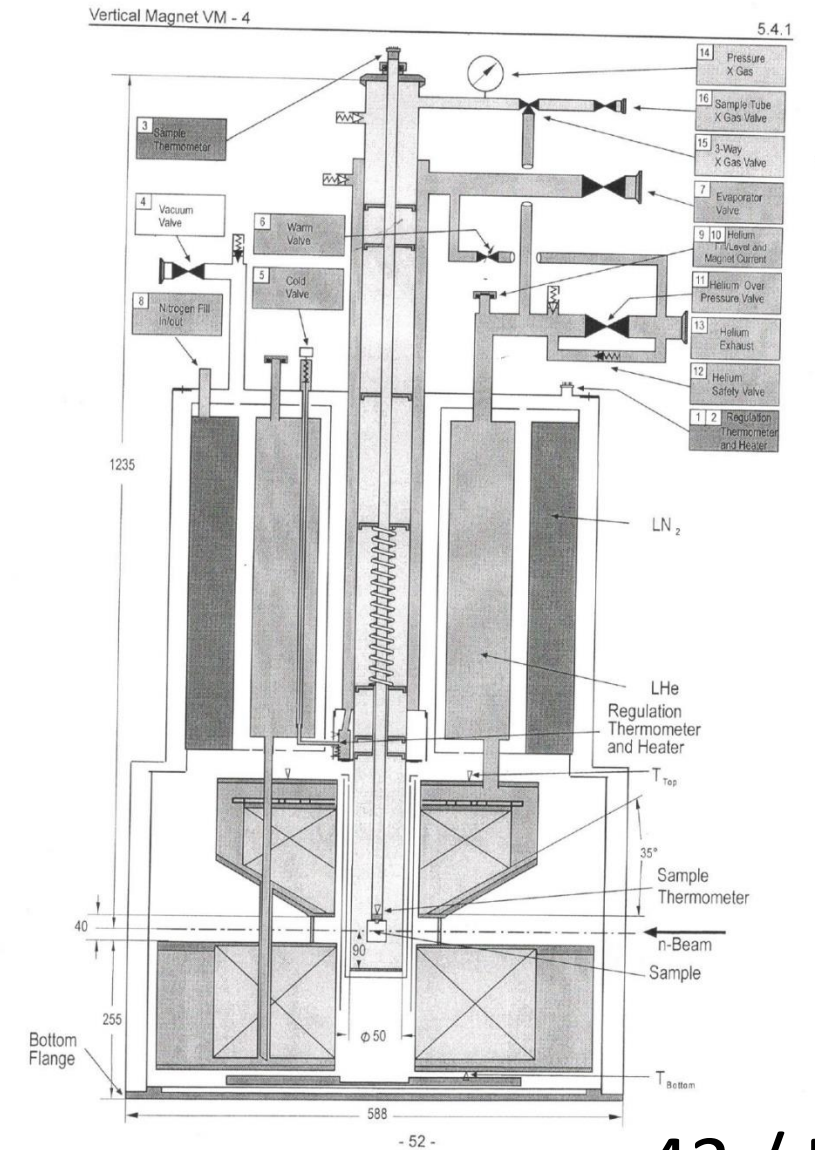
- Минимальная температура: $T=50\text{ мК}$
- Магнитное поле $H=0 \div 3\text{ Тл}$, отсутствие 'нулевой' точки на нейтронном пути

Срок исполнения – 5 лет

Предлагаемая конфигурация



Имеющийся криостат на спектрометре РЕМУР от Oxford Instruments

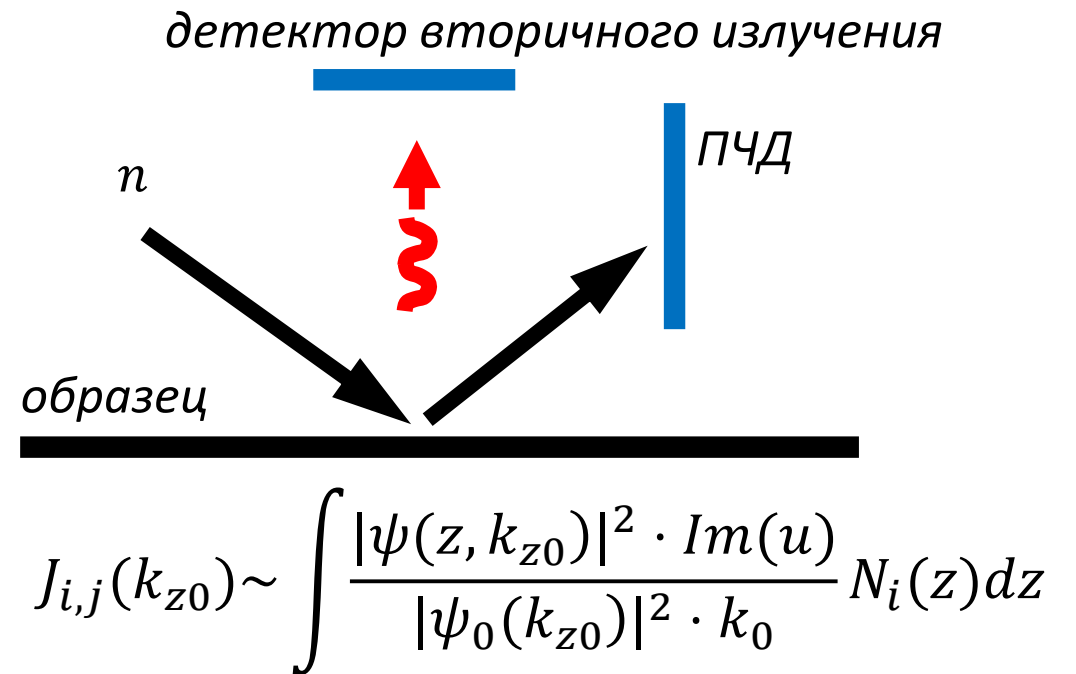


Регистрация вторичного излучения

$$W = \sum W_{ij} \propto \sum N_i \sigma_{ij}$$

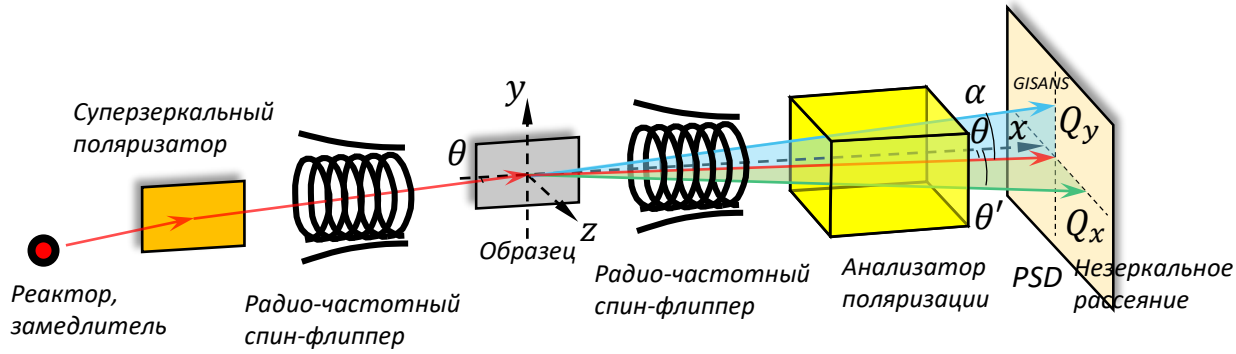
i – изотоп, j – сорт вторичного излучения

- Заряженные частицы (n, α); (n, t); (n, p)
- Гамма кванты (n, γ)
- Осколки деления (n, f)
- Нейтроны с переворотом спина
- некогерентно рассеянные нейтроны ядрами атомов
- диффузно рассеянные нейтроны на неоднородностях среды
- неупруго рассеянные нейтроны



Регистрация вторичного излучения на спектрометре РЕМУР

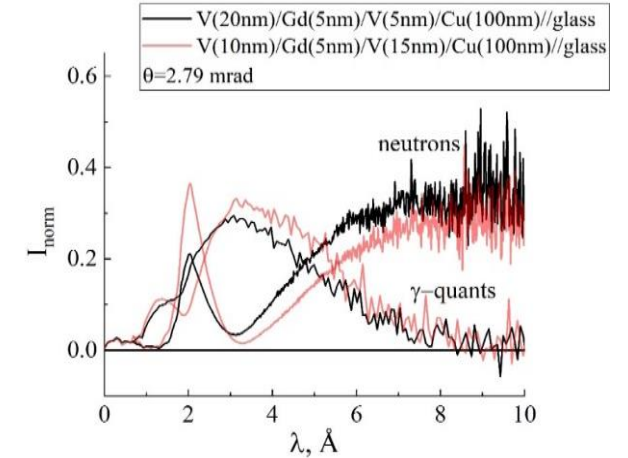
Схема спектрометра РЕМУР на реакторе ИБР-2



Канал регистрации гамма-квантов



Канал регистрации гамма-квантов и позиция образца



Коэффициенты отражения нейтронов и гамма-квантов

Каналы регистрации заряженных частиц и поляризованных нейтронов

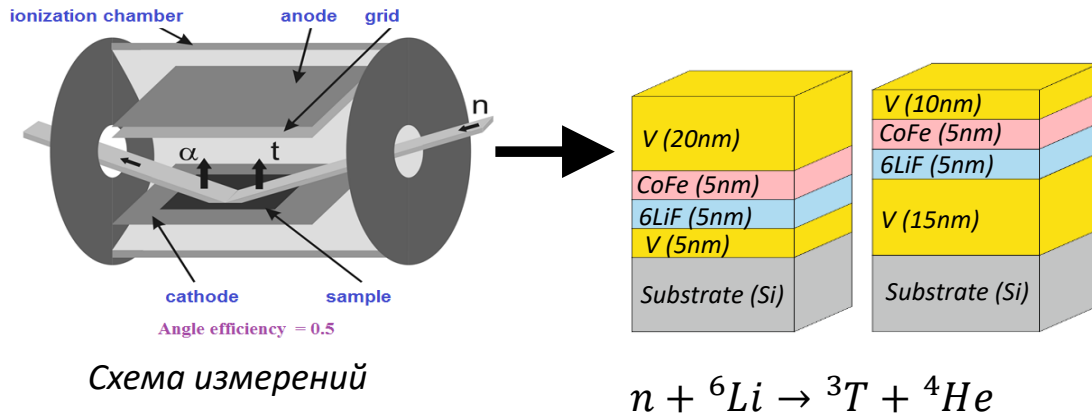
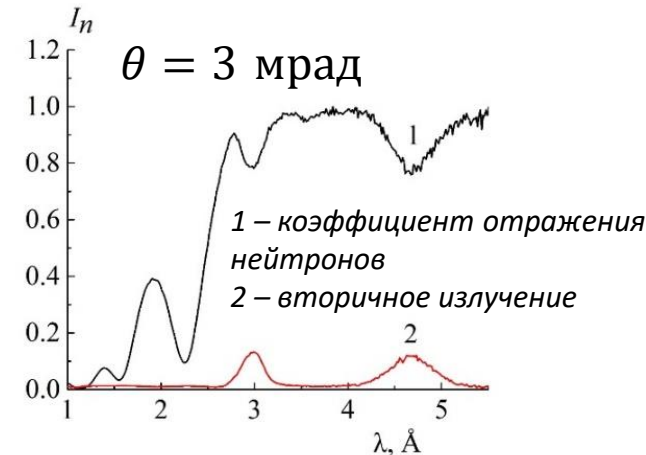
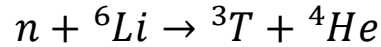
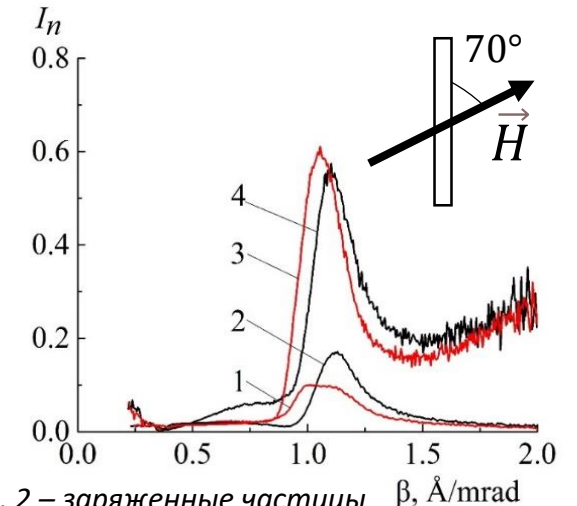


Схема измерений



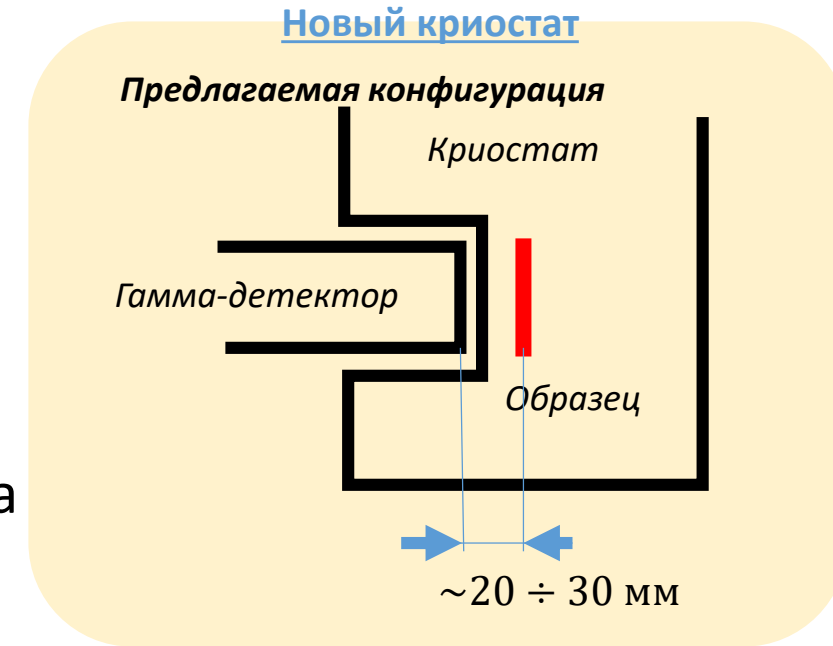
Коэффициент отражения нейтронов и спектр заряженных частиц



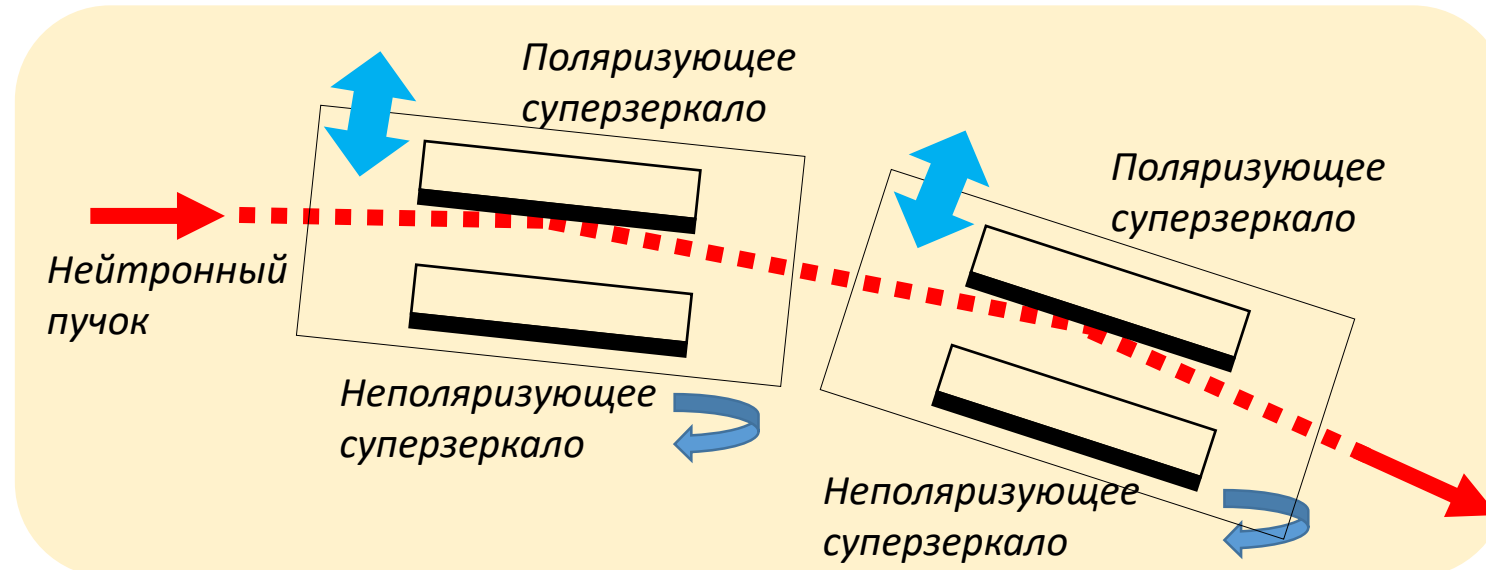
1, 2 – заряженные частицы
3, 4 – нейтроны с переворотом спина

Совершенствование экспериментального метода (расширение числа элементов)

1. Уменьшение фона гамма квантов и быстрых нейтронов
2. Низкотемпературная мода
3. Увеличение пространственного разрешения
4. Правильная измерительная процедура
5. Суммирование всех энергетических линий для гамма-канала
6. Развитие ПО



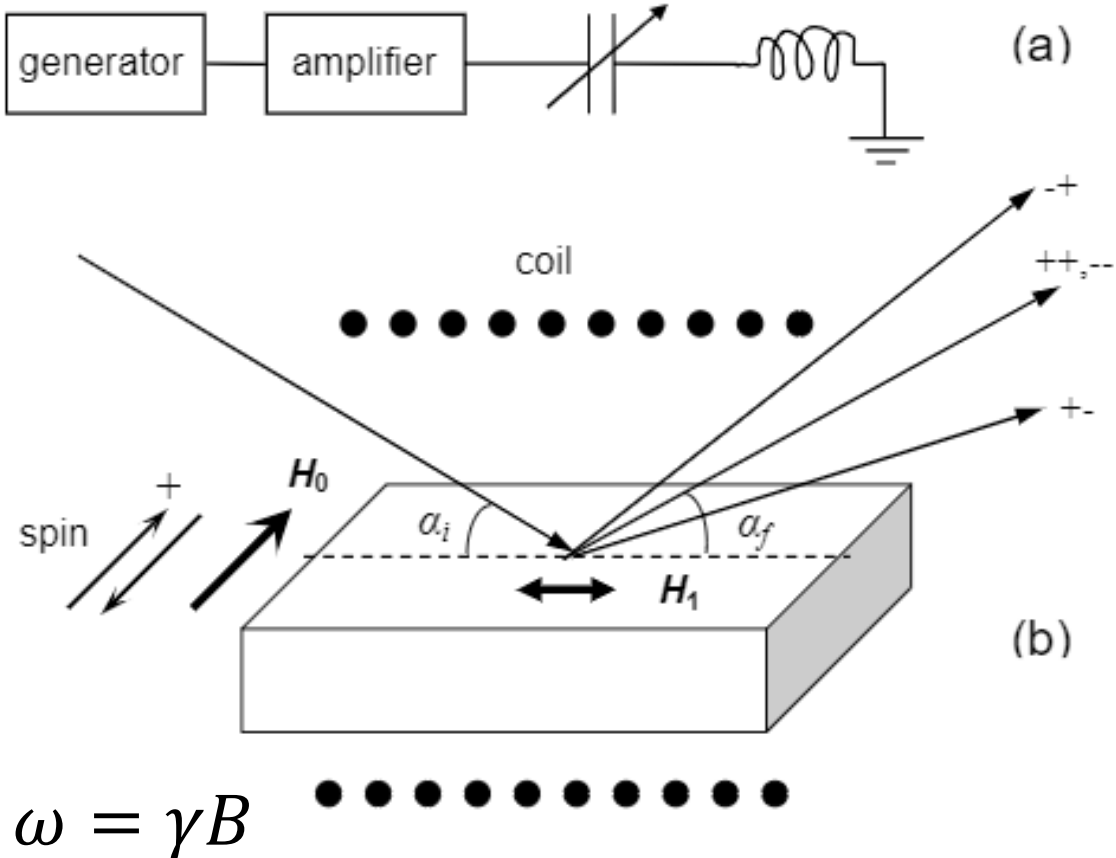
Новый узел поляризации – одна из предлагаемых концепций



Для канала регистрации
гамма-квантов:

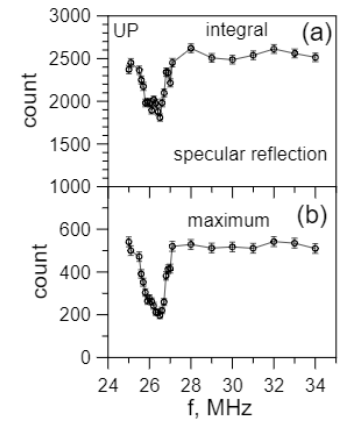
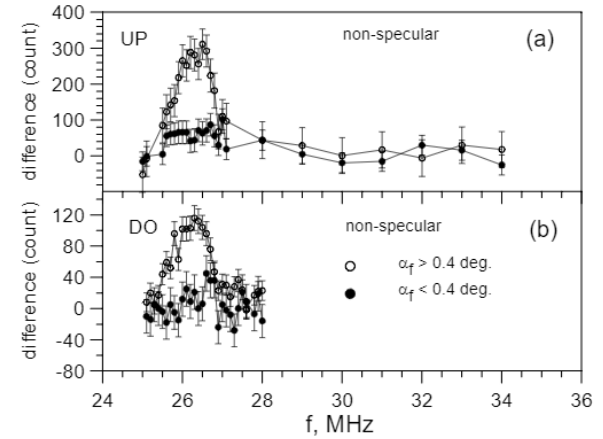
$$\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}} = 2.5 \div 5$$

Нейтронная рефлектометрия с осциллирующим магнитным полем

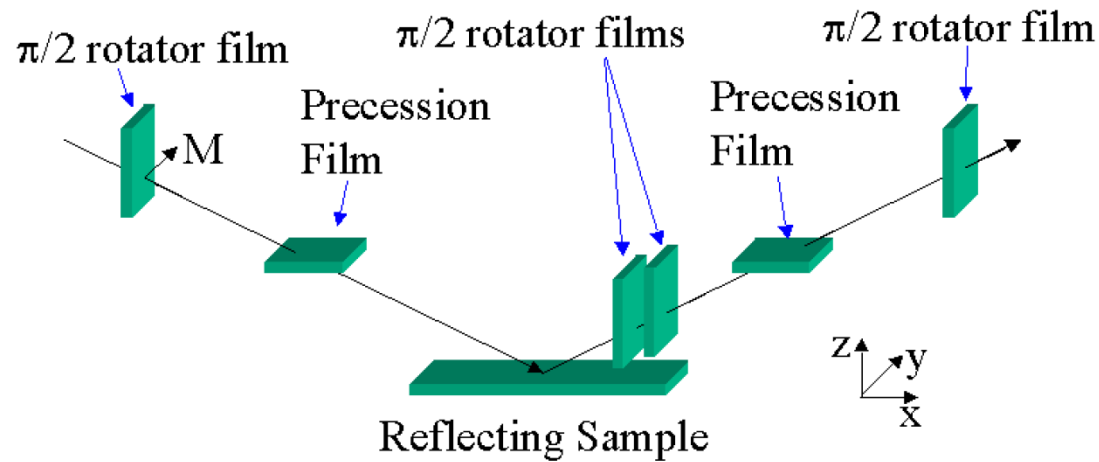


$$\frac{h^2 \sin^2 \alpha_f}{2m\lambda^2} = \frac{h^2 \sin^2 \alpha_i}{2m\lambda^2} \pm hf$$

$P\gamma (5000 \text{ \AA}) // Si$



Reflectometer OffSpec at ISIS



Schematic diagram of the application of neutron spin echo to reflectivity

Moderator	Coupled Grooved H2/CH4
Detectors	1 x 300 mm linear scintillator detector 1.2 mm pixel size 1 x ³ He tube
L ₁	23.7 m
L ₂	3.2 m (³ He tube) or 3.6 m (Linear Scintillator)
Resolution	~2-5 % ΔQ _z /Q _z
Incident Wavelengths	1.5 - 14.5 Å
Choppers	Counter – rotating disc chopper (10 Hz)

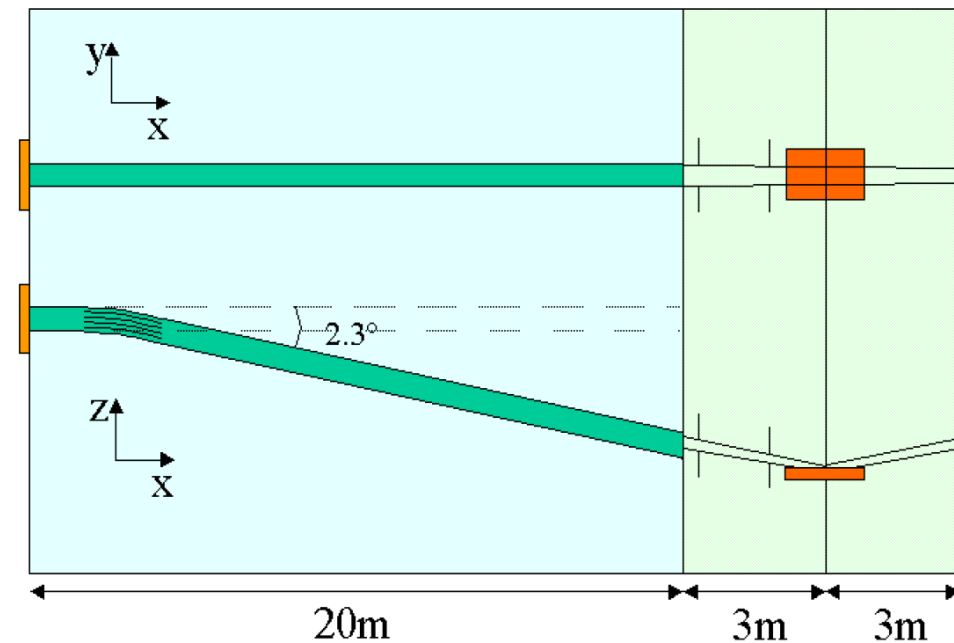
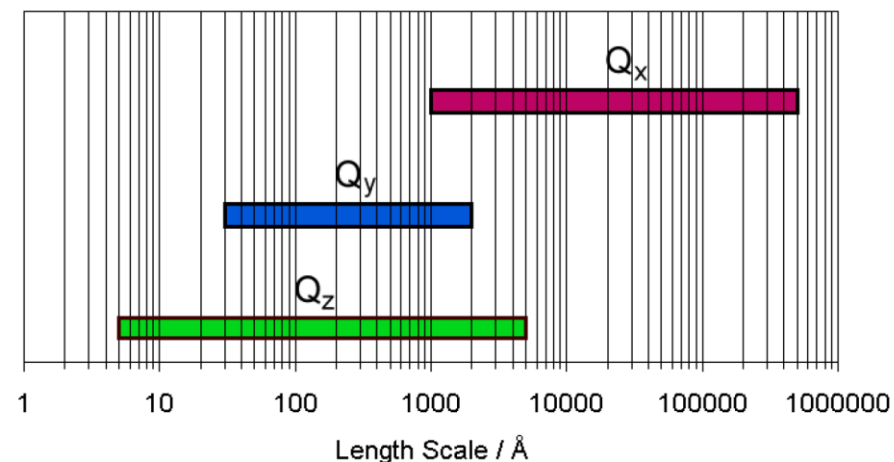


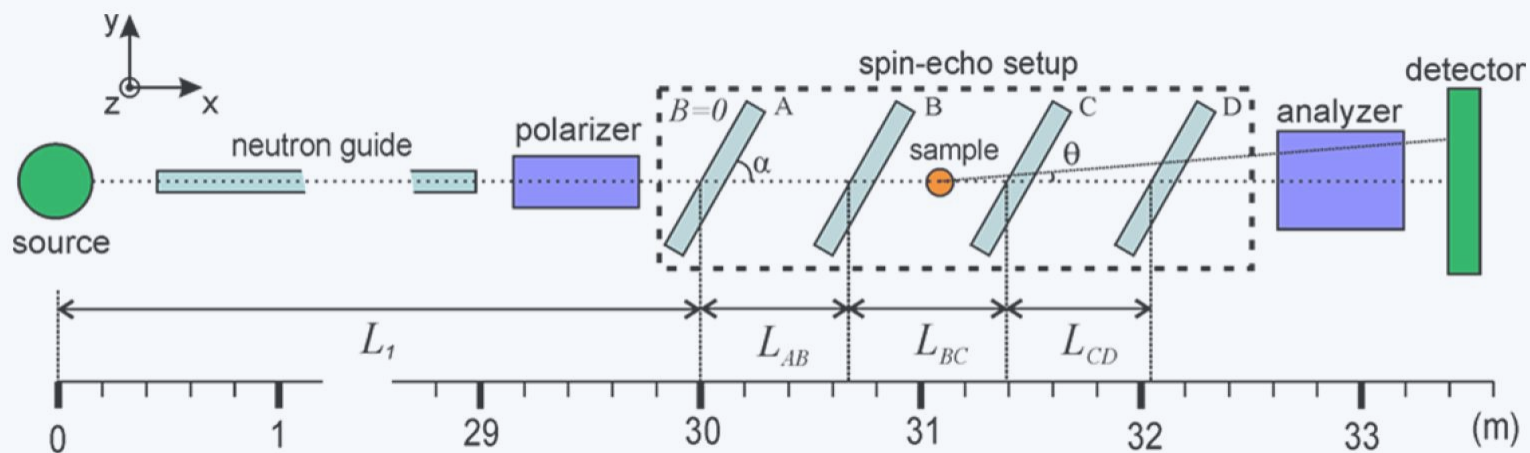
Illustration of the guide configuration for OffSpec.



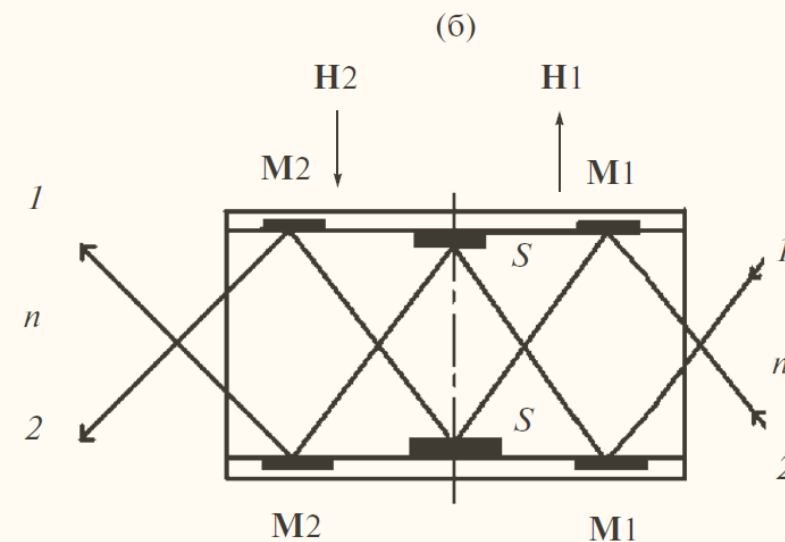
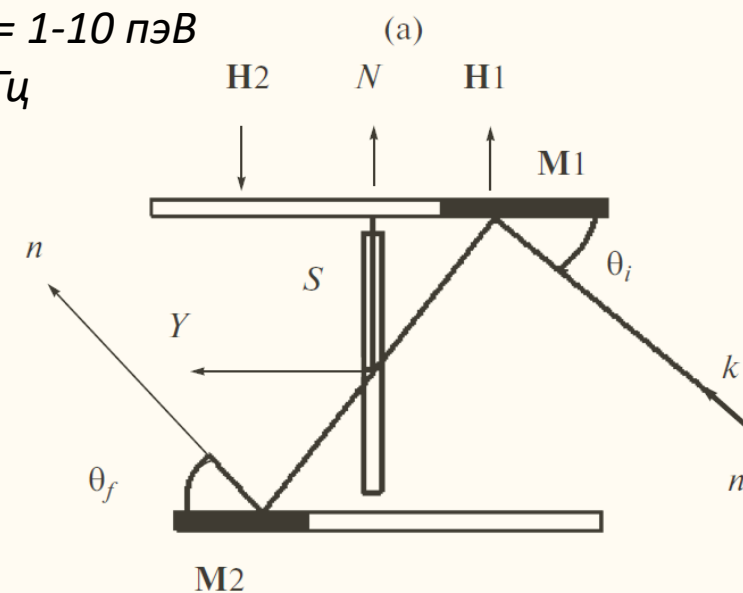
An illustration of the real space length scales accessible with the 3 components of Q.

Спин-эхо спектрометр в скользящей геометрии

1. Спин-эхо спектрометр нейтронов скользящей геометрии
Ю.В. Никитенко. // Поверхность, 2016, № 2, с. 16-23
2. SESANS- спектрометр
V. Vodnarchuk et al 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 862 012003
3. Рефлектометрия с ларморовской прецессией
H.J. Lauter et al. // Physica B 350 (2004) e759–e762
4. ...



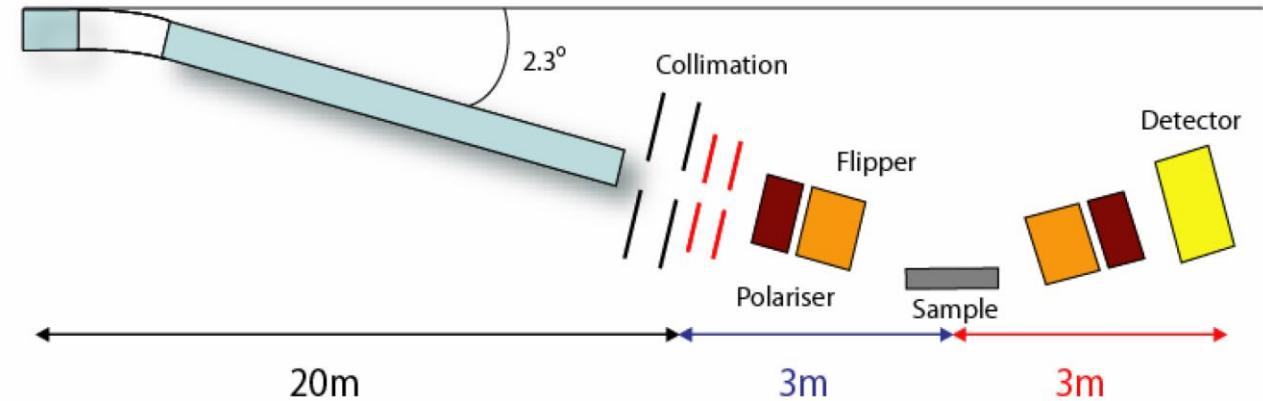
$\Delta E = 1-10$ пэВ
 \sim кГц



Исследование актинидных и редкоземельных гетероструктур на рефлектометре PolRef (ISIS)

Одно из приоритетных направлений на рефлектометре: редкоземельные и актинидные гетероструктуры

The actinide elements exhibit behaviour somewhere in between those of the transition metals and the rare earths. Surprisingly, uranium based multilayers have been considered as candidate technologies for high density recording media due to the enormous magneto-optical effect. The quantities of radioactive materials in such samples are very small (typically $<100\mu\text{g}$) thereby minimising the radioprotection requirements. Such studies are still difficult and limited due to sample preparation but these issues are being actively addressed and such topics as induced magnetism, hydrogen loading etc. in actinide systems will offer new research possibilities.



Moderator	Coupled grooved cold H ₂ /CH ₄
Incident Wavelength	0.9 Å – 15 Å
Resolution	$\Delta Q/Q \sim 3 - 10\%$
Flux the sample position	$\sim 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
L ₁	23 m
L ₂	3 m
Beam size	60 mm x 30 mm H x V
Polarizer	Supermirror m=4, P > 95 %
Analyzer	Fan type
Flippers	SF, Drabkin
Sample environment	Electromagnet: H=1.5 T Cryostat: T=2 K, H=10 T
Detector	³ He 200 x 200 mm, resolution < 1mm

Чем заинтересовать РосАтом: исследование актинидных гетероструктур

Актуальность

- Нанogramмы вещества
- Низкоразмерные эффекты
- Сложный магнетизм
- Сверхпроводимость
- Существование сверхпроводимости и ферромагнетизма
- Являются источником осколков деления и гамма-квантов

Задачи

- Мишени для синтеза сверхтяжёлых элементов
- Поиск криптоферромагнетизма в урановых сверхпроводящих ферромагнетиках
- Урановые тонкоплёночные волноводы

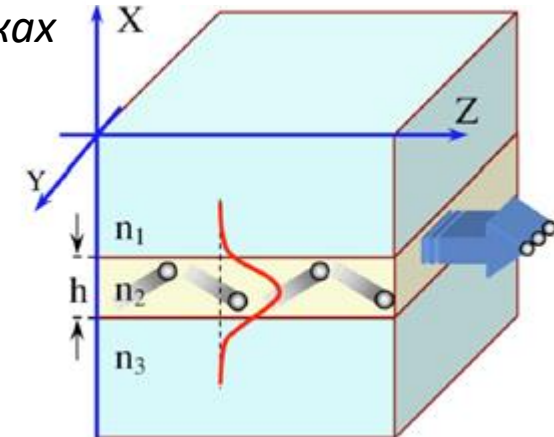
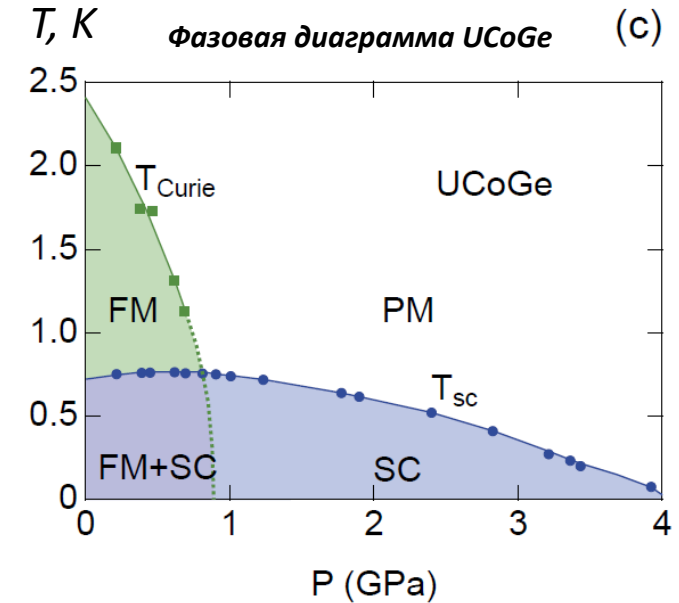
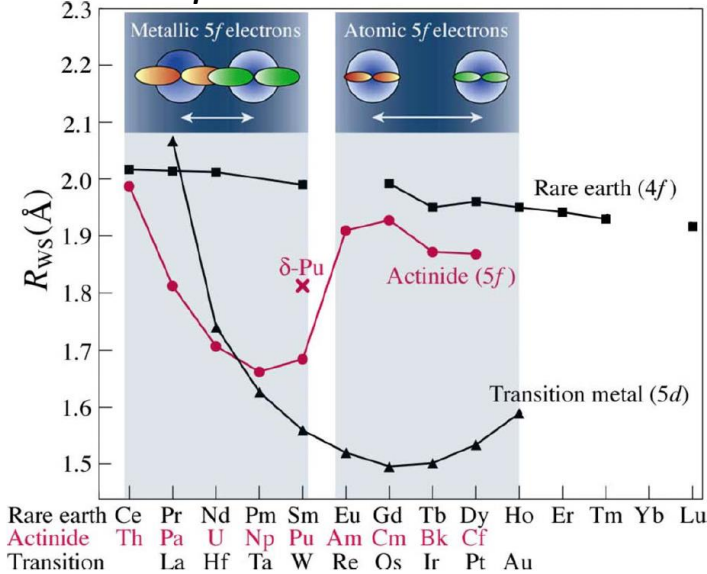
26 55,847	Fe Железо	27 58,9330	Co Кобальт	28 58,71	Ni Никель
--------------	---------------------	---------------	----------------------	-------------	---------------------

Лантаноиды*	58 140,12	Ce Церий	59 140,907	Pr Празеодим	60 144,24	Nd Неодим	61 [147]*	Pm Прометий	62 150,35	Sm Самарий	63 151,96	Eu Европий	64 157,25	Gd Гадолиний	65 158,924	Tb Тербий	66 162,50	Dy Диспрозий	67 164,930	Ho Гольмий	68 167,26	Er Эрбий	69 168,934	Tm Тулий	70 173,04	Yb Иттербий	71 174,97	Lu Лютеций
-------------	--------------	--------------------	---------------	------------------------	--------------	---------------------	--------------	-----------------------	--------------	----------------------	--------------	----------------------	--------------	------------------------	---------------	---------------------	--------------	------------------------	---------------	----------------------	--------------	--------------------	---------------	--------------------	--------------	-----------------------	--------------	----------------------

Актиноиды**	90 232,038	Th Торий	91 [231]	Pa Протактиний	92 238,03	U Уран	93 [237]	Np Нептуний	94 [244]	Pu Плутоний	95 [243]	Am Америций	96 [247]	Cm Кюрий	97 [247]	Bk Берклий	98 [252]*	Cf Калифорний	99 [254]	Es Эйнштейний	100 [257]	Fm Фермий	101 [257]	Md Менделевий	102 [255]	No Нобелий	103 [256]	Lr Лоуренсий
-------------	---------------	--------------------	-------------	--------------------------	--------------	------------------	-------------	-----------------------	-------------	-----------------------	-------------	-----------------------	-------------	--------------------	-------------	----------------------	--------------	-------------------------	-------------	-------------------------	--------------	---------------------	--------------	-------------------------	--------------	----------------------	--------------	------------------------



Радиус атома для актинидов, редкоземельных и переходных металлов



S.P. Pogossian. Enhanced neutron concentration in uranium thin film waveguides // Journal of Applied Physics 102, 104501 (2007)

Сечения деления и радиационного захвата

Изотоп	Период полураспада	(n, f) , барн	(n, γ) , барн
Торий-232 (~100%)	14.05 млрд лет	?	7.35
Торий-229	7340 лет	31.12	70.95
Протактиний-231 (~100%)	32760 лет	0.021	202.26
Протактиний-230	17 дней	1509.64	382.44
Уран-238 (~99.27%)	4.468 млрд лет	1.86E-5	2.68
Уран-235 (0.72%)	0.704 млрд лет	590.64	100.135
Нептуний-237	2.20 млн лет	0.0205	175.9
Нептуний-236	5000 лет	2824.19	121.83
Плутоний-244	80.8 млн лет	0.0017261619	1.72
Плутоний-239	24110 лет	751.53	271.45
Америций-243	7370 лет	0.08183911	80.91
Америций-242m	141 год	6426.89	1236.20
Кюрий-247	16 млн лет	95.33561	60.31
Кюрий-245	8500 лет	2071.50	350.03
Берклий-247	1380 лет	3.7249346	1006.67
Калифорний-251	900 лет	4985.0903	2891.11

На данный момент на РЕМУР достигнуты следующие значения для слоя толщиной 5 нм:

- для канала заряженных частиц $\sigma_{min} = 0.025$ барн
- для канала гамма-квантов $\sigma_{min} = 0.3$ барн

Список тестовых работ на ИБР-2

1. Барабанные прерыватели
2. Детекторные системы
3. Поляризаторы, анализаторы, спин-флипперы
4. Формирование нейтронного пучка
5. Криостаты
6. Осциллирующее магнитное поле
7. Вторичное излучение
8. Спин-эхо рефлектометрия
9. Биспектральный замедлитель ?

Заключение

Глобально новое и чего нет на ИБР-2:

1. Поток $\Phi=10^8$ н/с/см²
2. Жидкостной рефлектометр с поляризационным анализом
3. Исследование низкочастотной динамики в тонких плёнках
4. Разрешение $\Delta Q/Q=10^{-3}$

Чем заинтересовать РОСАТОМ:

1. Исследование редкоземельных и актинидных гетероструктур

“Белое пятно”:

1. Нейтронная рефлектометрия с ОХН

Спасибо за внимание!