



# Газоразрядные детекторы нейтронов для ПИК

Дмитрий Ильин

Отдел трековых детекторов  
ОФВЭ, ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина  
[digatchi@list.ru](mailto:digatchi@list.ru)

# Содержание

- Инструменты реактора ПИК:
  - *Параметры требуемых детекторов*
  - *Стратегия оснащения детекторами*
- Газонаполненные детекторы:
  - *«Наследие» HZG (установки первой очереди)*
  - *Собственные технологии в ПИЯФ*
    - ПЧД на основе MWPC
    - Особенности нашей технологии
  - *Новые направления и разработки*
    - 2D профилометр
    - 2D Straw-детектор
    - Прототип с конвертером В4С
- Заключение

# Инструменты ПИКа



1) ФКС - 22 установки

2) ЯФ & ФЭЧ - 10 установок:

Различного типа детекторы  $n$ ,  $e$ ,  $p$ ,  $\gamma$ -частиц

ФТТ установки (шт.)	Счетчики	ПЧД (1D/2D)
1. Порошковые (3)	-	3
2. Однокристалльные (4)	-	5
3. Спектрометры (5)	4	2
4. МУРН (6)	1	6
5. Рефлектометры (4)	4	6
<b>ИТОГО</b>	<b>9</b>	<b>22</b>

Основная часть ПЧД с чувствительной областью до  $1 \times 1$  м!

# ПЧД (1D / 2D)

Чувств. область, мм	Кол-во	Применение
1) ~100×100 и другие	По числу установок	Мониторы, профилометры пучка
2) 200×200 – 300×300	11	Реф., Стресс – дифр., Однокр., ...
3) 400×400 – 500×500	3	Реф., МУРН
4) 1000×1000	2	МУРН, Неупр.
5) Curved (~160°) “banana-like”	4	Порошк., Неупруг.
	ВСЕГО: 22	

## Параметры ПЧД:

- Область регистрации (X\*Y)
- Длины волн
- Простр. разрешение
- Загрузочная способность (весь детектор)

100 ÷ 1000 мм

$\lambda \sim 0.5 \div 20 \text{ \AA}$

1 ÷ 10 мм

$1 \times 10^5 \div 1 \times 10^7 \text{ соб./sec}$

Нет универсальной технологии!

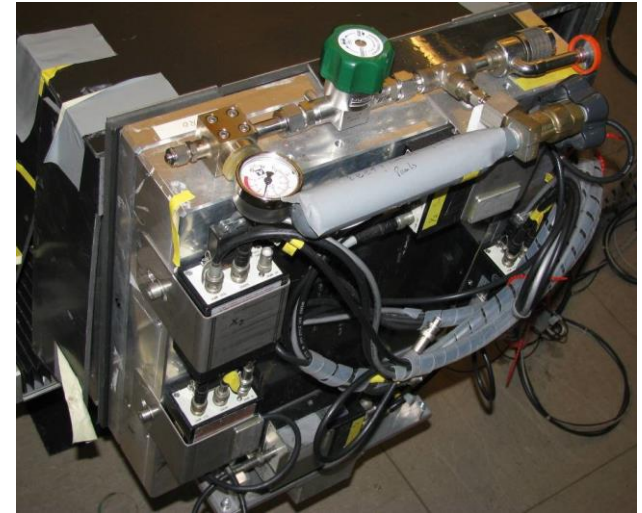
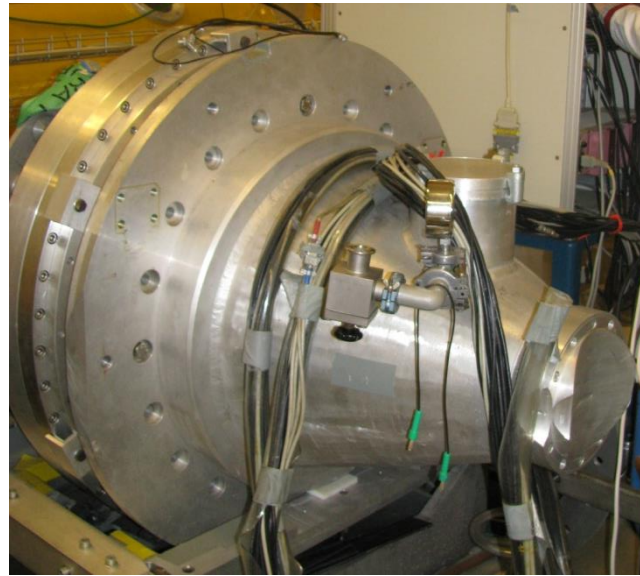
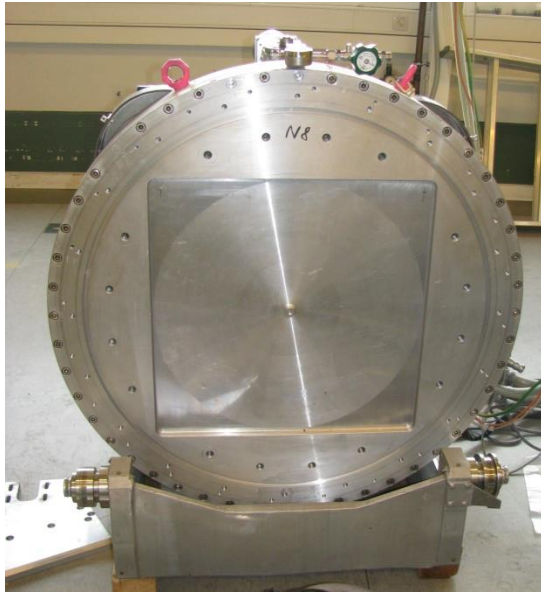
Требуются различные конструктивные решения!

# Стратегия развития газоразрядных детекторов для установок РК ПИК

- 1)  **$^3\text{He}$ -ориентированная технология** детекторов остается приоритетной
  1. Основные требования современных установок удовлетворяются с помощью современных  $^3\text{He}$ -детекторов (ILL - 90%, J-PARC - 75%, ESS - 20%, Julich - 70%):
    - а) высокая эффективность регистрации
    - б) высокая загрузочная способность
    - в) хорошее пространственное разрешение
    - г) очень низкая гамма-чувствительность
  2. **Потребность  $^3\text{He}$**  для детекторов ПИК невелика: **~900 литров** (+ 1-2 %/год)
  3. **ПИЯФ имеет квоту на покупку  $^3\text{He}$**  (ПО «МАЯК»), стоимость существенно ниже экспортной (в 2÷2.5 раза)
- 2) **Технология на основе твердотельного конвертера  $\text{B}_4\text{C}$**  является перспективной, и сейчас активно развивается в Европе для ESS
- 3) **Для ряда установок на ПИК целесообразно использовать сцинтилляционные детекторы**

## **Детекторы из HZG**

## Детекторы из HZG (Geesthacht, Germany)



### Двухкоординатные детекторы (5 шт.)

**POLDI**  
**SANS-2**  
**SANS-3**

Окно 500×500 мм

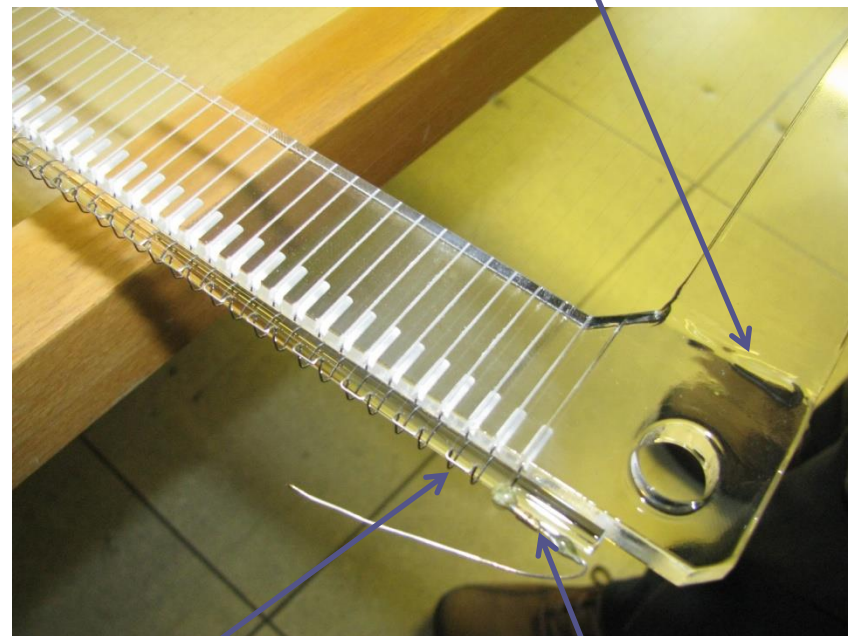
**PNR**  
**NERO**

Окно - 250×250 мм

Метод съема сигналов – деление заряда

X и Y катоды в виде меандра из проволоки высокого сопротивления

## Электрод детектора 500\*500 мм (ноу-хау)



- Сварной электрод
- Меандр из проволоки натянут на «пальцы» и зафиксирован стеклянным стержнем
- «Пальцы»-пружины вставлены в «колодцы» в торцах

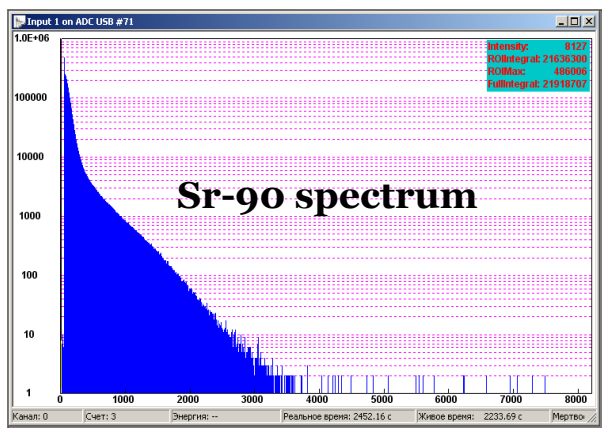


# Испытание и проверка детекторов (ОТД ОФВЭ): PNR det. 250\*250 мм

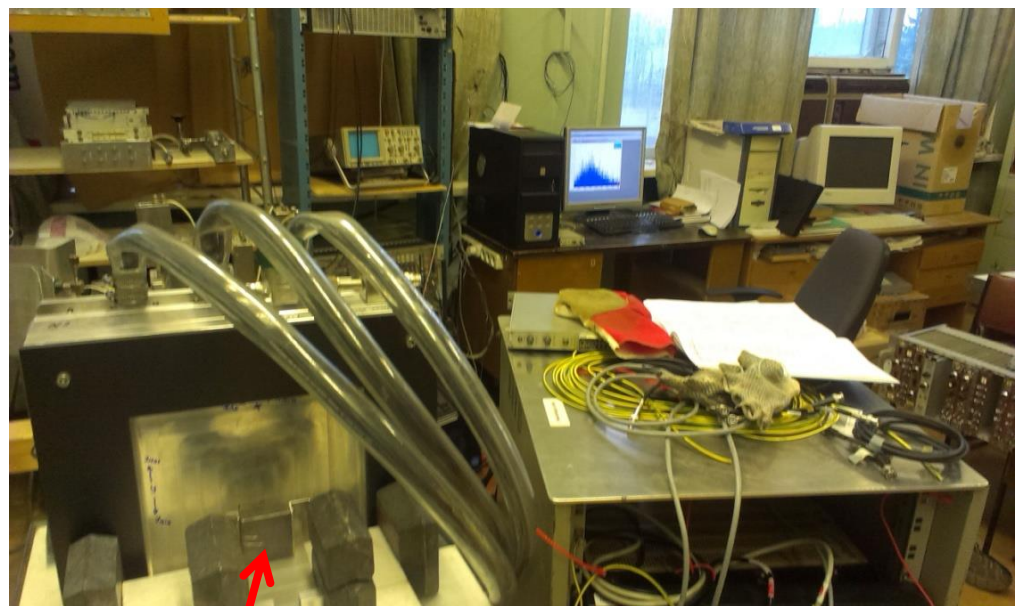
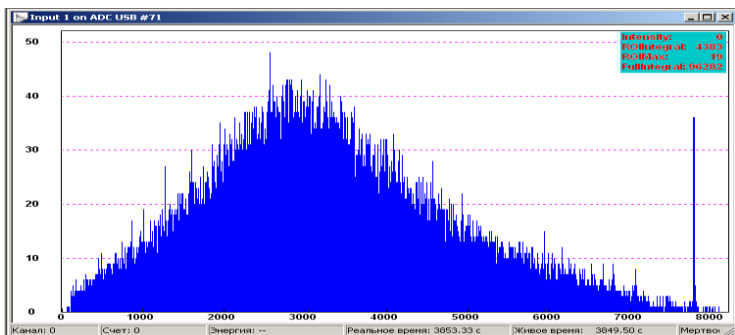
**До 2018г необходимо  
проверить/запустить все детекторы**

- 1) Герметичность : вакуум/давление
- 2) Проверка MWPC
- 3) Электроника

- Gas: 60%Ar+30%CO<sub>2</sub>+10%CF<sub>4</sub>, 1 Atm
- Sr-90
- H<sub>va</sub>=2.05 kV, HV<sub>ds</sub>=0V (for HV<sub>ds</sub>=-300V counting is +20%)



- X-coordinate (X- Linear Gate Stretcher 442)



**Sr-90**

## РАЗРАБОТКИ ПИЯФ

2D ПЧД с площадью регистрации до 300×300 мм

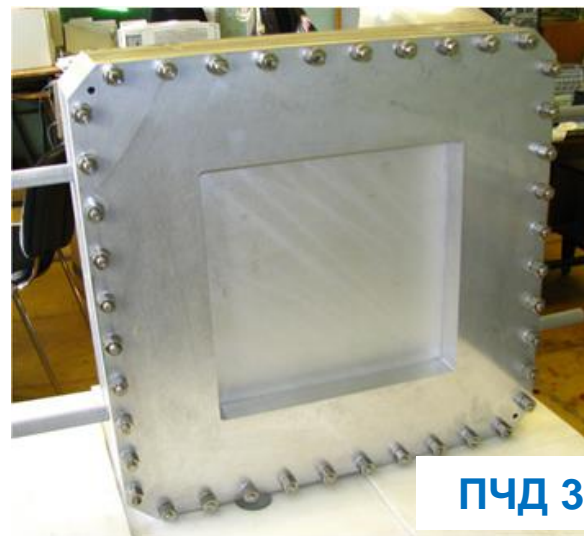
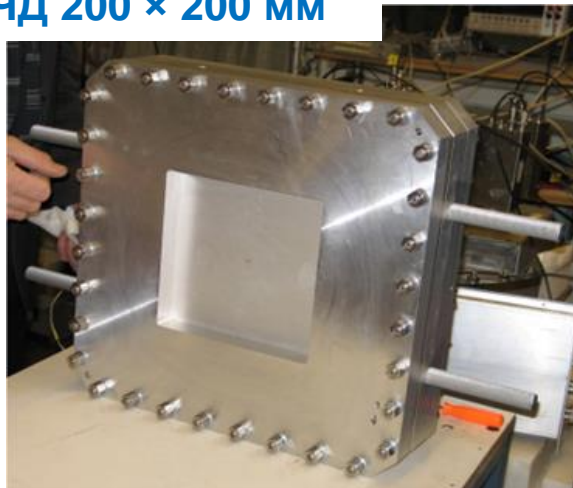
Задел ПИЯФ (Госконтракт 02.518.11.7036 от 2006г, рук. Рунов В.В.)

### **Коллаборация:**

- ОИКС ОНИ
- Отдел трековых детекторов ОФВЭ
- Отдел радиоэлектроники ОФВЭ
- Отдел автоматизации экспериментов ОНИ
- ЛКСТ ОФВЭ
- ЦЭТО и КБ ПИЯФ
- СПб ГТИ
- ЦНИИ им. А.Н.Крылова

# Наши детекторы для ВВР-М

ПЧД 200 × 200 мм



ПЧД 300 × 300 мм

Параметр	Детектор для МУРН “Мембрана-2”	Детектор для МУРПН “Вектор”
Входное окно, мм	200×200	300×300
Газовая смесь ( $^3\text{He}+\text{CF}_4$ ), бар	4 + 2	2 + 2
Эффективность (оптимизирована), % ( $\lambda$ )	70 (3 Å)	72 (9 Å)
Простр. разрешение $FWHM$ ( $X \times Y$ ), мм	1.6×2.0	1.5×2.0
Съем информации	LC-DL (Z=100 Ом)	LC-DL (Z=100 Ом)
Темновой счет, Гц	<0.2	<0.3
Загрузка (ПВК 10% просчетов), кГц	125	125
$\gamma$ -чувствительность (по $^{137}\text{Cs}$ ), ×100%	<2×10 <sup>-8</sup>	<2×10 <sup>-8</sup>
Время эксплуатации (без замены газа), лет	>5 (с 2008 г.)	>5 (с 2008 г.)

# Особенности технологии изготовления

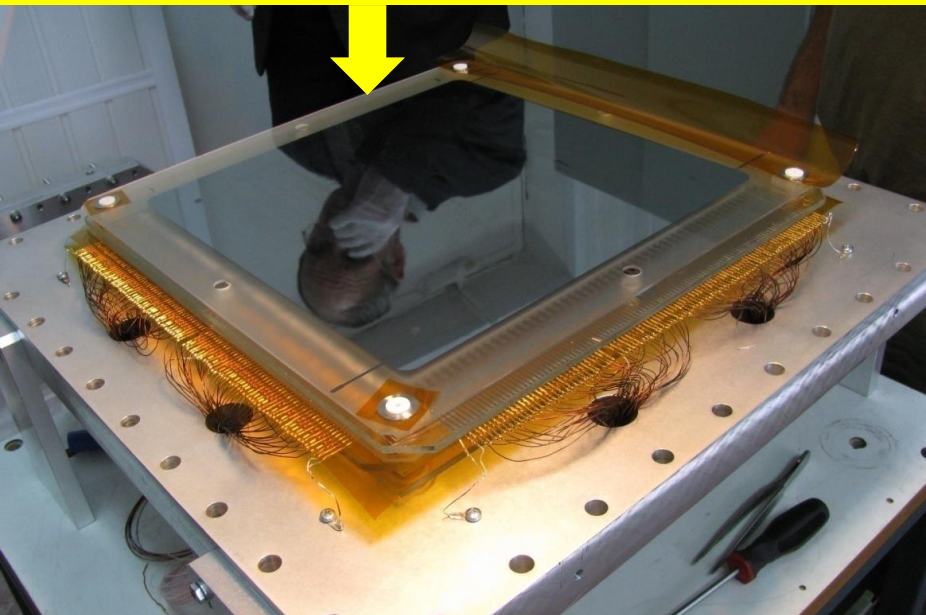
**Ресурс = сохранение чистоты рабочего газа**

Все электроды изготовлены из специального стекла

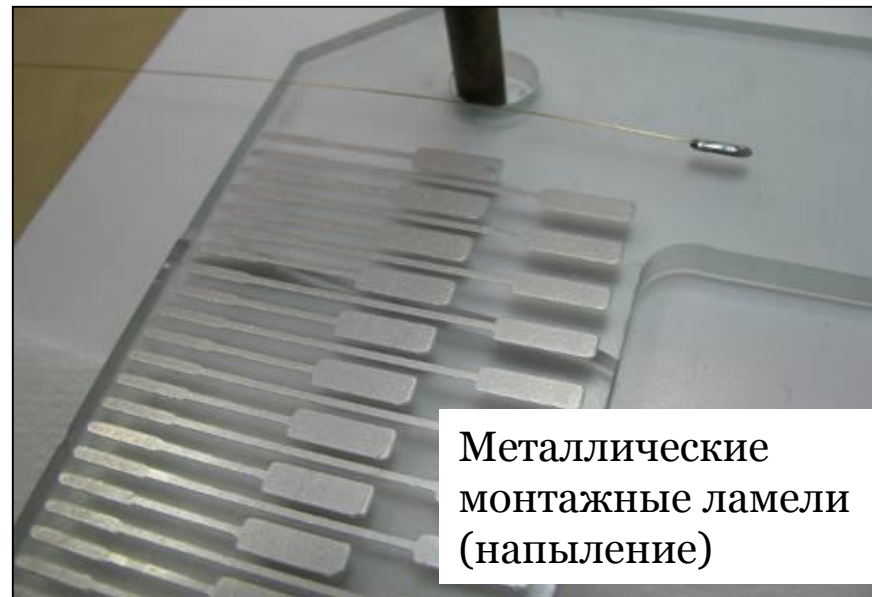
**Решены две задачи:**

1. Использование высоковакуумных материалов в детекторе, обеспечена чистота газовой смеси
2. Высокое качество герметизации детекторов, стабильность давления

**Зеркальный верхний дрейфовый электрод**



**Собранный пакет электродов**



Металлические монтажные ламели (напыление)

## **Возможности технологии**

1. **Чистота рабочего объема** - возможность продолжительного вакуумирования с нагревом до 100-120 °С
2. **Ремонтопригодность** - многократная пайка проволочек
3. **Надежность** - высокая степень адгезии ламелей (механика+температура)

**Результат:**

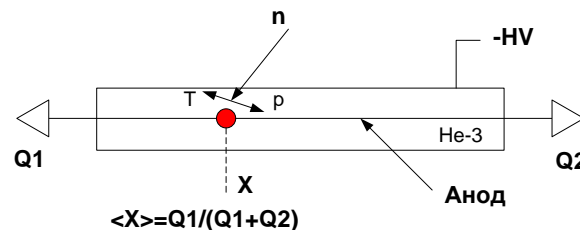
**Гарантированный ресурс работы - 5 лет**

## Новые разработки и проекты

- **Двухкоординатный детектор на основе линейно-чувствительных счетчиков**
- **Профилометр-монитор прямого пучка**
- **Прототип ПЧД с конвертером нейтронов  $B_4C$**

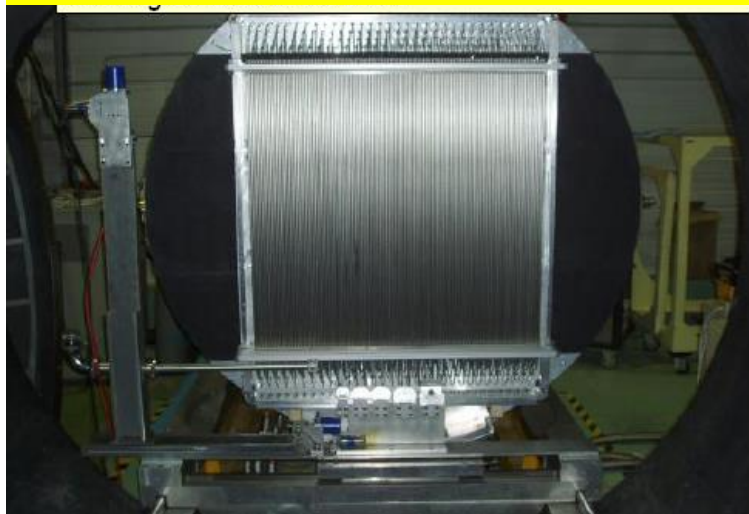
# 1. 1D/2D - детекторы на основе Л-Ч счетчиков (примеры)

- Длина 1 м и более
- Диаметр  $6 \div 50$  мм
- Площадь регистрации  $1 \div 30$  (и более) м<sup>2</sup>
- Координаты:
  - вдоль счетчика - деление заряда ( $\sim 1\%$  длины)
  - в поперечном направлении - номер счетчика (диаметр)



- Стоимость в 2 раза ниже MWPC аналога (расход He-3)

SANS D22, ILL, Grenoble



**Площадь  $\sim 1$  м<sup>2</sup>**

Дл. – 1 м, диам. – 8 мм

Загрузка до 5 МГц

Давление газа – 15 Бар

Эфф. - 75 % (5 А)



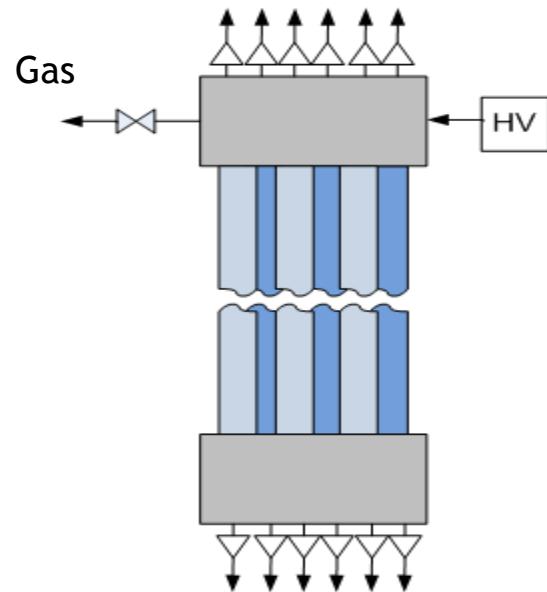
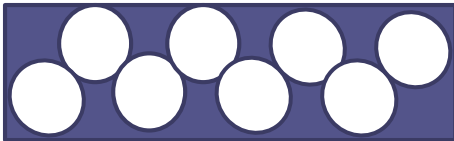
IN5 , ILL, Grenoble

**Площадь  $\sim 30$  м<sup>2</sup>**

## 2D He-3 детектор большой площади (LSPC array, L=115cm)

- Предлагается модульная конструкция детектора
- Каждый модуль из 8-10 счетчиков

### Модуль из 8 счетчиков



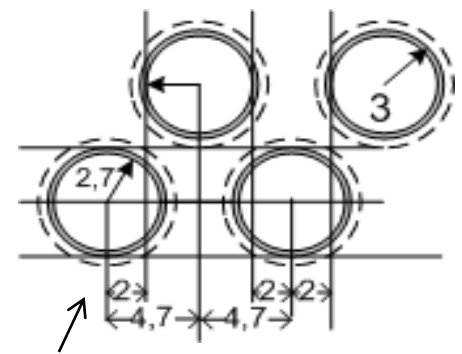
### Возможности

- 1) Высокая эффективность (60-90%) в широком диапазоне  $\lambda = 1 \div 20 \text{ \AA}$
- 2) Минимальные потери на рассеяние и поглощение в стенках (катод - S.S., 200 мкм)
- 3) Минимизация неоднородности эффективности и КГУ (одинаковое давление газа в сборке)
- 4) Модульность = надежность + легче обслуживать и ремонтировать
- 5) Большие площади произвольной кривизны
- 6) Экономия He-3

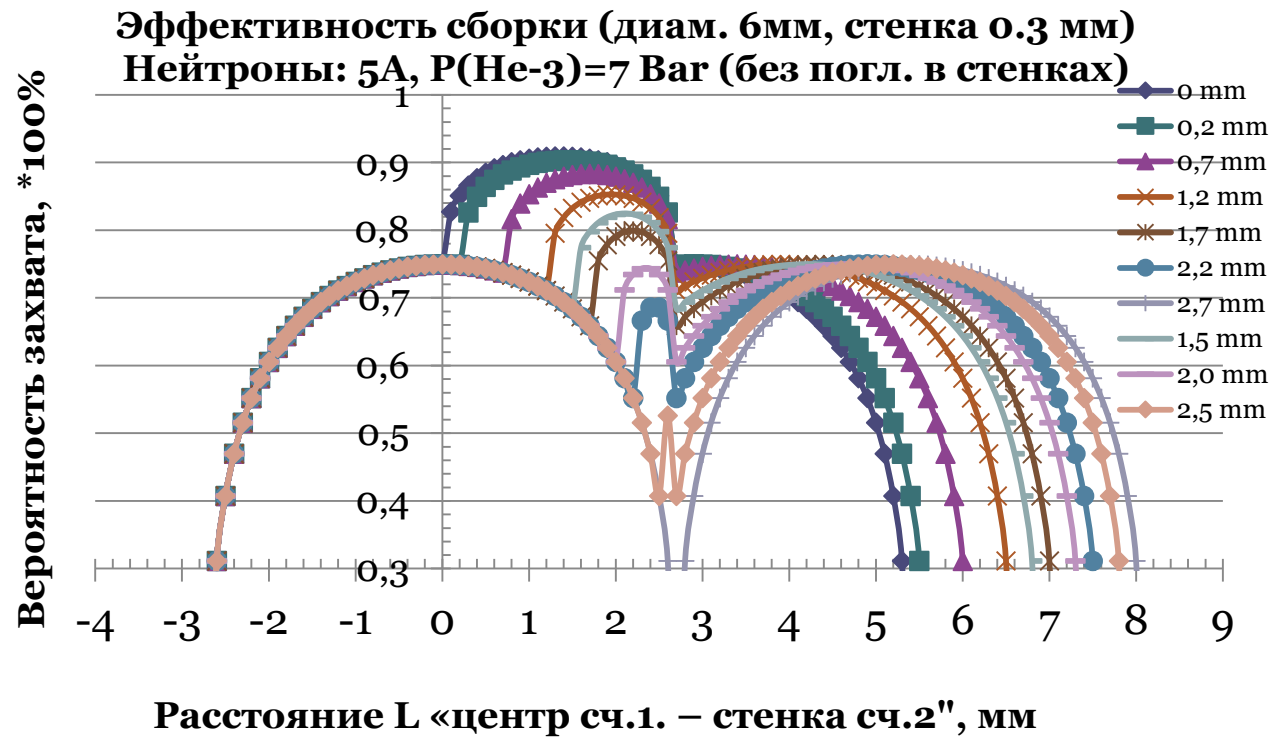
# Одна из задач: однородность эффективности по площади

## Входные параметры:

- Диаметр счетчика
- Толщина стенки
- Длина волны нейтронов
- Давление He-3



**L – определяет степень перекрытия соседних счетчиков**





# Прототип 1D счетчика

**Катод** – нерж. сталь, диам. 10 мм,  
Стенка – 200 мкм,  $L=115$  см

**Анод W-Au**, диам. 15 или 25 мкм  
Более высокая радиационная  
устойчивость чем обычная Ni/Cr  
проволочка.

## Метод съема

Вдоль счетчика – метод деления заряда



## Тесты счетчиков:

- HV испытания
- Выс. давл. до 12 атм.
- Герметичность по He-4

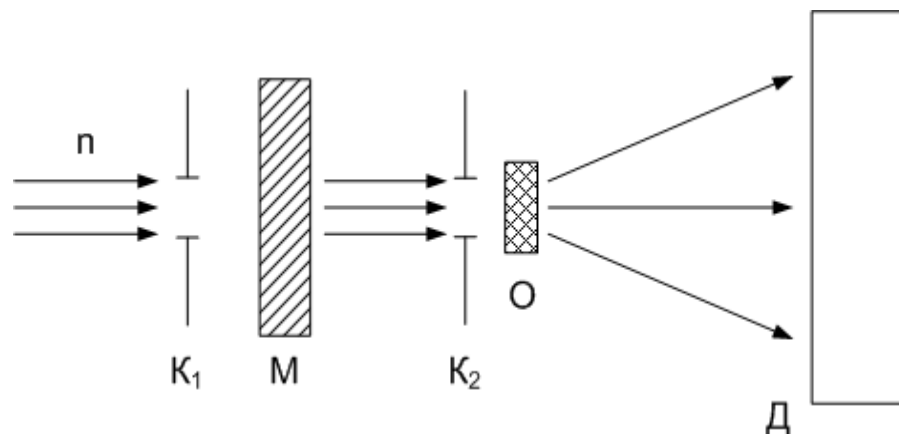
**Пространственное разрешение вдоль счетчика (по Fe-55)**

А.В. Надточий (ОРЭ ОФВЭ)

**FWHM ~ 1.5-2 % от длины L**

**Нужна поддержка R&D!**

## 2. Монитор-профилометр



$K_1$  и  $K_2$  — коллиматоры пучка

$M$  — монитор

$O$  — исследуемый образец

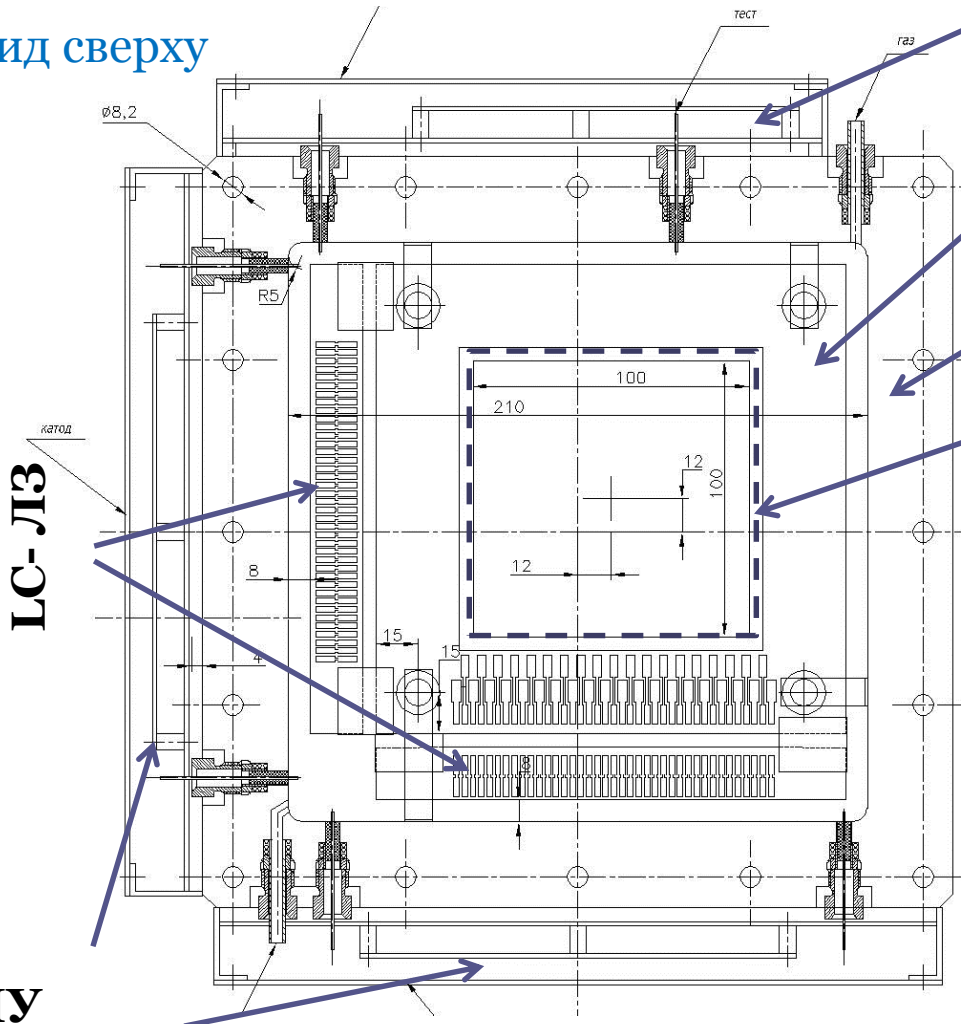
$Д$  — детектор рассеянного потока нейтронов

### Назначение:

- 1) **эксперимент** - получение профиля и интенсивности пучка в живом времени
- 2) **монтаж установки** – настройка/оптимизация нейтронной системы

# Чертеж монитора

Вид сверху



Предусилители, LV

MWPC

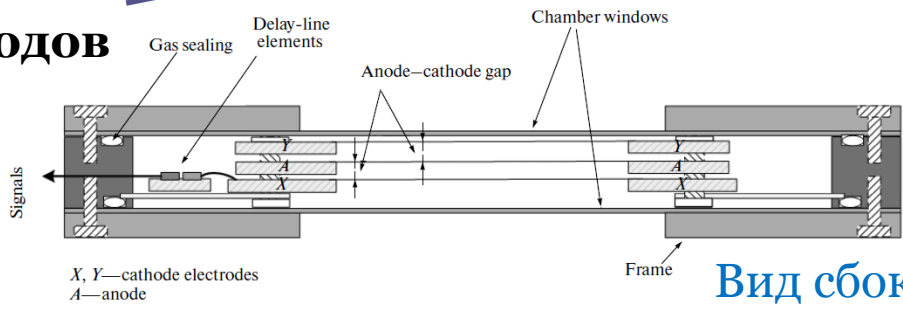
Газовый объем

Чувствительная область

Состояние проекта:

- Разработка завершена
- Проведен отбор и исследование материалов на масс-спектрометре (Швецова Н.Ю., ОТД ОФВЭ)
- Готовы к производству прототипа, ищем \$

ПУ  
КАТОДОВ



Вид сбоку

## Расчетные характеристики монитора

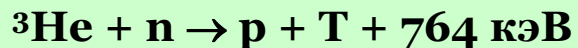
Рабочие характеристики  
можно адаптировать!

- Размер чувствительной области		100 × 100 мм
- Толщина монитора по пучку		~50 мм
- Трансмиссия тепловых нейтронов		>95% ( $\lambda=1.8\div 9 \text{ \AA}$ )
- Максимальная плотность потока нейтронов		до $I=10^8 \text{ н}/(\text{см}^2\text{с})$
- Метод съема сигналов		LC-линия задержки
- Рабочая газовая смесь	выс. поток->	He-3/CF <sub>4</sub>
	ср. поток->	N <sub>2</sub> /CF <sub>4</sub>
- Давление рабочего газа		P(абс.)= 1 Атм.
- Эффективность регистрации ( $\lambda=1.8 \text{ \AA}$ ):		~0.1% (He-3 газ. смесь), ~10 <sup>-4</sup> % (N <sub>2</sub> газ. смесь).
- Пространственное разрешение по обеим координатам (FWHM):		3÷4 мм
- Ресурс		> 5 лет
- Стоимость		аналог Mirrotron в 3÷3.5 раза дороже

**Средние потоки до  $10^6 \text{ н}/\text{см}^2/\text{с}$**

**(ВВР-М)**

1) Газовая смесь: 5% <sup>3</sup>He + CF<sub>4</sub>, н.у.



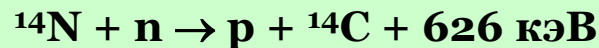
$\sigma=5300 \text{ барн}$

2) Эффективность ~0.1 % ( $\lambda=1.8 \text{ \AA}$ )

**Высокие потоки до  $10^8 \text{ н}/\text{см}^2/\text{с}$**

**(ПИК)**

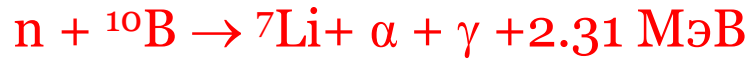
1) Газовая смесь 5% N<sub>2</sub>+ CF<sub>4</sub>, н.у.



$\sigma=1.9 \text{ барн}$

2) Эффективность ~10<sup>-4</sup> % ( $\lambda=1.8 \text{ \AA}$ )

### 3. Газоразрядные детекторы с борным конвертером $B_4C$



- **Оптимальная толщина слоя конвертера определяется величинами:**

$$R_\alpha = 3.14 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\lambda_n = 19.9 \text{ }\mu\text{m} \Rightarrow R/\lambda_n = 0.16$$

$R_\alpha$  – средний пробег  $\alpha$ -частицы

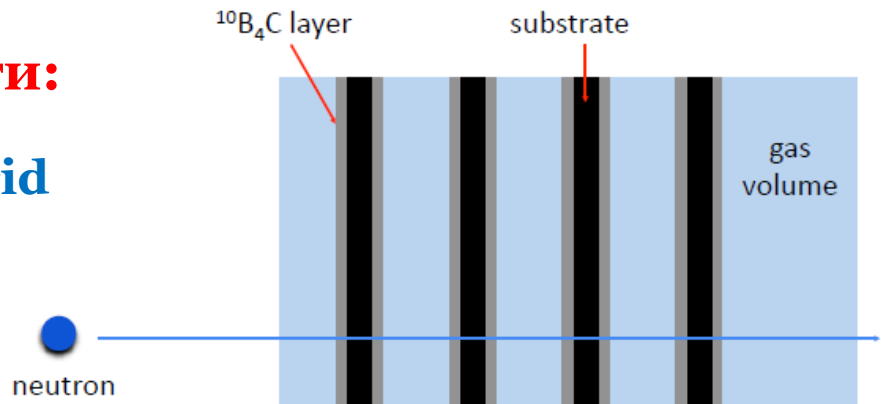
$\lambda_n$  – длина своб. пробега  $n$  с энергией  $E$

- **Эффективность регистрации одного слоя (опт. толщ.)  $< 5\%$  (1.8 Å)**

#### Пути увеличения эффективности:

##### 1) Многослойки: MultiGrid

Из доклада R.Hall-Wilton, NSAC#1, 2015, ПИЯФ

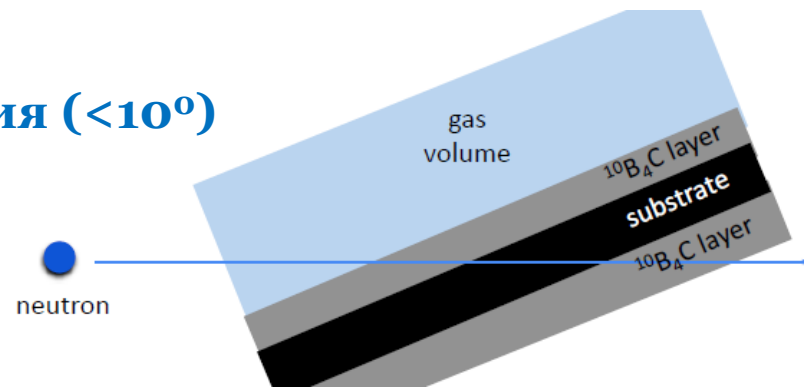


##### 2) Скользящая геометрия ( $< 10^\circ$ )

ESS:

- ${}^{10}B$  – 70% детекторов (8 из 12) в TDR (2014)
- Оба подхода в отношении 50/50

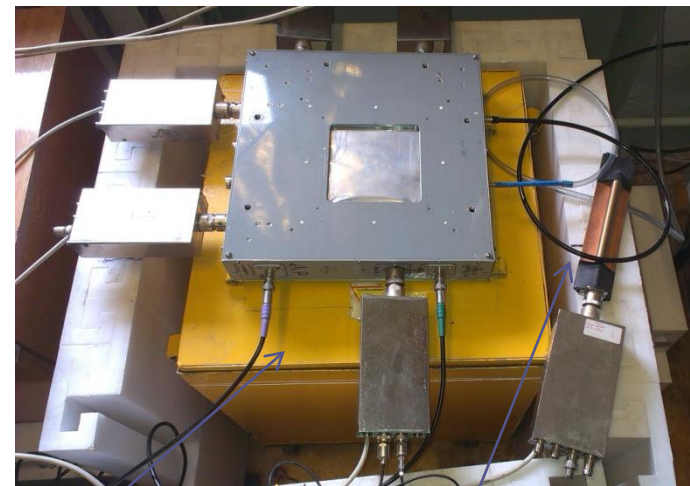
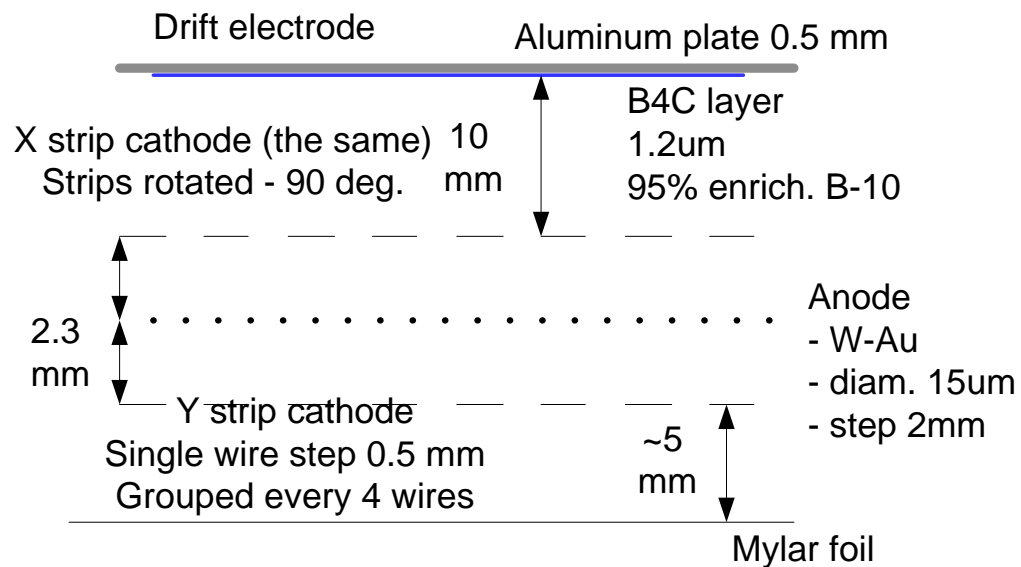
arXiv: 1411.6194



# Газоразрядный детектор с $B_4C$ конвертером (прототип)

## MWPC

X,Y – LC-delay line readout



Газосмесительная установка (4 кан.)  
ANSYCO SYCOS KV/4M

# Сравнение амплитудных спектров: В10 и He-3

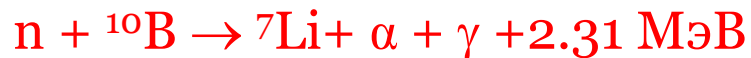
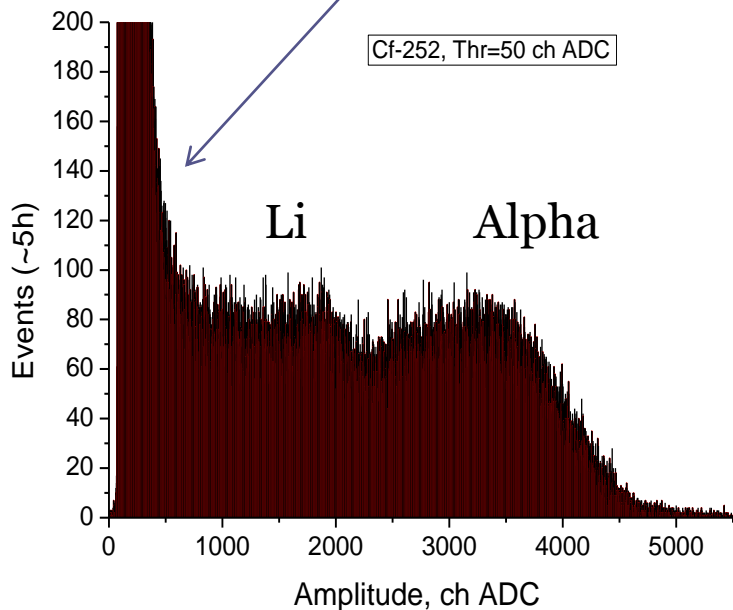
**MWPC + 1 слой В4С**

Газ: 100% CF<sub>4</sub> (н.у.)

HV<sub>a</sub>=1750 V

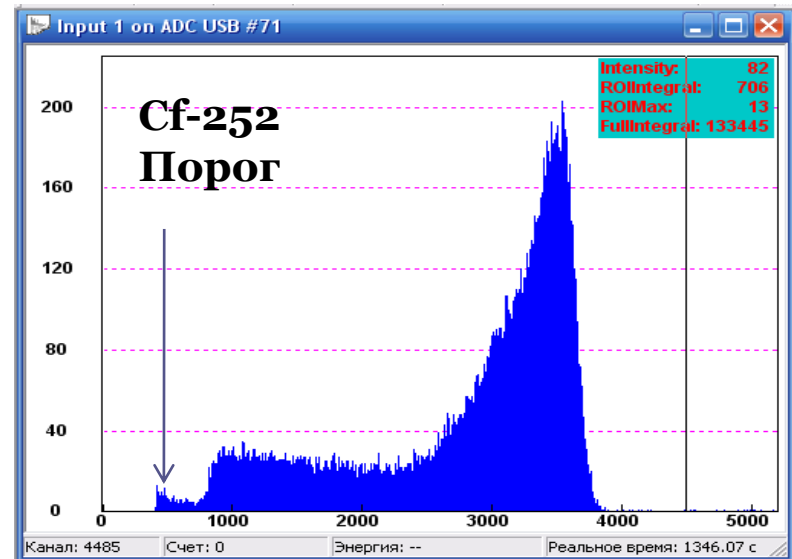
HV<sub>dr</sub>=-1000V

«Хвост» есть всегда!



**He-3 счетчик СММ-50**

HV=2200В



## Первые испытания в 2D режиме

Спасибо Рунову В.В., Голубеву Г.С., Диденко Г.П.!

Источник -  $Pu(Be)$

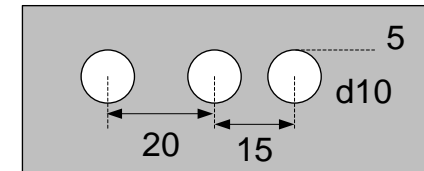
Расстояние «источник - детектор» 6 см

Диаметр отверстий - 10 мм

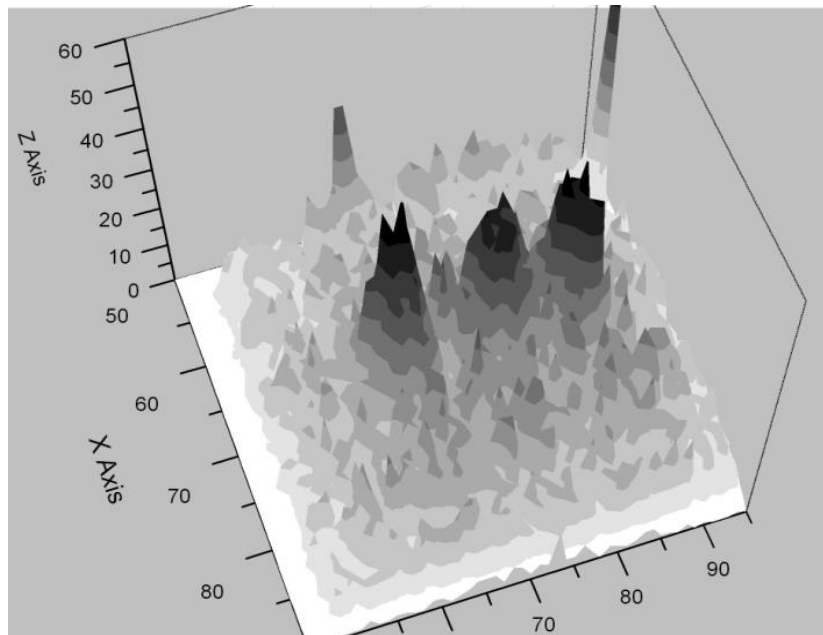
Защита - борированный полиэтилен

### Коллиматор

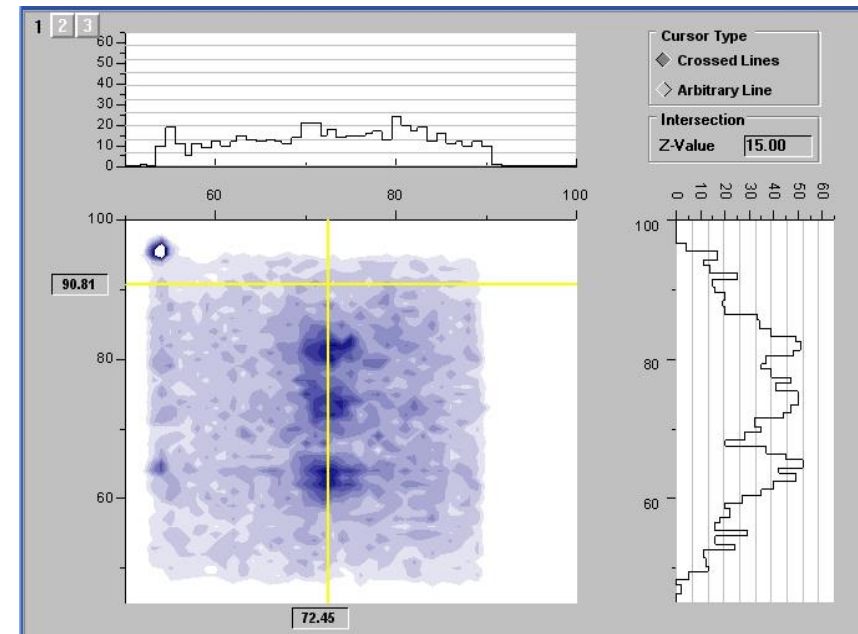
Cd, thickness 1mm



Профиль пучка: X, Y, число событий



Рабочая область 100\*100 мм



- Необходимы детальные исследования на пучке
- Где?



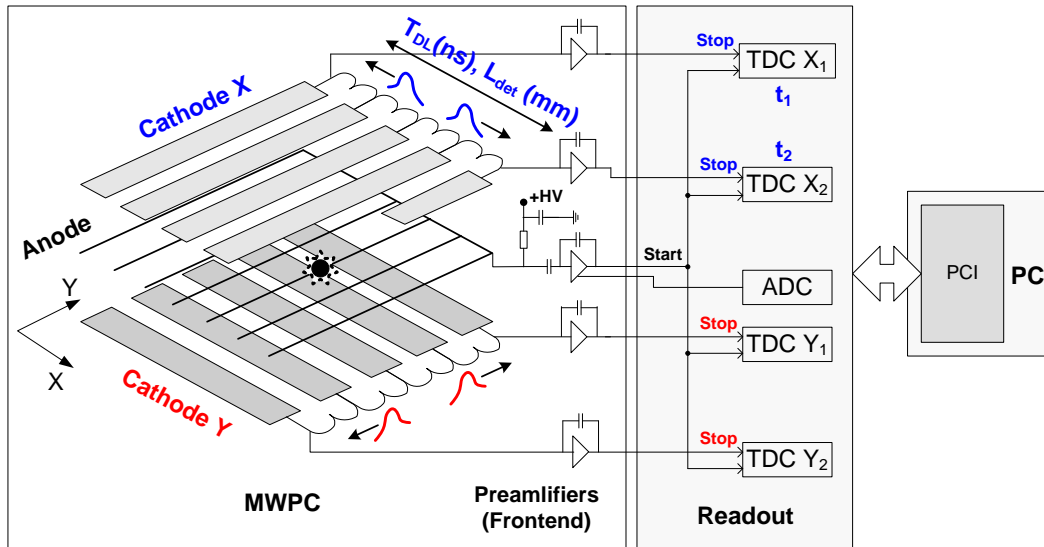
# Заключение

- 1. Несмотря на «мировой He-3 кризис», в России можно и нужно изготавливать He-3 детекторы.** Для атомной отрасли/геологии He-3 счетчики производятся в промышленных масштабах (см. закупки АЭС)
- 2. ПИЯФ имеет собственные успешные разработки - ПЧД с входным окном до 300×300 мм - самый массовый класс детекторов на ПИКе! Мы готовы адаптировать технологию для высоких загрузок!**
- 3. Новые проекты детекторов - нужна централизованная поддержка на R&D!**
  - 1) Большие ПЧД для SANS & Inelastic Sp. (1×1 м и более)
  - 2) Мониторы/профилометры - собственные потребности на ПИК 20-30 шт.
- 4. Новые технологии конвертеров B10, электродов (MSGC, GEM и др.) требуются для самых интенсивных пучков**

Развитие видится при сотрудничестве с центрами HZG, ILL, ESS и др. (они готовы!)
- 5. Нельзя забывать про сцинтилляторы, которые составляют эффективную комбинацию с газовыми детекторами**
- 6. Централизованная поддержка детекторного направления, сохранение/развитие инфраструктуры**

Спасибо!

# Detector design and readout electronics



- **Anode** – central in detector volume, wire space – **2 mm**
- **Cathode distance from anode 3 mm**,
- **Width of cathode strip – 3 mm**
- Two **drift regions – 12 mm** per each
- Delay line readout.
- Number of readout channels – **5**

- **Count rate capability – 125000 events/s** (10% miscalculation level)

## 4-Channel TDC PCI-version

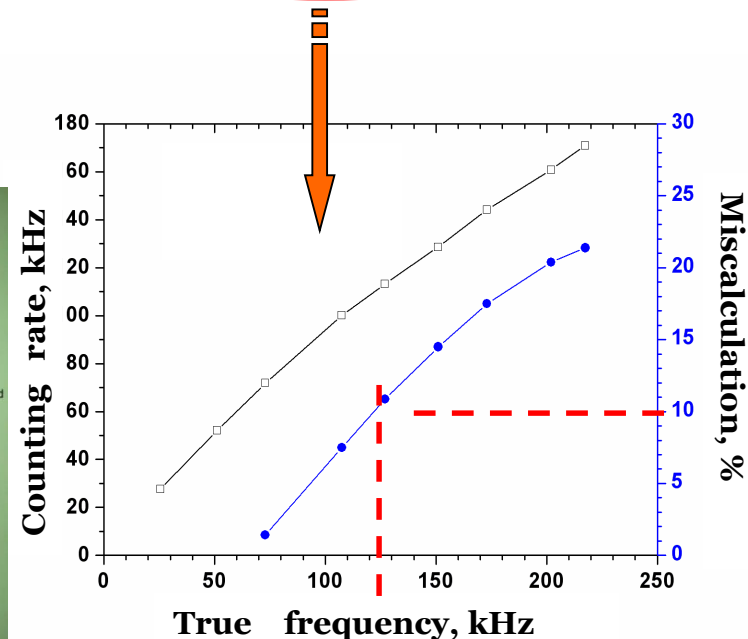
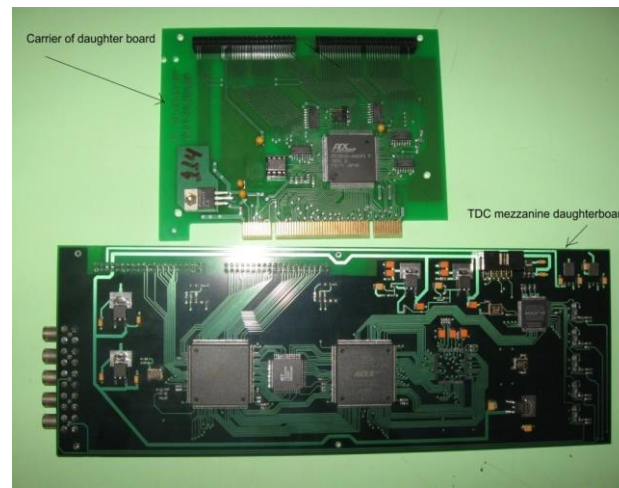
### PNPI Collaboration

- Neutron Experiment Automation Division, NRD, Valery A. Solovei
- Radio-Electronics Department, HEPD, Alexander V. Nadtochy

- **TDC range**  
~ 1  $\mu s$ , (130 ps/channel)
- **Diff. nonlinearity** < 5%
- **Dead time** 2  $\mu s$

### Inputs (NIM):

- 1) Anode “Start”
- 2) Cathode “Stop” (X1, X2, Y1, Y2)



# Readout electronics (TDC)

## VME-version

- TDC range      ~ 600 ns, (150 ps/channel)
- Diff. nonlinearity   <5%
- Counting rate      100 kHz (25% miscalc.)
- Dead time         5  $\mu$ s
- ADC                5 V, 1024 ch.

### Inputs (NIM/TTL):

- 1) Anode "Start"
  - 2) Cathode "Stop" (X1, X2, Y1, Y2)
- + «Amplitude» (ADC)



## PNPI Collaboration

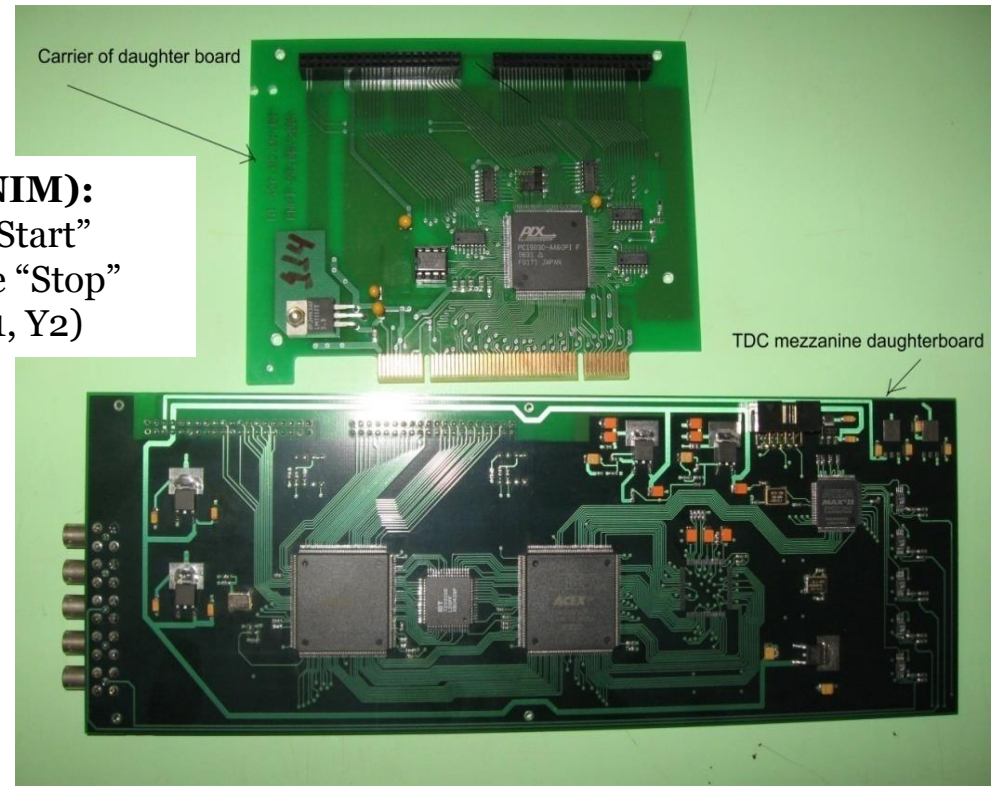
- Neutron Experiment Automation Division, NRD, Valery A. Solovei
- Radio-Electronics Department, HEPD, Alexander V. Nadtochy

## PCI-version

- TDC range         ~ 1  $\mu$ s, (130 ps/channel)
- Diff. nonlinearity   <5%
- Counting rate      125 kHz (10% miscalc.)
- Dead time         2  $\mu$ s

### Inputs (NIM):

- 1) Anode "Start"
- 2) Cathode "Stop" (X1, X2, Y1, Y2)



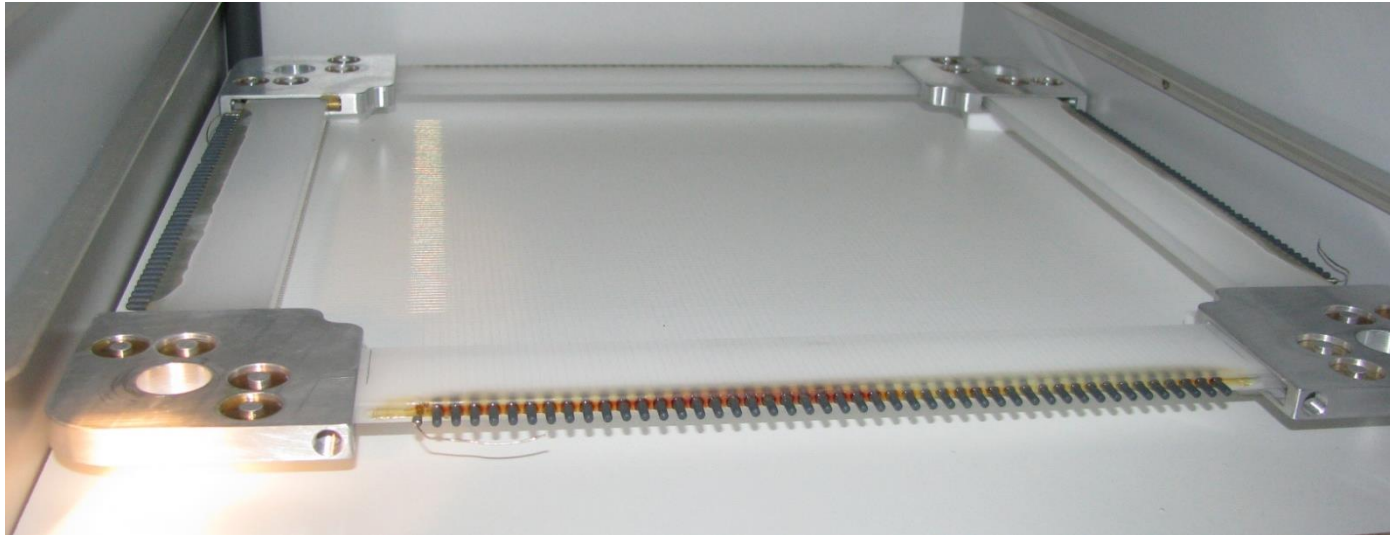
## Из буклета «Реакторный комплекс ПИК», ПИЯФ, т.2, 2014

**Раб. гр.:** Крившич А.Г., Гаврилов Г.Е., Ильин Д.С., Косьяненко С.В., Куликов С.А.  
**Под. ред.:** Воронин В.В., Григорьев С.В.

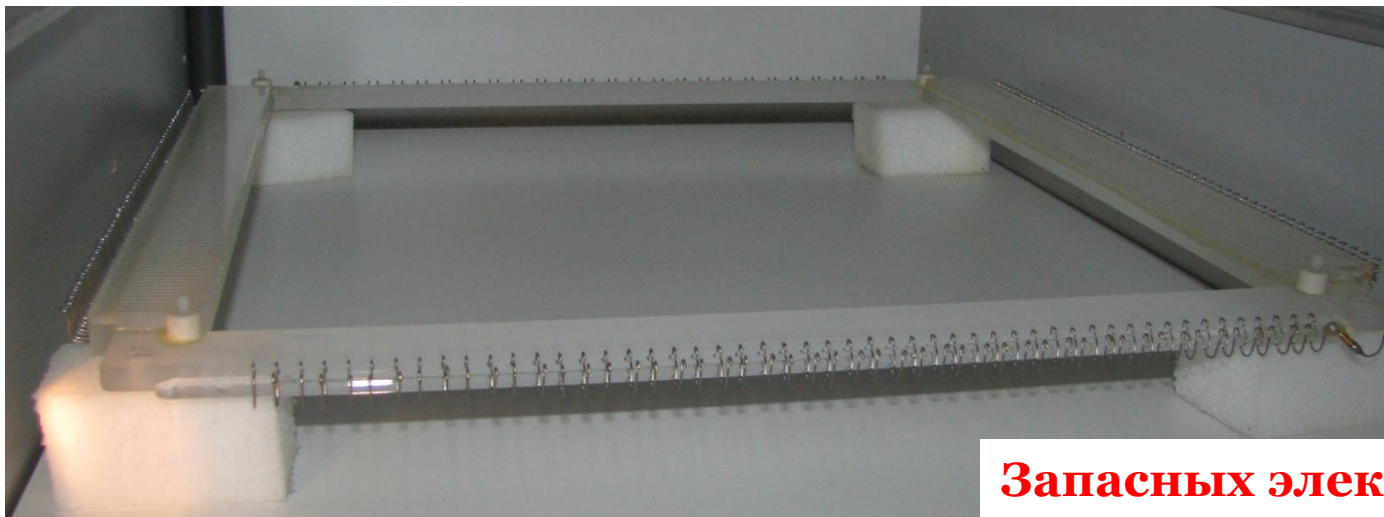
Таблица 4.8.		<i>Малоугловые установки реактора ПИК</i>				
Прибор	Длина волны, Å	Размерность и размер детектора(мм), апертура (градус)	Загрузка: а) интеграл (н/с), б) локальная (н/с/см <sup>2</sup> ) в) максимальный фоновый счет. (соб/с)	Простр. (угловое) разреш. X×Y, мм (градус)	Эффективность для λ (Å), %	Место размещения
S1 - Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов "Тензор"	4÷20	2D He-3 детектор; 500×500	а) $(1 \div 10) \times 10^4$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^3$ *) в) 0,1 *)	1.5÷2.0	70÷80	НВ зал (вакуум)
S2 - Малоугловой дифрактометр "Мембрана»	4÷20	2D He-3 детектор на базе LSPC; 1000×1000	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^4$ *) в) 0,1 *)	8÷10	70÷80	НВ зал (вакуум)
S3 - Ультра малоугловой дифрактометр DCD для физико-химических исследований (HZG)	2.3÷4.4	Три пропорциональн. He-3 счетчика	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ б) $<(1 \div 10) \times 10^4$	-	>60	НВ зал (вакуум)
S4 - Установка спин-эхо ультрамалоуглового рассеяния SESANS	1÷10	2D He-3 детектор; 250×250	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^4$ *) в) 0,1 *)	1	70÷80	НВ зал (вакуум)
S5 - Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов SANS-2	3÷20	2D He-3 детектор; 500×500	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^4$ *) в) 0,1 *)	5	> 60	НВ зал (вакуум)
		2D He-3 детектор; 500×500	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^4$ *) в) 0,1 *)			НВ зал
S6 - Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов SANS-3	3÷20	2D He-3 детектор; 300×300	а) $(1 \div 10) \times 10^5$ *) б) $<(1 \div 10) \times 10^4$ *) в) 0,1 *)	1.5÷2.0	70÷80*)	НВ зал (вакуум)

## Электроды детекторов 250\*250 мм – еще интереснее

Электроды с системой натяжения проволоки



Две плоскости на одной рамке



**Запасных электродов нет!**