

Детекторы нейтронов для реактора ТИК. Концепция.

А.Г.Крившич

Совещание по использованию рассеяния нейтронов
и синхротронного излучения в конденсированных средах

27-31 октября 2014г.

Санкт-Петербург, ПИЯФ НИЦ КИ

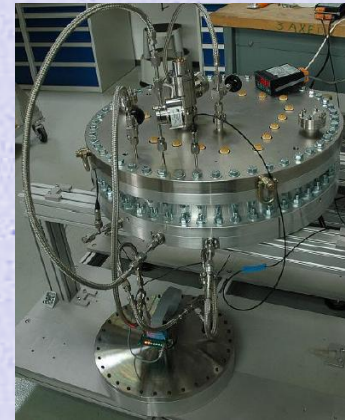
**Наше БУДУЩЕЕ
мы создаем СЕГОДНЯ,
а не ЗАВТРА**

Институт Лауэ-Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция).

Реактор ПИК сопоставим с реактора ILL по плотности нейтронных потоков и, по существу, является будущим приемником реактора HFR в ILL.

Более, чем за 40 лет были созданы уникальные экспериментальные установки мирового класса, а их параметры оптимизированы на основе моделирования и экспериментов.

Абсолютное большинство детекторов (90%) – это газоразрядные приборы, использующие **He-3** в качестве конвертора нейтронов.



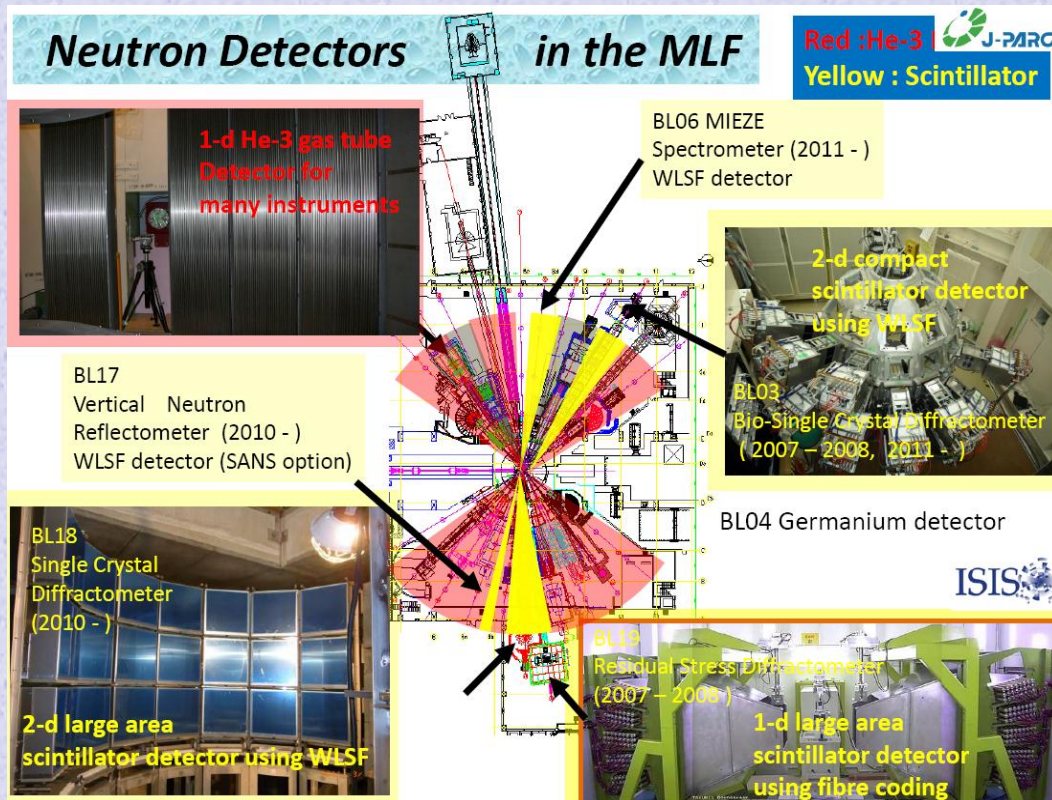
Детектор установки
MILAND
(дифрактометр D16).

Детекторная технология	Типы детекторов, применяемых ILL	
	Тип детектора	Количество
Газоразрядные детекторы на базе конвертора He-3	Пропорциональные счетчики (He-3)	9
	Мультидетекторы и сборки на основе пропорциональных счетчиков	14
	Одно- и многомодульные микроstriповые детекторы (MSGC)	6
	2D He-3 ПЧД	10
	Мониторы нейтронных пучков	4
	Итого	43
Сцинтилляционные детекторы на базе твердотельных конверторов (^6Li и ^{10}B)	Сцинтилляционные детекторы на базе ZnS/LiF	2
	Сцинтилляционные детекторы ImagePlates	2
	Итого	4



Детектор на базе двух-координатных сборок из линейно-чувствительных пропорциональных счетчиков (LSPC).

J-PARK Japan Proton Accelerator Research Complex (KEK/JAEA).



Размещение и структура нейтронных детекторов на экспериментальных установках MLF (J-PARK)

В настоящее время на установках J-PARK сложилась, пожалуй, наиболее сбалансированная ситуация с точки зрения применяемых различных типов детекторов.

Этот центр оснащен 21 экспериментальной установкой, большинство из которых (около 75%) используют газонаполненные **He-3** детекторы

Для достижения требуемых параметров для детекторов, имеющих сложную геометрическую поверхность и большую апертуру было принято решение:

- об использовании сцинтилляционных технологий;
- отказаться от применения стандартных сцинтилляторов на базе $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ и перейти к керамическим сцинтилляторам на базе $\text{ZnS}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$.

Это позволило несколько улучшить параметры существующих сцинтилляционных детекторов в части увеличения быстродействия, эффективности, уменьшения после-свечимости и т.д.

Эта работа потребовала создания в J-PARK новой «сцинтилляционной» инфраструктуры и более 10 лет напряженной работы.

При этом эффективность сцинтилляционных детекторов не превысила 70% от эффективности He-3 детекторов (4атм).

Ряд установок оснащаются **He-3** позиционно-чувствительными трубками (1/2"), которые работают в высокоинтенсивных нейтронных полях - 1×10^8 н/с/см².

European Spallation Sours (ESS)

(Первые нейтроны - 2019г. Ввод всех установок - не позже 2025г.)

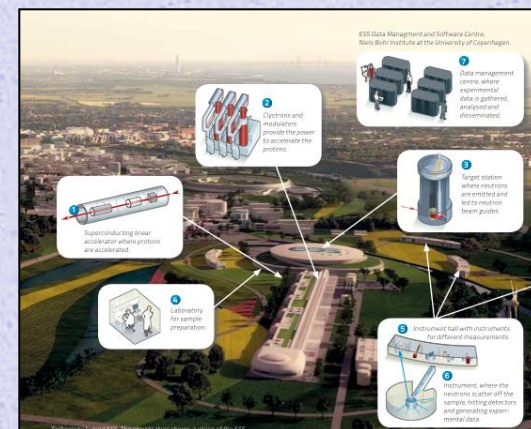
Технические требования к детекторам нейтронов, которые должны работать в составе установок ESS.

Instrument	Area [m ²]	Resolution [mm]	Readout channel count [10 ³]
❌ Cold chopper spectrometer	80	10	2.4
Narrow bandwidth powder diffractometer	30	2	6.5
Small sample SANS	1	1	0.2
Horizontal sample reflectometer	0.5	1	1.2
Macromolecular diffractometer	10	2	0.3
Multi-purpose imaging	0.5	0.1	15.0
Crystal analyser spectrometer.	1	10	0.2
Magnetism diffractometer	15	5	14.0
High resolution spin echo	0.3	10	0.13
Wide angle spin echo	3	10	0.35
Backscattering	0.3	10	0.13
❌ Bispectral chopper spectrometer	50	10	1.2
Fundamental physics beamline	0.5	0.1	
Vertical sample reflectometer	0.5	1	1.2
Conventional SANS	5	10	0.45
Grazing incidence SANS	5	10	0.45
❌ Thermal chopper spectrometer	20	10	1.0
Extreme conditions spectrometer	1	10	0.2
Extreme conditions diffractometer	10	1	6.0
General purpose powder diffractometer	30	2	6.5
Hybrid diffractometer with SANS & imaging	10	1	3.0
SPeED engineering diffractometer	10	1	2.0
Test beamline	1	10	0.2
TOTAL	283.6		62.61

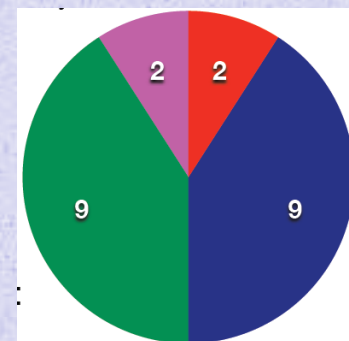
Общая площадь детекторов нейтронов превышает 280м². Более половины площади приходится на три установки - **Chopper spectrometers** (80, 50 и 30м²).

Создание детекторов, не использующих He-3, будет развиваться по следующим трем базовым направлениям, что требует серьезных финансовых вложений (R&D) и серьезных усилий международного сообщества:

- ⁶LiF/ZnS и В₂O₃/ZnS сцинтилляционные детекторы с WLSF считыванием информации;
- газовые детекторы с твердотельным конвертором ¹⁰B;
- позиционно чувствительные газовые детекторы на базе BF₃.



Размещение ESS.



Количество установок с детекторами различной площади в ESS:

Large area;
Medium area, high resolution;
Small area – less of 1m²;
Ultra resolution/imaging

Что нам в России (в ПИЯФе) грозит так называемый «He-3 кризис»?

Анализ потребности в He-3 для ведущих мировых нейтронных центров			
Нейтронные центры	Эксплуатация детекторов и научные исследования	НОВЫЕ детекторы с маленькой апертурой	НОВЫЕ детекторы с большой апертурой
	[liter / year]	[liter]	[liter]
ORNL (SNS)	100	1,300	25,000
ORNL (HFIR)	100	1,210	2,500
Los Alamos	100	1,994	12,362
NIST	100	560	40
BNL	50	180	
FRM II	100	650	4,500
HZ Berlin	100	520	7,850
ILL	100	1,000	3,000
JCNS	40	15	7,200
LLB	50	600	600
PSI	50		2,000
STFC	100	400	11,300
J-PARC	100	40	16,100
JRR-3	31	71	
KAERI	150		2,000
CSNS	200		21,000
Итого	1,431	8,540	115,372
Реактор ПИК	10	900	0

Источники получения He-3 в Европе практически отсутствуют, а его стоимость стала очень высокой.

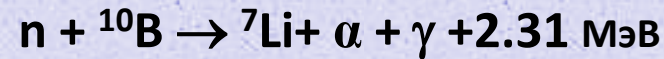
Поэтому Европейское научное сообщество начало активные поиски альтернативных конверторов нейтронов и принципиально новых конструкторских идей построения детекторов, которые могли бы заменить детекторы на базе He-3.

В России гелий-3 доступен, а его цена в несколько раз ниже Европейской.

Поэтому детекторы нейтронов на базе **гелия-3** – это наше конкурентное преимущество перед Европой, что, несомненно, надо максимально использовать.

Потребность экспериментальных установок реактора ПИК в He-3 невелика и составляет около **900 литров**, что многократно меньше потребности каждого сколько-нибудь значимого национального или международного нейтронных центров.

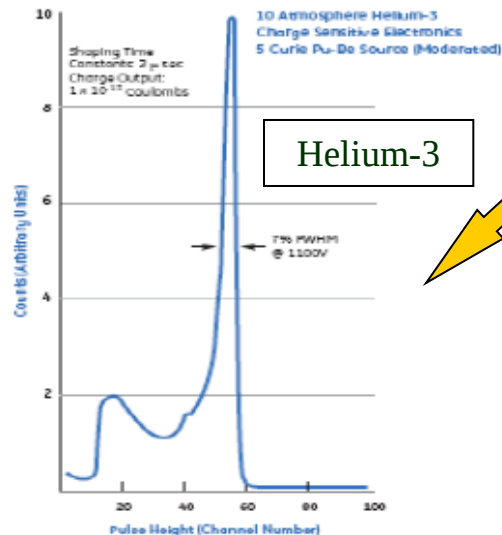
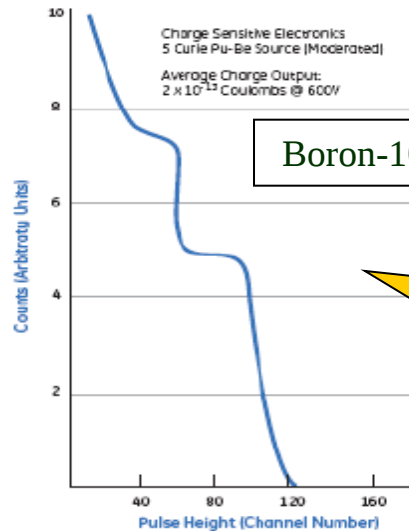
10-Бор Конвертор.



Детекторы с конвертором 10-Бор

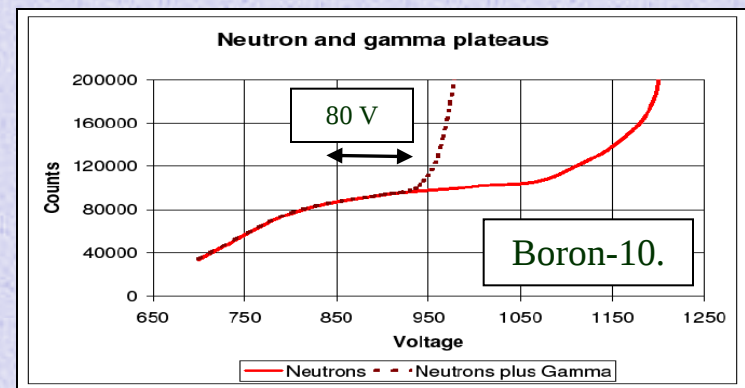
Энергетическое разрешение

Typical Differential Pulse Height Spectrum



- эффективность детектирования тепловых нейтронов для слоя толщиной 2 μ m в лучшем случае составляет 2%;
- необходимо иметь многослойную конструкцию для обеспечения достаточно хорошей эффективности;
- многослойная структура увеличивает чувствительность к гамма-фону;
- детекторы с конвертором на базе 10-Бор **НЕ имеют** четко выраженного энергетического пика, что крайне затрудняет режекцию гамма-фона.

3He-detectors имеют хорошее энергетическое разрешение, которое позволяет подавить гамма-фон на очень высоком уровне - лучше $\leq 1 \cdot 10^{-7}$.



Мировое нейтронное сообщество по-прежнему рассматривает газоразрядные **He-3 детекторы**, как базовое направление развития на последующие как минимум 10 лет.

Это связано с **выдающимся сочетанием характеристик детекторов**, использующих **He-3** в качестве конверторов нейтронов, что и определило историческую ориентированность нейтронных центров на применение подобных детекторов в экспериментальных установках.

Уникальное сочетание высокой эффективности регистрации нейтронов и низкой чувствительности к гамма-фону.

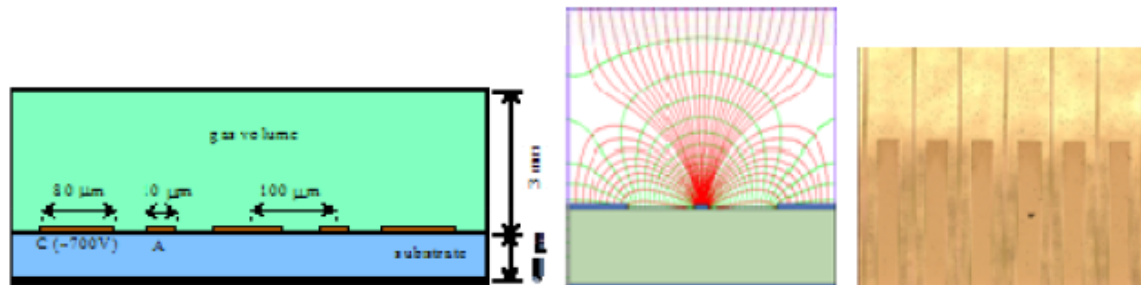
Переход на другие, развиваемые сегодня детекторные технологии, имеющие в своей основе **конверторы ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$** , в значительной степени носит **вынужденный характер**, и имеет своей целью удешевить приборы, отказавшись от применения He-3 в детекторах большого объема.

Предполагается, что **за следующие пять-семь лет** эти технологии достигнут такого уровня, что детекторы по своим основным параметрам **смогут приблизиться к параметрам He-3 детекторов**.

Мировые тенденции в детектировании нейтронов

Основные направления развития детекторных технологий:

1. Газовые детекторы на базе **He-3** конверторов нейтронов (MWPC, мульти-счетчиковые детекторы, микроструктурные детекторы – MSGC).
2. Развитие **сцинтилляционных детекторов** на основе твердотельных конверторов и спектро-сдвигающих оптических волокон.
3. Создание **газовых детекторов на основе твердотельного конвертора ^{10}B** (straw tubes, GEM, Micromegas).
4. Развитие газовых детекторов на основе **газового конвертора BF_3** .



Микростриповая газовая камера MSGC

Порошковые дифрактометры реактора ПИК

Таблица 4.5		<i>Порошковые дифрактометры</i> реактора ПИК				
Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора (мм), апертура (градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/элемент)	Простр. разреш. X, мм	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
D1 - Суперпозиционный многосекционный порошковый дифрактометр	1.2 ÷ 2.5	1D He-3 детектор типа “банан” (угол охвата 160)	а) до 1×10^6 б) $< (1 \times 10^5)$	3 5	>60	зал ГЭК
D2 - Многосчетчиковый порошковый дифрактометр холодных нейтронов	2 ÷ 5	2D He-3 детектор типа “банан” (угол охвата 150)	а) до 1×10^5 б) $< 1 \times 10^4$	10мм (X) +движение на 10мм 2-3см (Y)	>60	НВ зал
D3 - Порошковый многодетекторный дифрактометр тепловых нейтронов	1.5 ÷ 2.4	1D He-3 детектор типа “банан” (угол охвата 165)	а) до 1×10^6 б) $< (1 \times 10^5)$	3 5	>60	зал ГЭК

Кристаллические дифрактометры реактора ПИК

Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора(мм), апертура(градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/см ²)	Простр. (угловое) разреш. X×Y, мм (градус)	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
DC1 - Четырехкружный дифрактометр	0.8 ÷ 3	2D детектор; 300×300	а) до 1×10 ⁵ б) <(1×10 ⁴)	5×5	>60	зал ГЭК
DC2 - Дифрактометр поляризованных нейтронов		Создаваться не будет				
DC3- Монокристалльный дифрактометр для исследования высокомолекулярных соединений	≥4	2D He-3 детектор; 300×300	а) до 1×10 ⁶	2×2	>60	НВ зал
		2D Image-Plate детектор; 800 400	а) до 1×10 ⁶	≤ 1		
DC4 - Дифрактометр поляризованных нейтронов с двухмерным детектором POLDI	1.0 ÷ 3,6	2D детектор; 300 × 300	а) до 1×10 ⁶ б) <(1 × 10 ⁵)	2	50÷80	зал ГЭК
DC5 - Дифрактометр на совершенных кристаллах DCD, ультрамалоугловое рассеяние нейтронов	2.3 ÷ 4.4	Три пропорционал, He-3 счетчика	а) до 1×10 ⁶ б) <(1 × 10 ⁵)	-	>60	НВ зал (вакуум)
DC6 - Текстуриный дифрактометр TEX	0.5 ÷ 1.0	2D детектор; 300 × 300	а) до 1×10 ⁶ б) <(1 × 10 ⁵)	1×1	50÷70	зал ГЭК
DC7 Стресс-дифрактометр ARES (для измерения остаточных напряжений)	1.6 ÷ 2,3	2D He-3 детектор; 300 × 300	а) до 1×10 ⁶ б) <(1 × 10 ⁵)	2×2	50÷70	зал ГЭК
DC8 - Универсальный нейтронный дифрактометр UND		Создаваться не будет				

Спектрометры неупругого рассеяния реактора ПИК

Таблица 4.7.		<i>Спектрометры неупругого рассеяния</i> реактора ПИК				
Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора(мм), апертура(градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/см ²)	Простр. (угловое) разреш. X×Y, мм (градус)	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
IN1 - Трехосный спектрометр тепловых нейтронов	0,7÷1,28*)	счетчик 50 ×	а) до 1×10 ⁵	-	50 ÷80	зал ГЭК
IN2 - Трехосный спектрометр холодных нейтронов	2.4÷6.0	He-3 счетчик высокого давления	а) до 1×10 ⁵	-	50 ÷80	НВ зал
IN3 - Трехосный спектрометр поляризованных нейтронов SPIN	1÷5*)	счетчик 50 × (5 элементов)	а) до 1×10 ⁵	-	50 ÷80	зал ГЭК
IN4 - Многопортовый спектрометр по времени пролета	5÷20	2D He-3 детектор; 1000 ×1000 мм, 0,1 ÷7,5	а) до 1×10 ⁵ б) <(1×10 ⁴)	10 × 10	80	НВ зал (вакуум)
		1D He-3 счетчики; (300шт.) угол охвата 8 ÷148	а) до 1×10 ⁵	-	>70	НВ зал
IN5 - Модифицированный спин-эхо спектрометр SEM	1,6 -5,0	2D-ПЧД 500х500	а) до 1×10 ⁵ б) <(1×10 ⁴)	(XY)	70-80	НВ зал (вакуум)

Малоугловые установки реактора ПИК

Таблица 4.8.		<i>Малоугловые установки</i> реактора ПИК				
Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора(мм), апертура (градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/см ²) в) максимальный фоновый счет. соб/с)	Простр. (угловое) разреш. X×Y, мм (градус)	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
S1 - Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов TENZOR	4÷20	2D He-3 детектор; 1000×1000	а) до 1×10 ⁵ б) <(1×10 ⁴) в) 0,1 *)	2÷4	≥70	НВ зал (вакуум)
S2 - Малоугловой дифрактометр MEMBRANA	4÷20	2D He-3 детектор на базе LSPC; 1000×1000	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	8÷10	≥70	НВ зал (вакуум)
S3 - Установка спин-эхо ультрамалоуглового рассеяния SESANS	4÷20	2D He-3 детектор; 250×250	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	2	≥70	НВ зал (вакуум)
S4 - Установка малоуглового рассеяния поляризованных и неполяризованных нейтронов SANS-2	4÷20	2D He-3 детектор; 500×500	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	5	≥70	НВ зал (вакуум)
S5 - Установка малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов SANS-3 = PNR	4÷20	2D He-3 детектор; 500×500	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	1.5÷2.0	≥70	НВ зал (вакуум)

Рефлектометры реактора ПИК

Таблица 4.9.		Рефлектометры реактора ПИК				
Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора(мм), апертура (градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/см ²) в) максимальный фоновый счет. (соб/с)	Простр. (угловое) разреш. X×Y, мм (градус)	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
R1 - Рефлектометр поляризованных нейтронов с вертикальной плоскостью отражения REVERANS	5,5	2D; 200×200	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	1 ÷ 1.5	70÷80*)	НВ зал
		1D; Пропорцион. счетчики	а) до 1×10 ⁵	-	70÷80*)	
R2 - Нейтронно-оптический рефлектометр NORMA	1) 4.5-5.5 2) 3÷15 (TOF)	2D; 250×500	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	2.0 в плоскости рассеяния	70÷80*)	НВ зал
		2D монитор	а) ~10 ⁷ *)	2÷4	1÷5	
		Пропорцион. счетчик	а) до 1×10 ⁵	-	70÷80	
R3 - Рефлектометр с векторным анализом поляризации UNISON	1) 4.5-5.5 2) 3÷15 (TOF)	2D; 250×500	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	2.0 в плоскости рассеяния	70÷80*)	НВ зал
		2D монитор	а) ~10 ⁷	2÷4	1÷5	
		Пропорцион. счетчик	а) до 1×10 ⁵	-	70÷80*)	
R4 - Рефлектометр на поляризованных нейтронах с анализом поляризации NERO	4.35	2D; 250×250	а) до 1×10 ⁶ б) <(1×10 ⁵) в) 0,1 *)	3.0	70	НВ зал
		1D; Пропорцион. счетчик	а) до 1×10 ⁵	-	70÷80	

Предварительная классификация детекторов нейтронов, которые будут использованы на экспериментальных установках реактора ТИК

	Газовый конвертор нейтронов (He-3)		Твердотельные конверторы нейтронов (Li-6 и B-10)	
	Пропорциональные счетчики и 2D модули на базе LSPC счетчиков	2D ПЧД	Сцинтилляционная технология	Твердотельные детекторы
Порошковые дифрактометры	3 (D1, D2, D3)			
Кристаллические дифрактометры		3 (DC1, 3, 5)	3 (DC3, 4, 6)	
Спектрометры неупругого рассеяния	2 (IN4)	1 (IN2)	3 (IN 1, 3, 5)	
Малоугловые установки	2 (S2, S3)	3 (S1, S4, S5)		
Рефлектометры	4 (R1 R4)	4 (R1 R4) + 2(R2,R3)		
Количество детекторов	11	13	6	

All detectors	
Загрузочная способность	Число детекторов
до 1×10^5 n/s	6
up to 1×10^6 n/s	22
up to 1×10^7 n/s	2
TOTAL	30

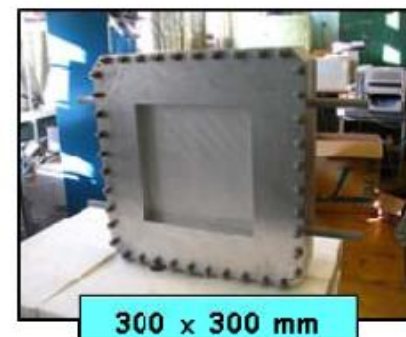
All detectors	
Чувствительность к гамма-фону	$< 1 \times 10^{-7}$
Фоновый счет, соб/с	$< 0,1$

Стратегия развития детекторных технологий для реактора ПИК

ПИК является высокопоточным реактором, в несколько раз превосходящим реакторы предыдущего поколения по интенсивности пучков. В новых экспериментальных установках на реакторе ПИК должны использоваться **самые современные** устройства детектирования нейтронного излучения, что позволит нейтронным исследованиям достичь такой эффективности, которая ещё 15 – 20 лет назад казалась недостижимой.

Стратегия развития нейтронных детекторов в ПИЯФ НИЦ КИ имеет два основных направления:

- 1. газонаполненные детекторы**, использующие в качестве преобразователя нейтронов изотоп гелия ^3He .
- 2. детекторы с твердотельным преобразователем:**
 1. как световые (сцинтилляторы),
 2. заряженных частицах (газоэлектронные усилители ГЭУ, пропорциональные счётчики и т.д.).



SAMMARY

1. Проводимая в ТИЯФ политика оснащения экспериментальных установок детекторами нейтронов должна основываться на двух базовых принципах:

- Каждый разрабатываемый детектор должен соответствовать **индивидуальным требованиям** экспериментальной установки.
- **Детектор и его регистрирующая электроника** должны надежно работать в составе экспериментальной установки в условиях реального физического эксперимента

2. ТИЯФ располагает технологиями необходимыми для разработки и создания детекторов нейтронов **на базе He-3 технологии** с апертурой до 300 300mm, которая гарантирует выполнение комплекса требований, предъявляемых к современным детекторам нейтронов.

3. Для того, чтобы обеспечить работу детекторов нейтронов на высокоинтенсивных пучках реактора ТИК, необходимо:

- для пучков с интенсивностью до $1 \cdot 10^5$ - **все есть и работает ОК;**
- для пучков с интенсивностью до $1 \cdot 10^6$ - **ясно, что надо делать;**
- для пучков с интенсивностью до $1 \cdot 10^8$ ($\sim 10^5$ n/cm²/s) - **необходимы новые технологии (GEM и т.д.).**

4. Необходима **«интернационализация» усилий** по созданию наиболее перспективных детекторов нейтронов. В частности:

4.1. Создание детекторов нейтронов для Нейтронных Дифрактометров с апертурой 1000×1000mm (и даже более), работающих в интенсивных нейтронных полях, целесообразно базировать на технологии **2D-пропорциональных счетчиков**. Необходима коллаборация с **Julich Centre for Neutron Science (JCNS)**.

4.2. Для успеха деятельности по направлению **сцинтилляционных технологий** необходимы **объединенные усилия**, которые целесообразно начинать **на базе разработок ЛНФ (ОИЯИ)**. ОИЯИ имеет наибольший опыт в разработке широкоформатных сцинтилляционных детекторов на основе пластика ZnS(Ag). Ими создано несколько детекторов, успешно действующих на ИБР-2, ИР-8 (НИЦ КИ) и ИВВ-2М (ИФМ УрО РАН). В ТИЯФ (НИЦ КИ), ЛНФ (ОИЯИ) и ИЯИ (РАН) сформированы группы специалистов, профессионально занимающиеся сцинтилляционными детекторами и уже имеющие интересные наработки.

