

Современные позиционно-чувствительные детекторы нейтронов

Ильин Дмитрий

ФКС 2011

Экспериментальные установки и детекторы

Требования к детекторным системам на современных источниках нейтронов

Тип установки	Расстояние «образец-детектор»	Размер детектора/апертура	Размер пиксела (простр. разрешение)	Загрузка, Гц	Диапазон энергий нейтронов
Однокристалльный дифрактометр	< 1 м	2 π	< 1 мм ²	1 МГц	0.3 – 5 Å
Порошковый дифрактометр	1 м	π	5мм x 5 мм	0.1 МГц	0.3 – 5 Å
Дифрактометр для исследования неупорядоченной структуры	> 1 м	π	5мм x 50 мм	0.1 МГц	0.1 – 5 Å
Малоугл. дифр.	2- 10 м	1 м ²	1x1- 5мм x 5 мм	1МГц	1 – 20 Å
Неупругое изотроп. дифр.	2-6м	10 м ²	20мм x 20 мм	10кГц	1 мэВ – 1эВ
Радиограф/томогр		20мм x 20 мм	0.02мм – 0.2мм	1МГц	1 – 150 мэВ

Что приоритетно при выборе детектора?

- эффективность регистрации
- пространственное разрешение
- временное разрешение
- n/γ разделение
- площадь регистрации
- компактность
- низкая стоимость

Типы ПЧД

Детекторы счетного типа:

1. Газонаполненные детекторы
2. Сцинтилляционные детекторы
3. Полупроводниковые детекторы

- + высокая эффективность
- + низкий фон
- + n/γ разделение
- + временная информация

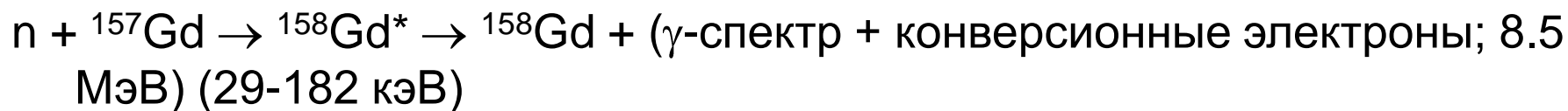
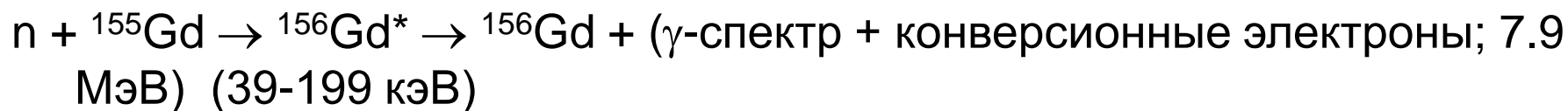
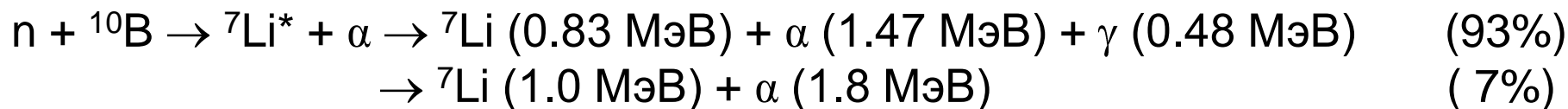
Детекторы фотографического типа:

1. Image plate
2. Сцинтилляционные детекторы+CCD

...

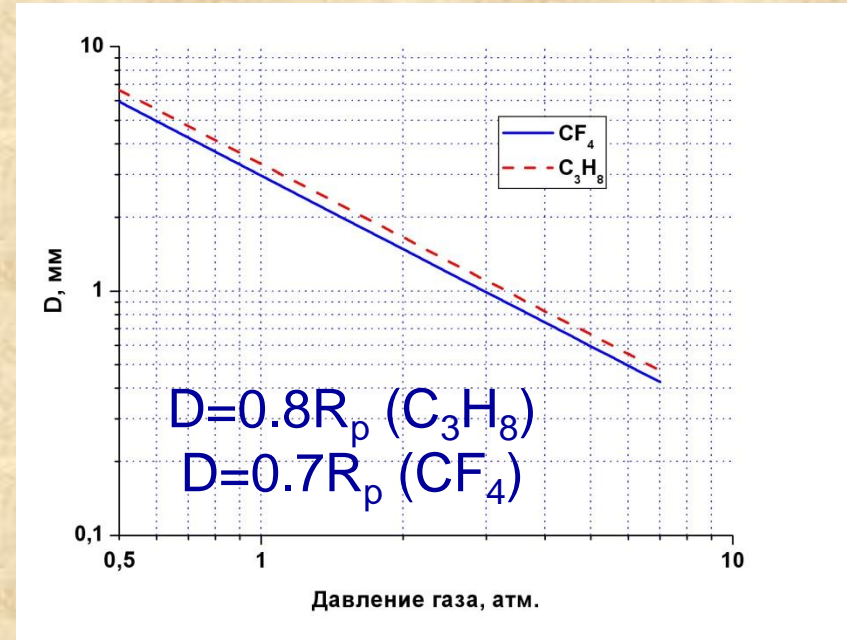
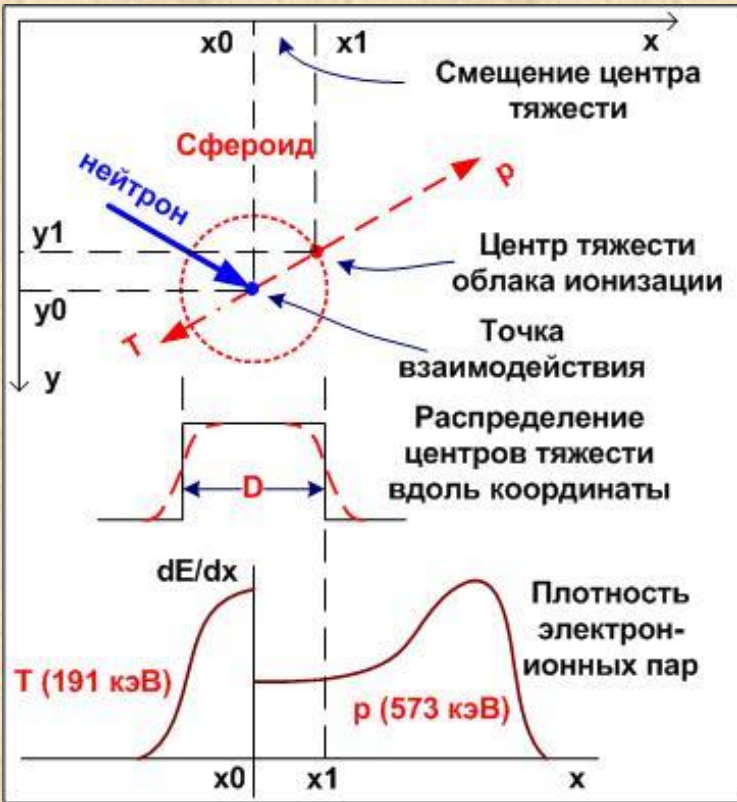
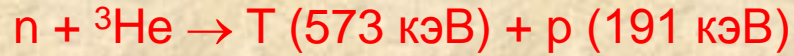
- + скорость счета
- + пространственное разрешение

Регистрация нейтронов



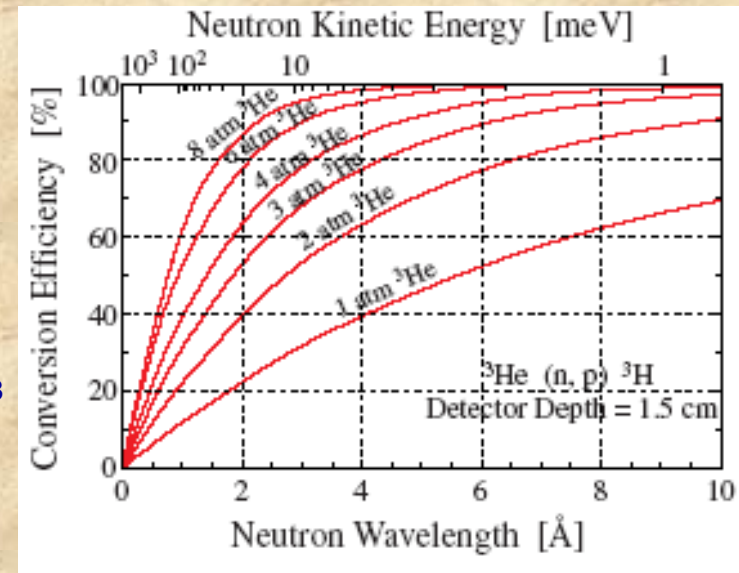
Изотоп	Агрегатное состояние	Сечение реакции, барн(1.8Å)	Длина своб. пробега n (λn)	Продукты реакции и их энергии (кэВ)		Приблизительный пробег частиц
³ He	газ	5330	70 мм.атм.	p: 573	T:191	3.8 мм.атм. C ₃ H ₈
⁶ Li	тв.	940	230 мкм	T: 2750	α: 2055	130 мкм
¹⁰ B	тв.	3840	20 мкм	α: 1472	⁷ Li: 830	3 мкм
¹⁰ BF ₃	газ	3840	97 мм.атм.	α: 1472	⁷ Li: 830	4.2 мм.атм.
¹⁵⁵ Gd	тв.	49000	6.7 мкм	Конв. электроны: 39-199		12 мкм
¹⁵⁷ Gd	тв.	254000	1.3 мкм	Конв. электроны: 29-182		12 мкм

Газонаполненные детекторы



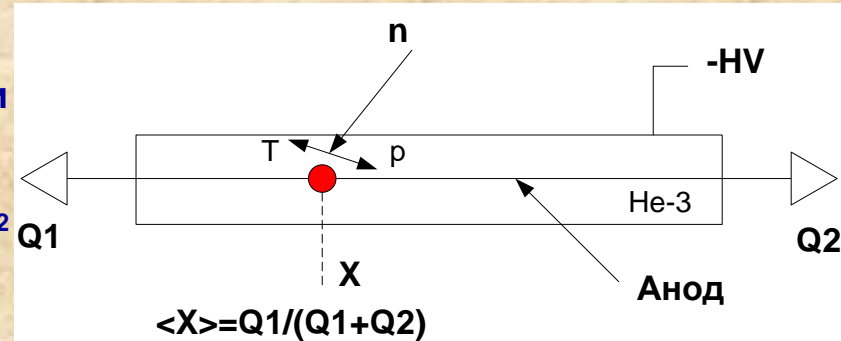
Характеристики и особенности:

- высокая эффективность регистрации 50-90% (1-4 Å)
- низкая чувствительность к гамма-излучению 10^{-7} - 10^{-8}
- пространственное разрешение $\text{FWHM} \geq 1 \text{ мм}$
- временное разрешение $\sim 1 \text{ мкс}$
- высокое давление газовой смеси
- пространственные ошибки, связанные с параллаксом

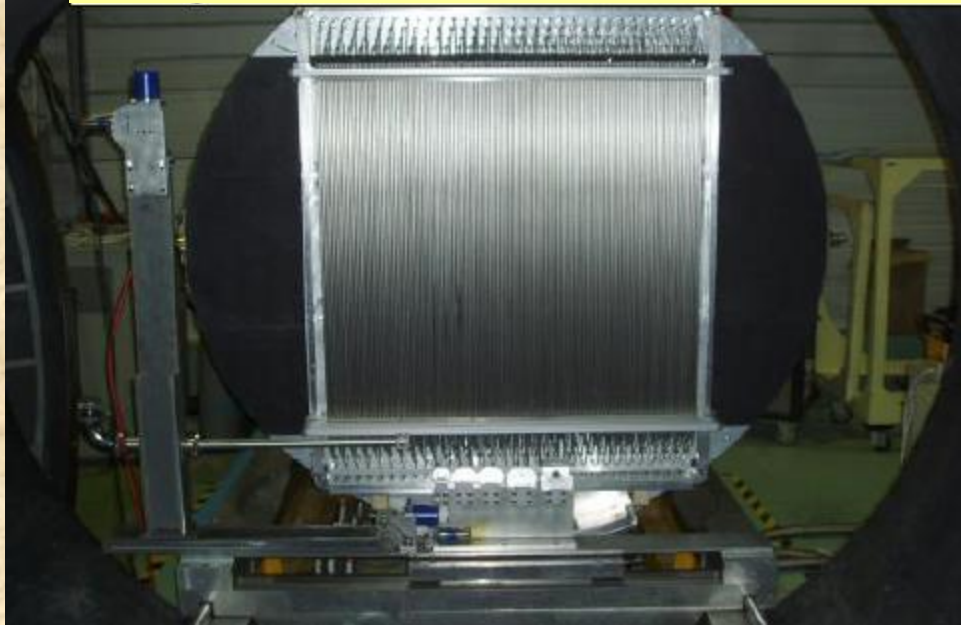


2D-системы из пропорциональных счетчиков

- Длина 1 м и более, диаметр 10-50 мм
- Метод деления заряда для линейной чувствительности (PSPC): высокорезистивный анод Ni-Cr (Reuter-Stokes) $FWHM \sim 1\% \cdot L$, где L – длина анода
- Большая площадь покрытия мультidetекторов: 1-30 м²
- Локальная скорость счета $\leq \text{кГц/мм}^2$
- Стоимость в 2 раза ниже аналогичного по площади MWPC



SANS D22, ILL



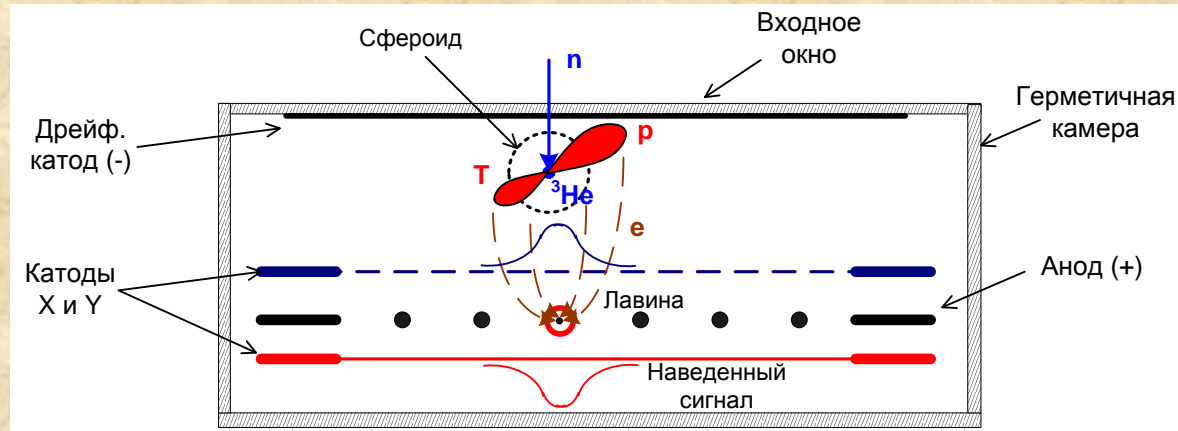
128 PSPC чувствительная область 1 м².
Метод деления заряда, макс. загр. 5Мгц
Диам. сч.: 8 мм. Давление: 15 бар
Эффективность: 75 % (5 А)

n-ToF spectrometer IN5, ILL

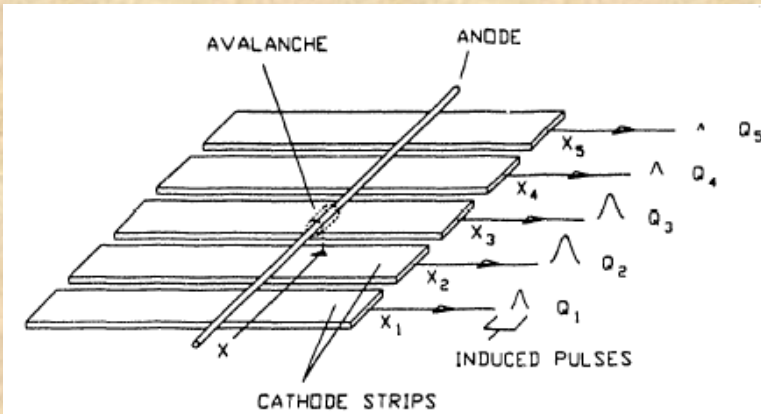


32 PSPC в модуле, длина 3 м
Площадь: 30 м²
Диам. сч.: 25.4 мм
Давление: 5 бар
Угол покрытия: 148°

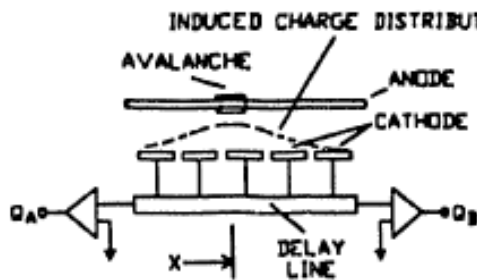
MWPC



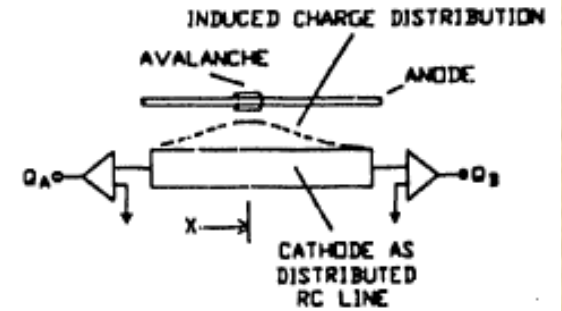
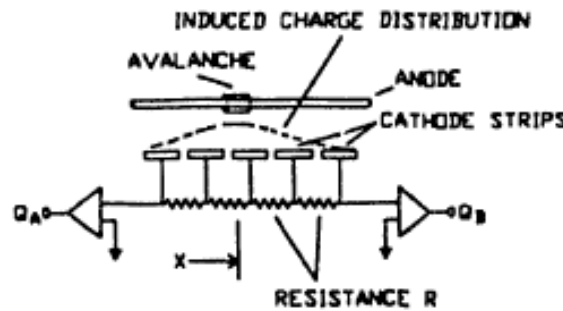
Методы считывания и восстановления координаты



$$\langle X \rangle = (\sum X_k Q_k) / (\sum Q_k)$$



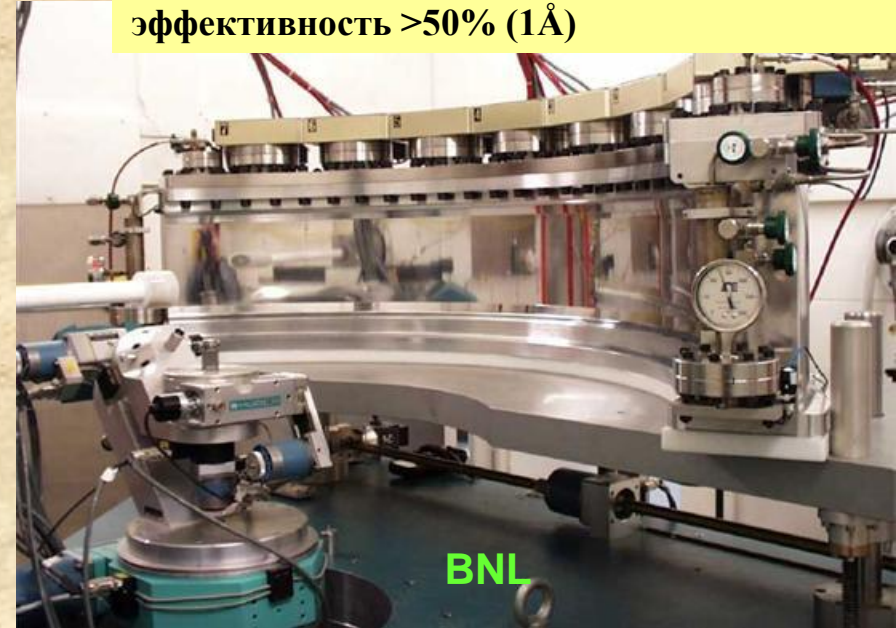
$$\langle X \rangle = ((t_A - t_B) / \Delta t_{max} + 1) / 2$$



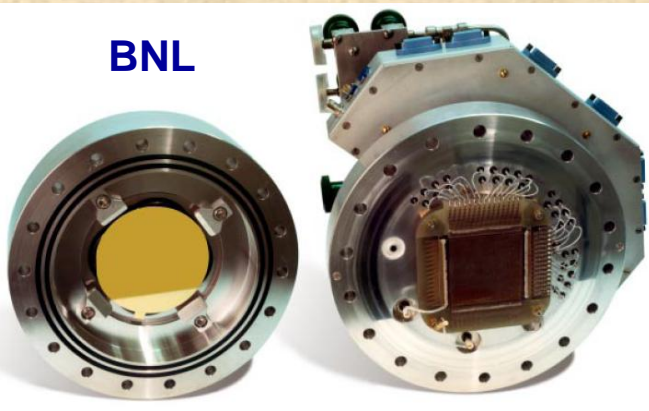
$$\langle X \rangle = Q_B / (Q_A + Q_B)$$

MWPC

Изогнутый 120 -детектор для кристаллографии протеинов, чувствительная площадь 1.5 м × 20см, временное разрешение 1мкс, интегральная загрузка 1МГц, пространственное разрешение 1.5 мм, эффективность >50% (1Å)



- Площадь: 5x5см² – 1x1м²
- Метод съема сигналов: поканальный, ЛЗ, метод деления заряда
- Простр. разрешение 1-5 мм (до 0.4 мм)
- Эффективность 50-90% (1-4 Å)
- Временное разрешение ~1 мкс (TOF)



Детектор с входным окном 5см × 5см, пространственное разрешение 0.4 × 0.4 мм², 8атм. ³He+6атм. C₃H₈

Детектор 21000N ORDELA с входным окном 1м × 1м, временное разрешение 3мкс, интегральная загрузка 200 кГц, пространственное разрешение 5.1 × 5.1 мм², эффективность 50%– 80% (2-5 Å)

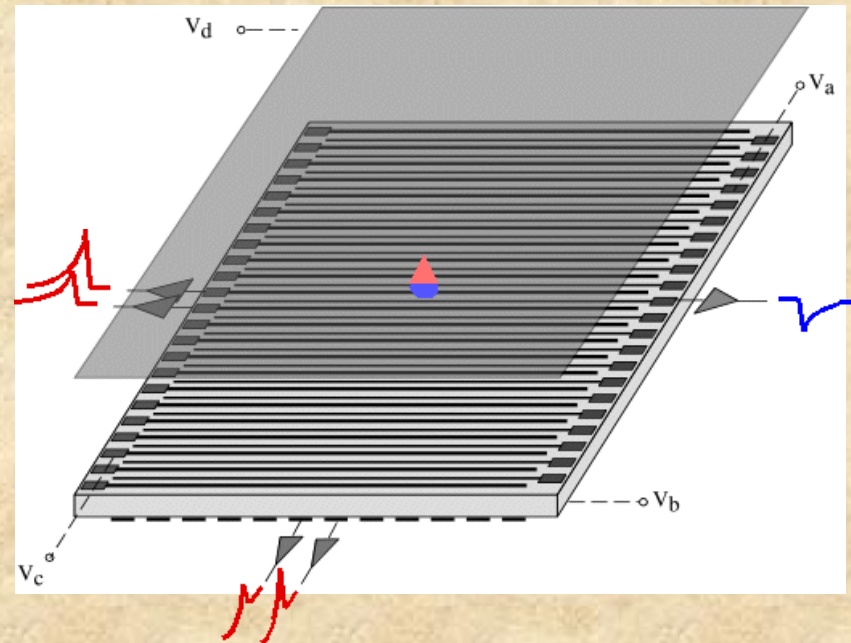
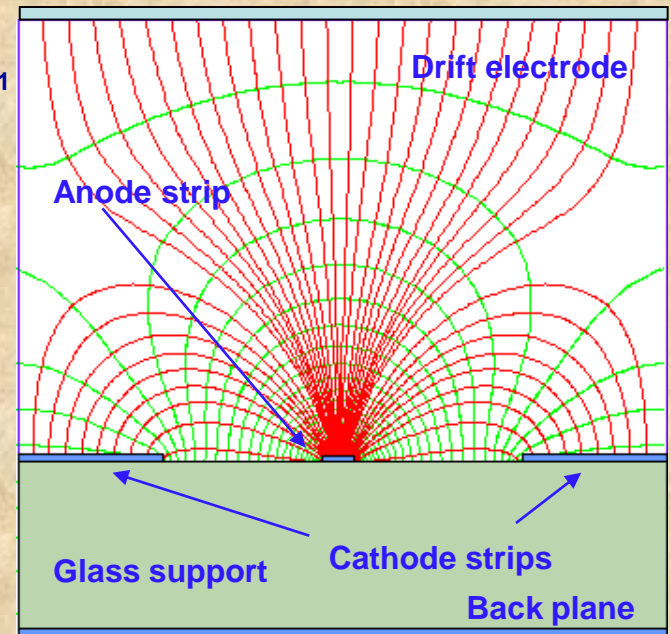
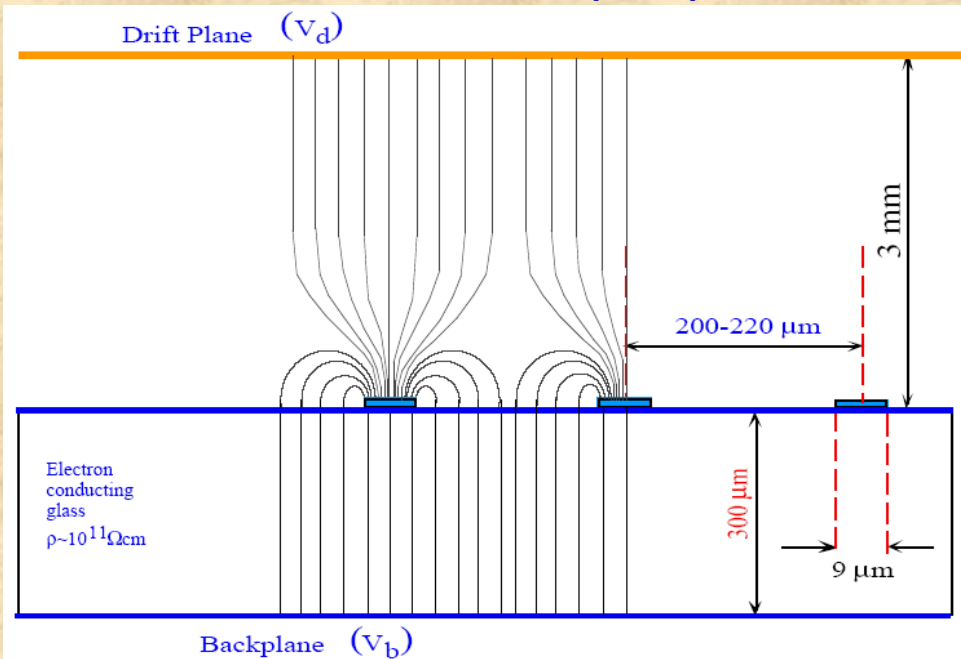


MSGC

- Площадь одной пластины до $25 \times 25 \text{ см}^2$ (Schott S8900, $\rho \sim 10^{11} \text{ Ом см}$)
- Очень высокие требования к чистоте газа и субстрата
- Специальные свойства субстрата:
 - 1) наличие проводимости (ионная/электронная)
 - 2) ток утечки «анод-катод» $< 1 \text{ мкА}$

Readout

Virtual cathode chamber (VCC)



- Высокий КГУ $\sim 10^3$
- Анодный и катодный сигналы одинаковые (полярность +/-)
- макс. загрузка $\sim 5 \text{ кГц/мм}$ (ан. стрип)

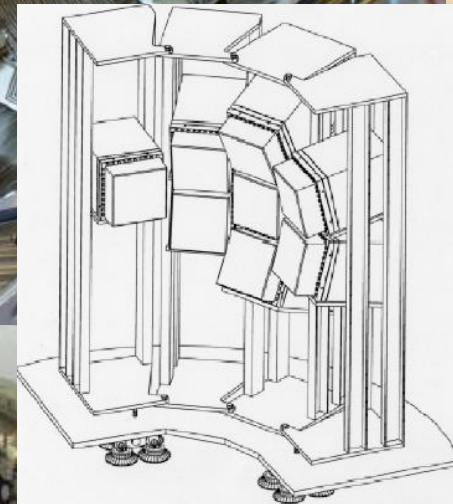
MSGC

VIDIM200 (VCC): 192ммx192мм
Поканальный съем 64x64
Простр. разрешение 3 мм
Мертвое время 1мкс/стрип

- Скорость счета до 1МГц/мм² (VCC)
 - До 100кГц/стрип (frontend dead time 1мкс)
 - Пространственное разрешение 1-3 мм (до 0.5мм)
 - Эффективность <60-90% (1 A)
 - высокое энергетическое разрешение
 - однородность эффективности (нет “болезней” MWPC)
-
- вариации readout катода
 - **ВЫСОКАЯ СТОИМОСТЬ**



- * guard electrodes
- * Entrance window : 5 mm aluminium (5083)
- * Gas Mixture : 5 bars 3He + 2 bars CF4
- * conversion gap = 3 cm
--> 88% efficiency at 2.5 Angstroms



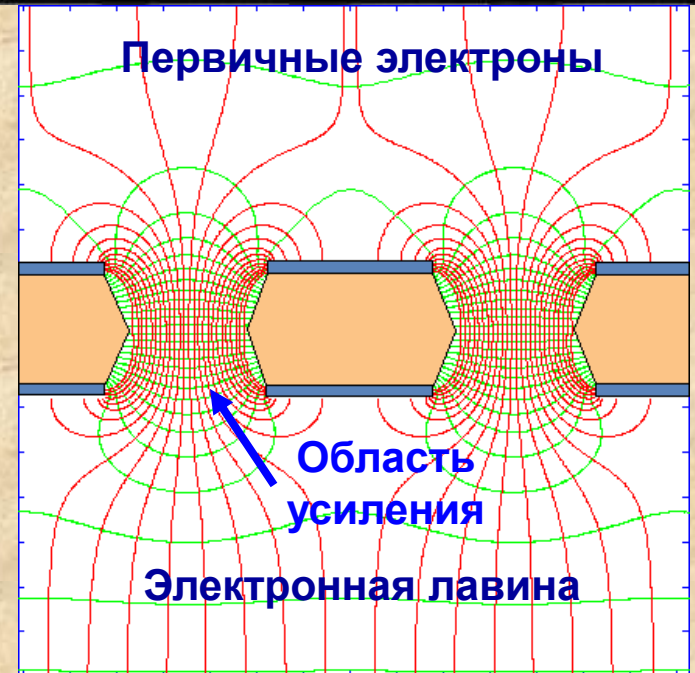
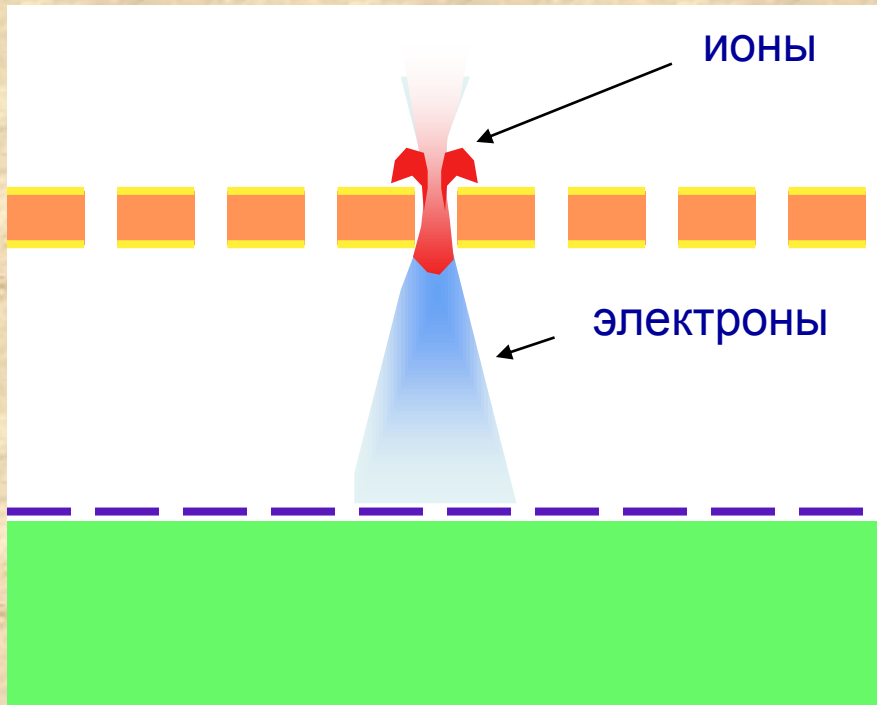
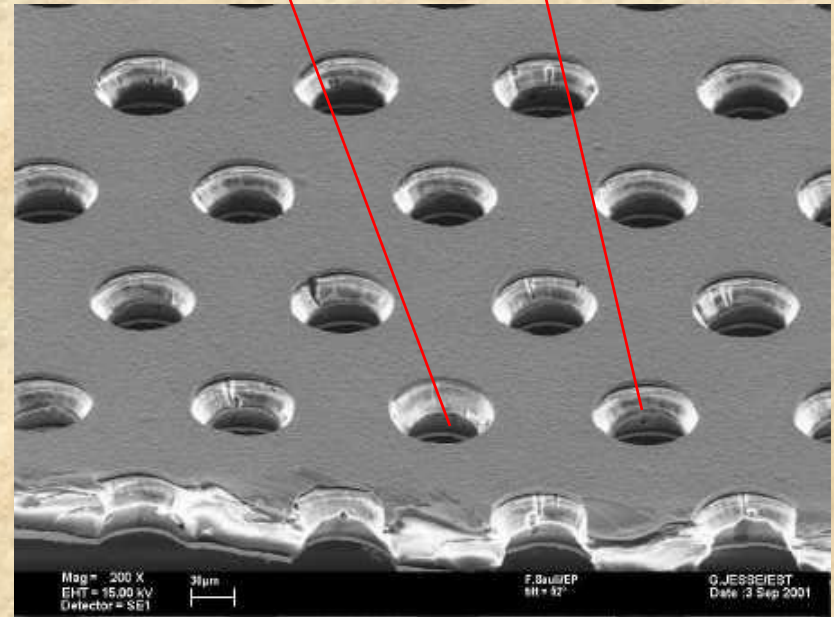
D20 powder diffractometer (since Feb 2000)
1D localisation
48 MSGC plates (8 cm x 15 cm)
Angular coverage : 160° x 5,8°
Position resolution : 2.57 mm (0,1°)
5 cm gap; 1.2 bar CF4 + 2.8 bars 3He
Efficiency 60% @ 0.8 Å



GEM (Gas Electron Multiplier)

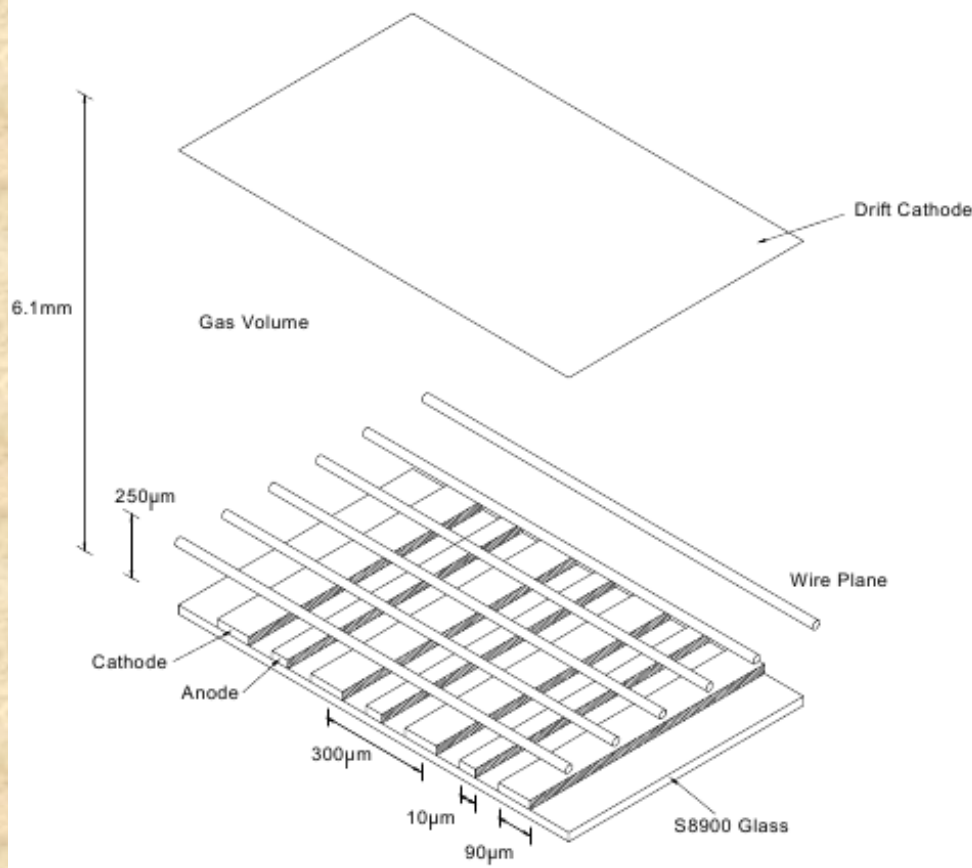
100÷200 мкм

- Площадь электрода до 30x30см² (CERN)
- Скорость счета до 10МГц/см²
- 100% «прозрачность» для электронов
- Простр. разреш. определяется readout электродом и пробегами частиц
- механическая гибкость GEM
- КГУ~1-400 (1 GEM)
- Быстрый сигнал (нет ионного хвоста): 20нс (зазор 2мм)



Другие микроструктурные газовые детекторы

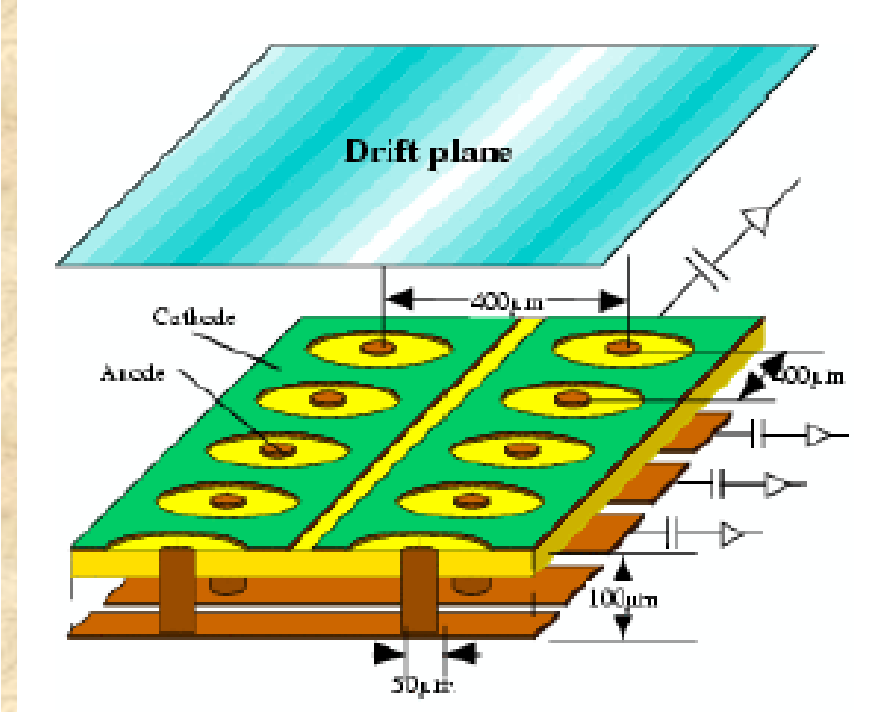
MICRO-GAP CHAMBER (MGC)



Beam monitor (Delft for ISIS):

- рабочая область 5 см x 5 см
- MWPC катод: шаг 1 мм
- эффективность <1%
- газовая смесь He3/CF4
- интенсивность потока до 10 МГц/мм²
- 2D readout 100 кГц

μPIC (микropиксельная камера) readout



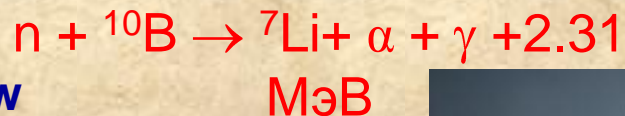
Основные достоинства:

- рабочая область 30 см x 30 см (PCB техн.)
- высокий КГУ ~ в 10 раз выше чем MSGC
- слабая подверженность разрушению из-за разрядов
- более доступная технология, чем MSGC
- высокое временное разрешение

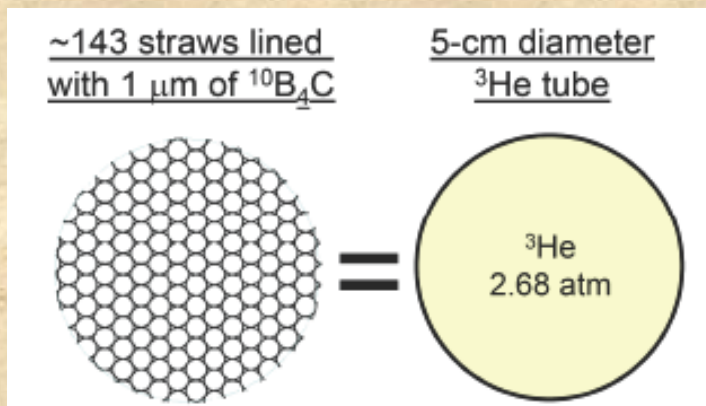
Детекторы с He-3 конвертором

- Высокая эффективность и пространственное разрешение достигаются только при высоком давлении газа => компромисс между размерами детектора и его основными характеристиками
- Сложно получить пространственное разрешение $FWHM < 1$ мм
- + Низкая чувствительность к гамма-излучению
- Наличие параллакса – зависимость пространственного разрешения от угла падения нейтрона (толщина чувствительной области 20-30мм)
- Высокая стоимость газа ^3He
- **Пропорциональные счетчики (1D, 2D):** большие чувствительные площади (1 м^2 - неск. дес. м^2), невысокая скорость счета ($\sim 100\text{ кГц}$) при относительно простой регистрирующей электронике
- **Микроструктурные детекторы:** малая чувствительная область (до $30\text{ см} \times 30\text{ см}$), возможность работы при высоких локальных нагрузках, многоканальная электроника, повышенные требования к чистоте газовой смеси и выбору материалов (MSGC)

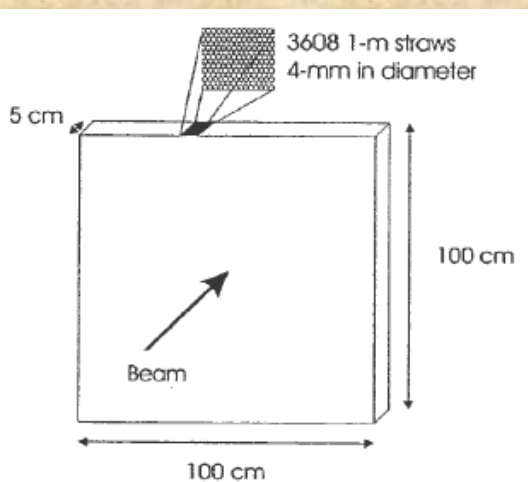
Газонаполненные детекторы с твердотельными конверторами (гибриды)



Технология Straw



Straw – тонкостенный (каптон, медь, алюминий) пропорциональный счетчик. Диаметр 4 мм.



- $\epsilon=65\%$ (5cm)
- X – номер straw
- Y – charge division

J.L.Lacy, 2006
US007002159B2

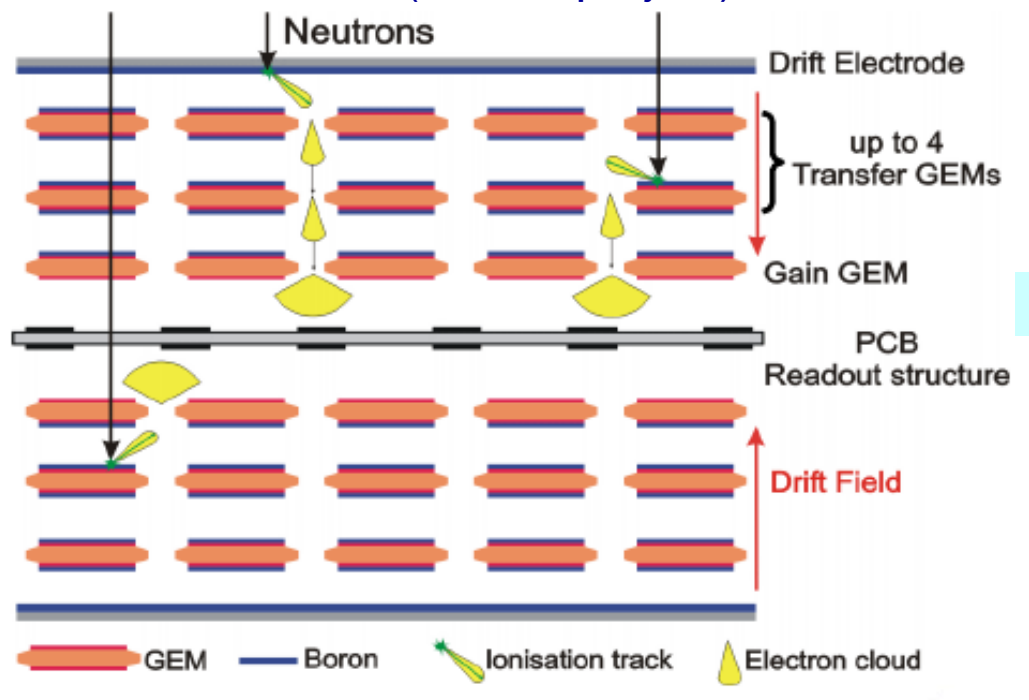


Пропорциональный счетчик с борным конвертором, нанесенным на внутреннюю поверхность трубки

- 1 слой конвертора $\rightarrow \epsilon=5\%$
- Газовая смесь Ar/ CO_2 , P=20 см.рт.ст.
- Длина счетчика до 2.2 м
- высокая степень разделения n/γ (γ до 100МР/ч)

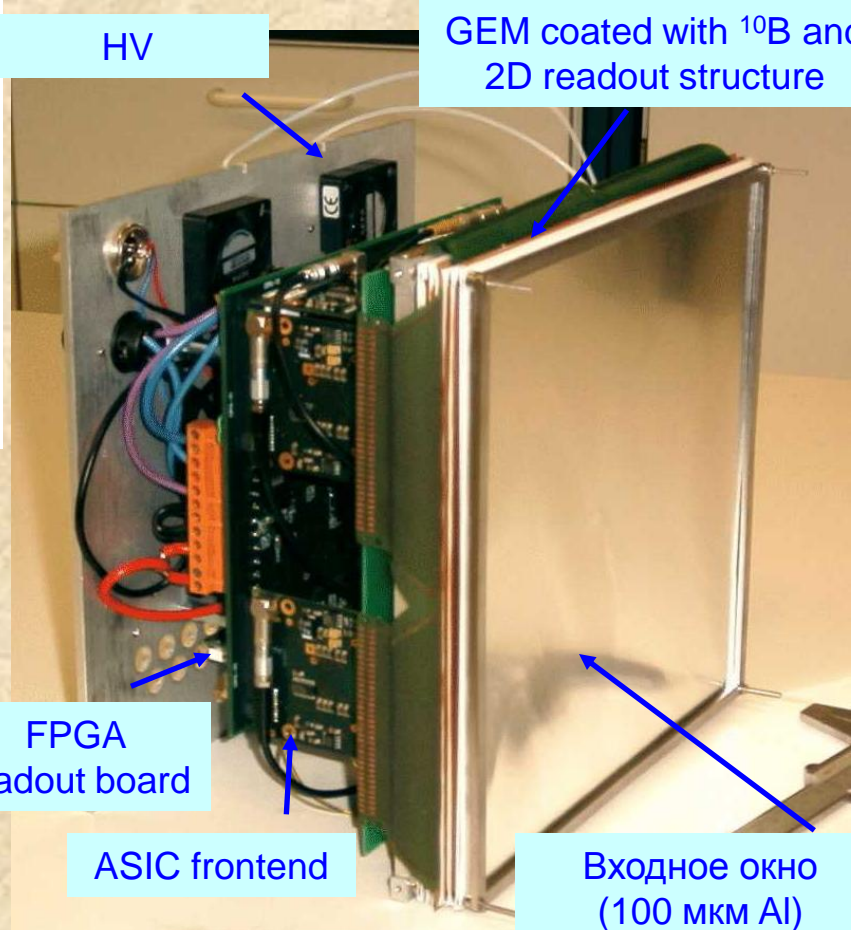
Газонаполненные детекторы с твердотельными конверторами (гибриды)

CASCADE (DETNI project)



High resol. SXD & reflectometry & SANS:

- чувствительная область 30x30 см²
- скорость счета 10 МГц
- FWHM=1 мм

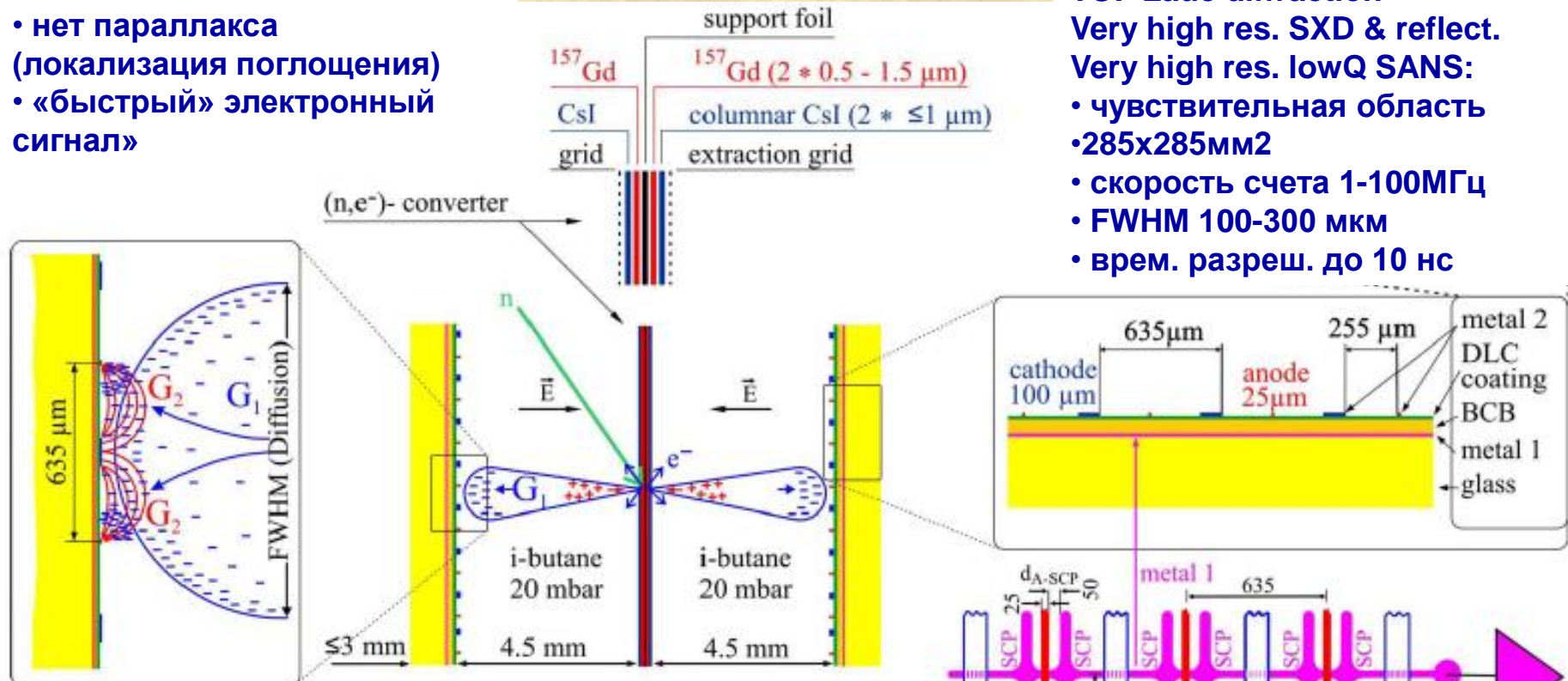


- FWHM~3.1 мм (при н.у.) (прототип)
- FWHM~1 мм (при +1.5 бар. CF₄)
- 10 слоев GEM – эфф. 50% (1.8 А)
- 4 МГц (прототип)
- Газовая смесь 90%Ag+CO₂ при н.у.
- Readout: strip, pad,..
- радиационная стойкость:
 - 1) поток нейтронов \uparrow 600 МГц/см² (2.2 см², T=2.5 часа)
 - 2) \downarrow потока до н.у., нет снижения КГУ

Газонаполненные детекторы с твердотельными конверторами (гибриды)

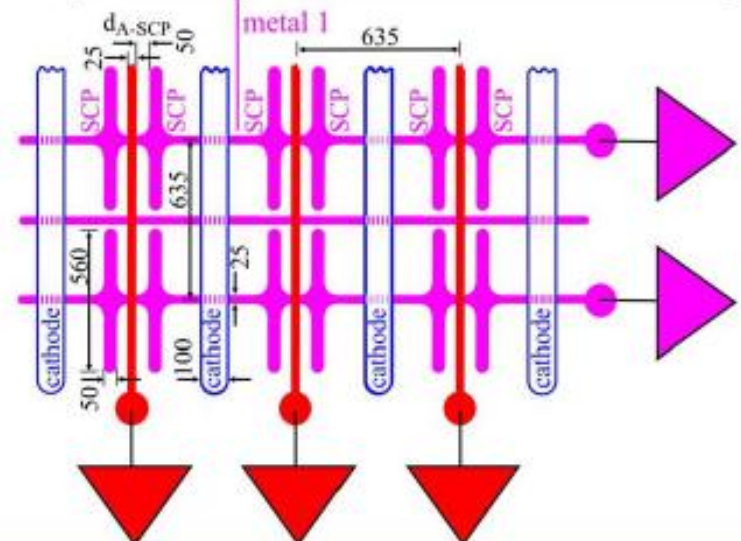
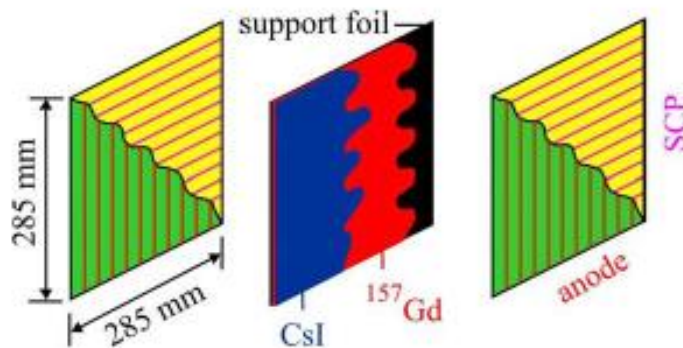
Gd/CsI Low-Pressure MSGC (DETNI)

- нет параллакса (локализация поглощения)
- «быстрый» электронный сигнал»



- TOF Laue diffraction
 Very high res. SXD & reflect.
 Very high res. lowQ SANS:
- чувствительная область
 - 285x285мм²
 - скорость счета 1-100МГц
 - FWHM 100-300 мкм
 - врем. разреш. до 10 нс

Коллаборация:
 HMI
 JINR
 IFM
 TECHNI
 DETNI



Сцинтилляционные детекторы

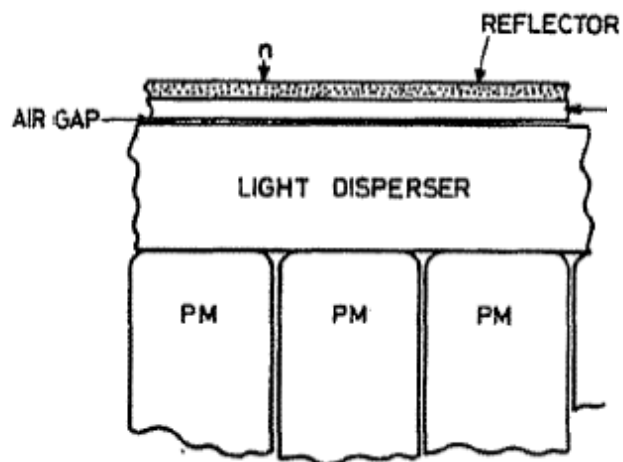
Материал	Выход фотонов на поглощенный нейтрон	Время послесвечения (нс)	Длина волны фотонов (нм)	+/-
Стекло ${}^6\text{Li}:\text{Ce}^{3+}$	~6000	75	395	+ скорость счета + прозрачность - высокая гамма-чувствительность $1\text{E}-4$
${}^6\text{Li}:\text{Eu}^{2+}$	50000	1400	470	+ эффективность + низкая гамма-чувствительность $1\text{E}-6$ - низкая скорость счета - Гигроскопичность
${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}:\text{Ag}^+$	160000	200 Послесвечение до 10 мкс	450	+ низкая гамма-чувствительность - низкая скорость счета - плохая прозрачность
${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	50000	200/800	385, 415	+ Разделение n/γ по форме импульса

Методы считывания

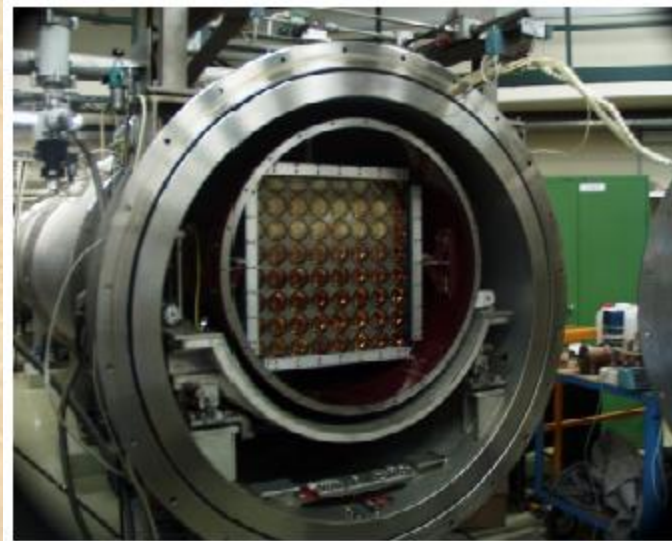
- Прямой метод – камера Анжера (PM, PSPM)
- Оптоволоконный метод (Fiber coded, WLSF)
- CCD
- SiPM

ISIS Facility, UK:
60% сцинт. детекторов

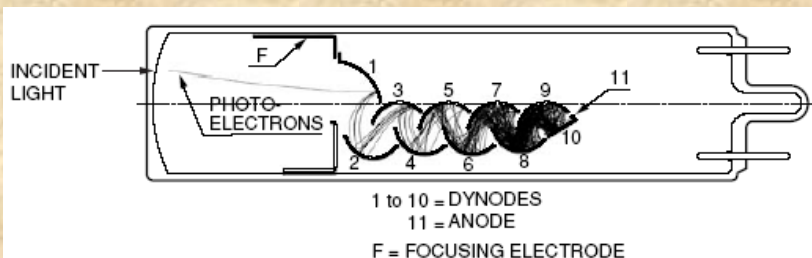
Камера Анжера (PM-readout)



Стекло Li-6:Ce+



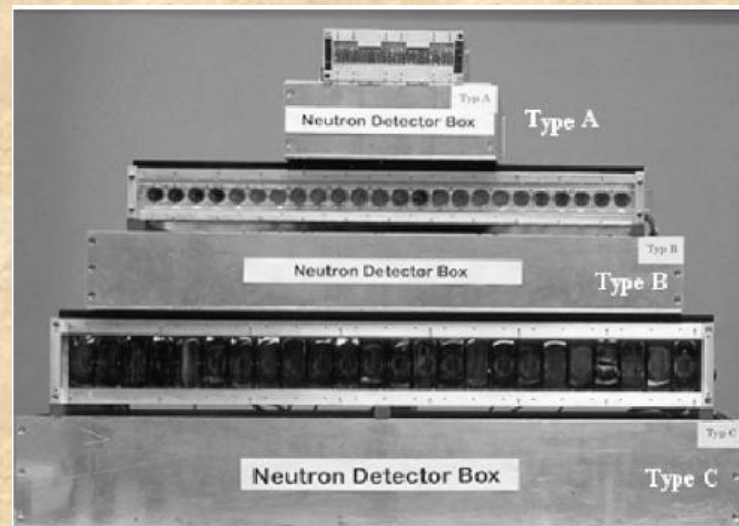
Метод ц.т. дает простр.разреш. лучше, чем размер PM



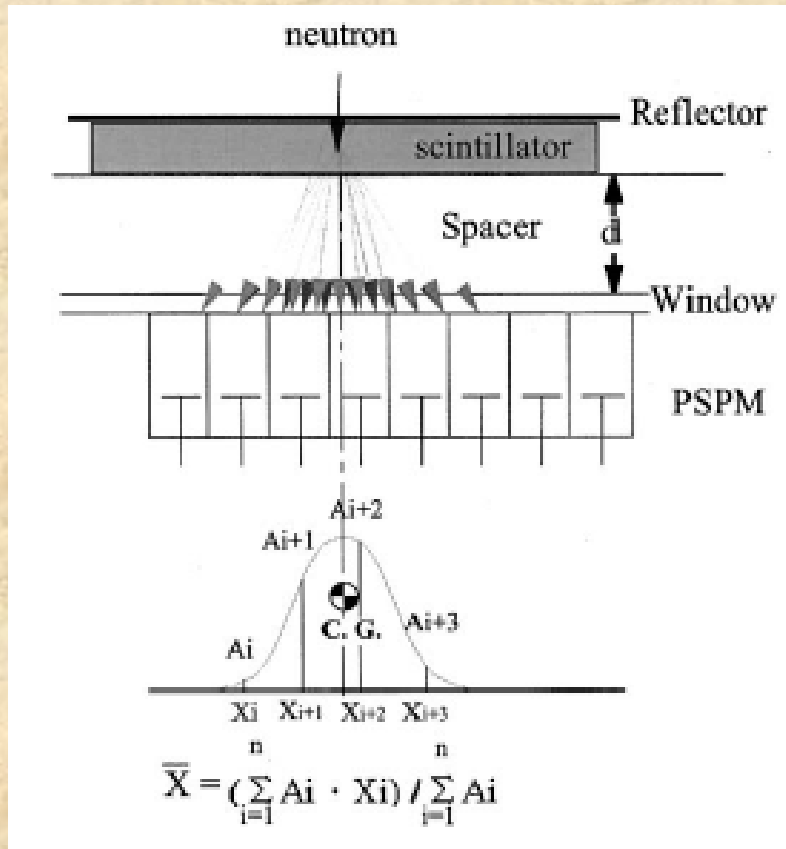
SANS KWS1, KWS2: детектор 60смх60см,
8x8 PMT, 128x128 каналов, 5ммх5мм, до
500кГц (readout электроника), эфф. 65-95%
(1-3 А), n/γ 10^{-4} (1 МэВ)

Julios family (Julich)

Type	A	B	C
Total size	320 × 390 × 115	900 × 450 × 125	1100 × 475 × 180
PM-cathode	6.8 × 24	28.6 ∅	40 × 80
Sensitive size	200 × 20	680 × 25	940 × 75
Spatial resolution	1.2	2.3	3.3

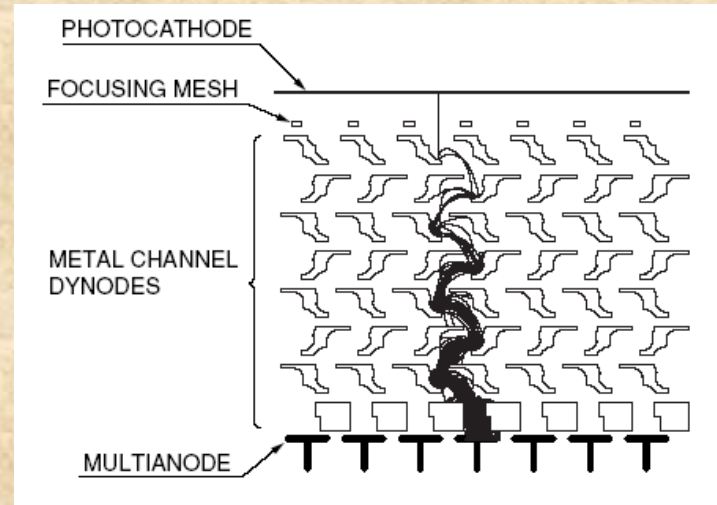


Камера Анжера (PSPM-readout)



FWHM = 0.8мм и лучше

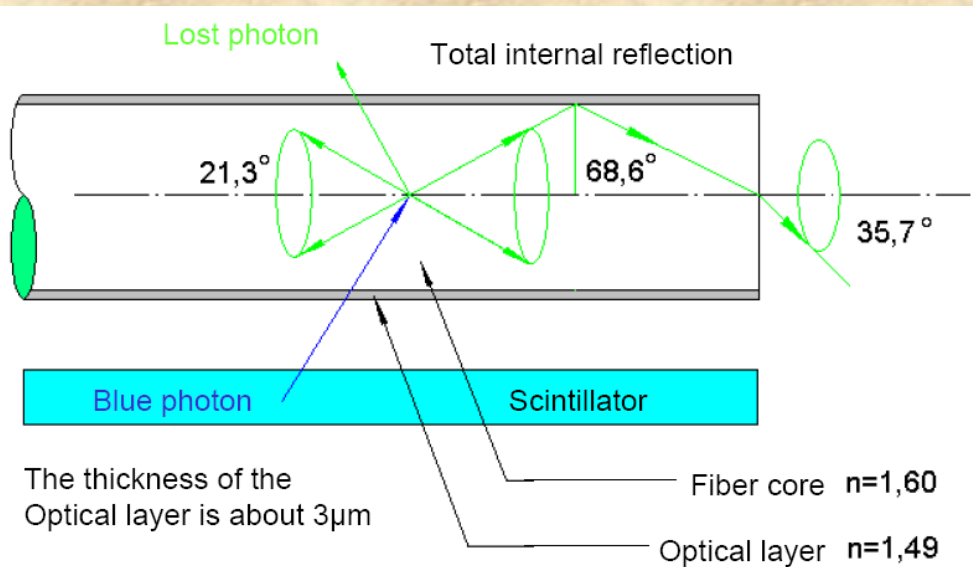
MAPMT: HAMAMATSU H9500



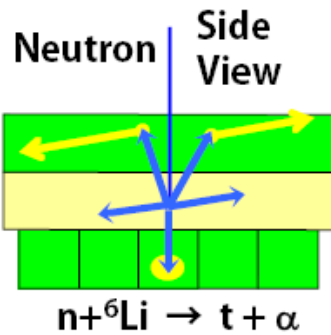
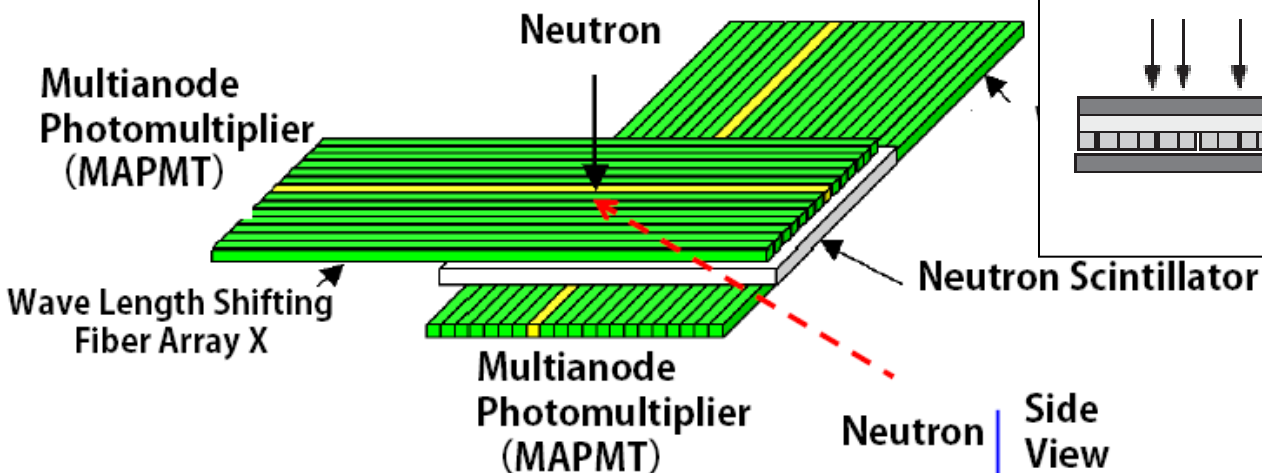
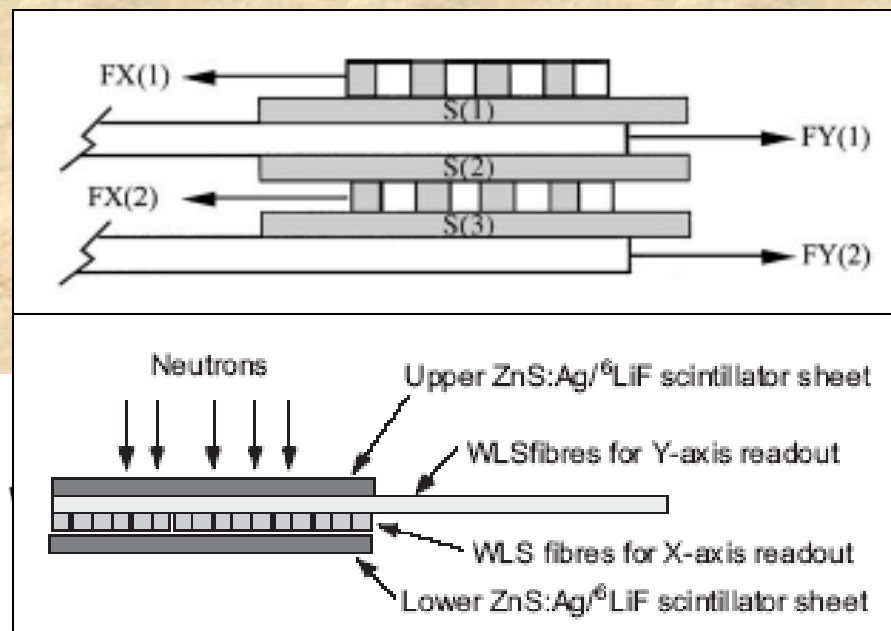
Чувст. обл. 49ммx49мм, 16x16 каналов, размер пиксела 3ммx3мм, мертв. обл. 10%, мертв. время 6нс

- Возможность покрытия больших площадей - модульность
- Поканальный съём (!)

WLSF readout



- Сцинтиллятор $\text{ZnS}+^6\text{LiF}$ (hi lumin.!)
- низкая скорость счета
- эффективность (1.8A): 1 слой – 20-30%, 2 слоя – 40-55%



- Д diam. WLSF 0.4-1.0 мм
- Цифровой съем: FWHM=diam. WLSF
- Метод ц.т.: FWHM<diam. WLSF

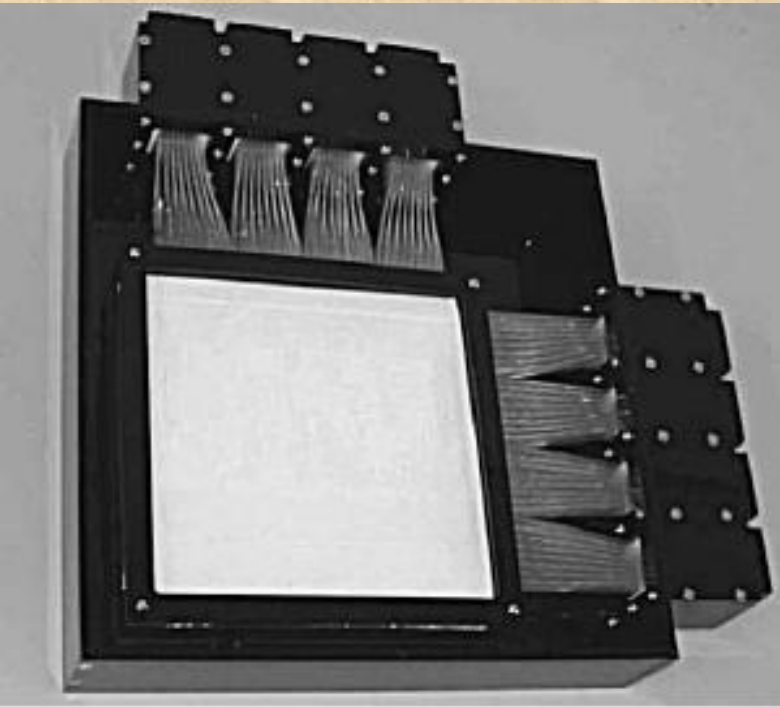
Разработчики

- JAPAN
- USA
- Russia

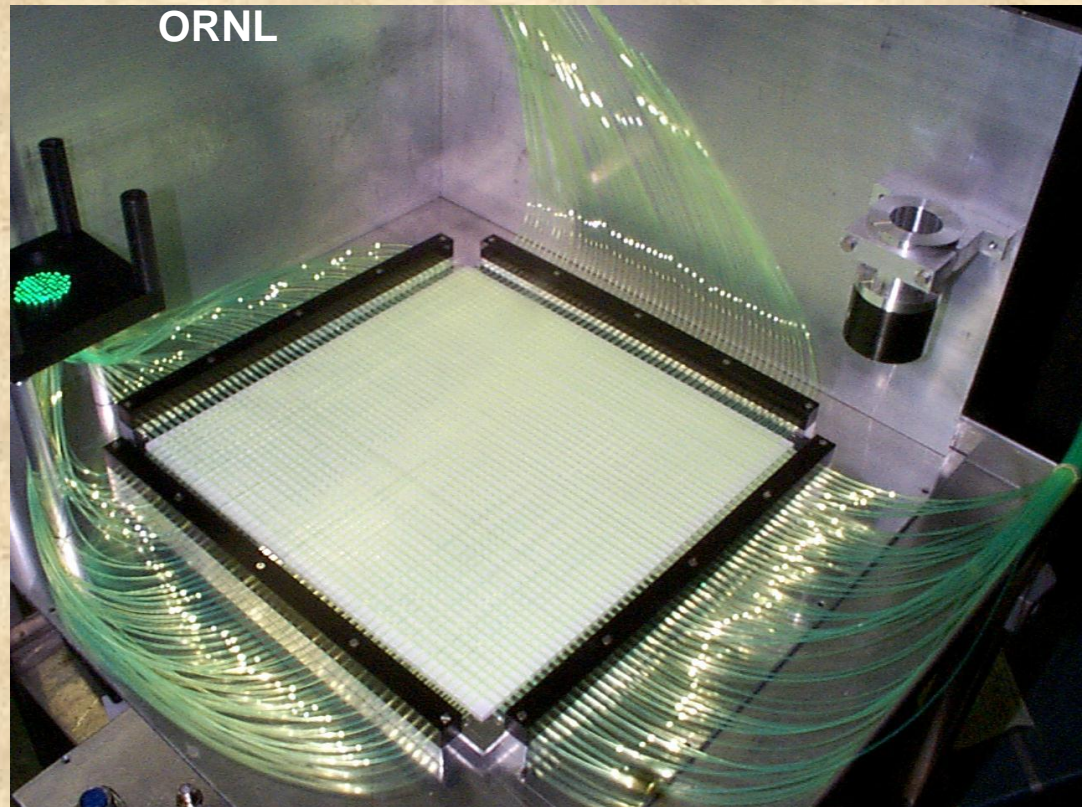
WLSF readout

«Разреженная» упаковка

«Плотная» упаковка



128мм x 128мм, пиксель
0.5ммx0.5мм
(Riken, KEK, CERN)



- Площадь 25см x 25см
- Расстояние между волокнами 2 мм
- 48x48 WLSF (X,Y)
- MAPMT: Phillips XP1704
- Анализатор совпадений: Hamamatsu 1924
- разрешение: < 5 мм
- Макс. скорость счета: ~ 1 МГц
- Время формирования: 300нс
- TOF разрешение: 1 мкс

Fiber coded readout (ISIS)

ISIS Facility: ENGIN-X, HRPD, OSIRIS, HiPr, GEM, SXD

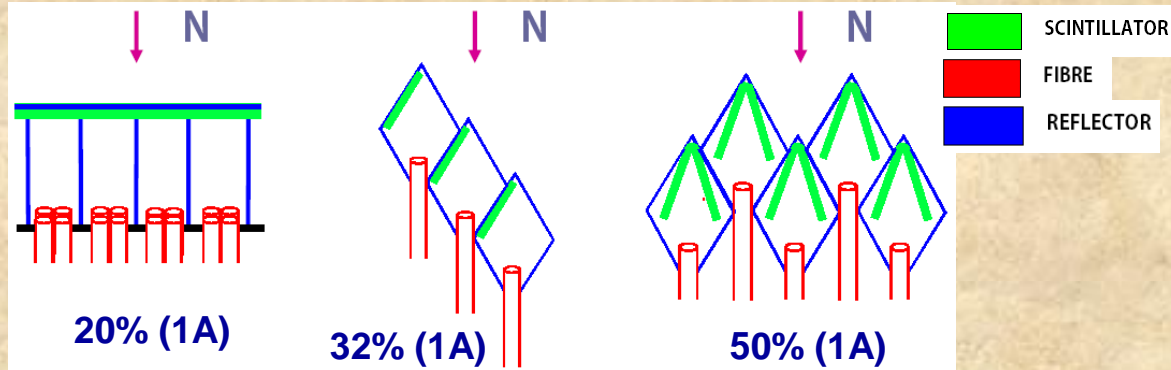
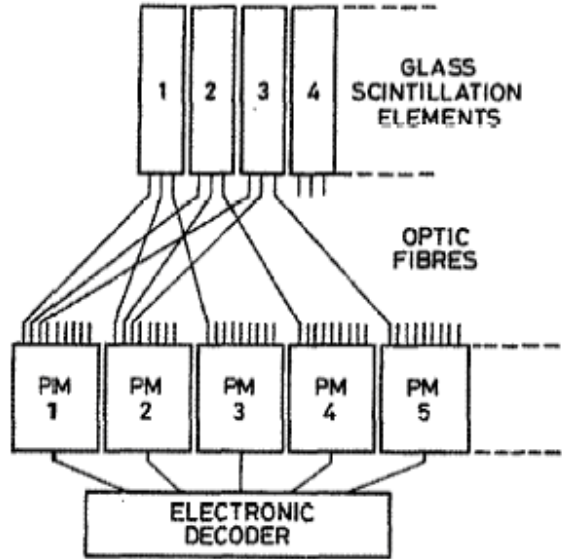
${}^2\text{Cn}$, ${}^3\text{Cn}$, ${}^4\text{Cn}$ – 1D, 2D размерность

+ малое кол-во ФЭУ

+ большое число оптических каналов

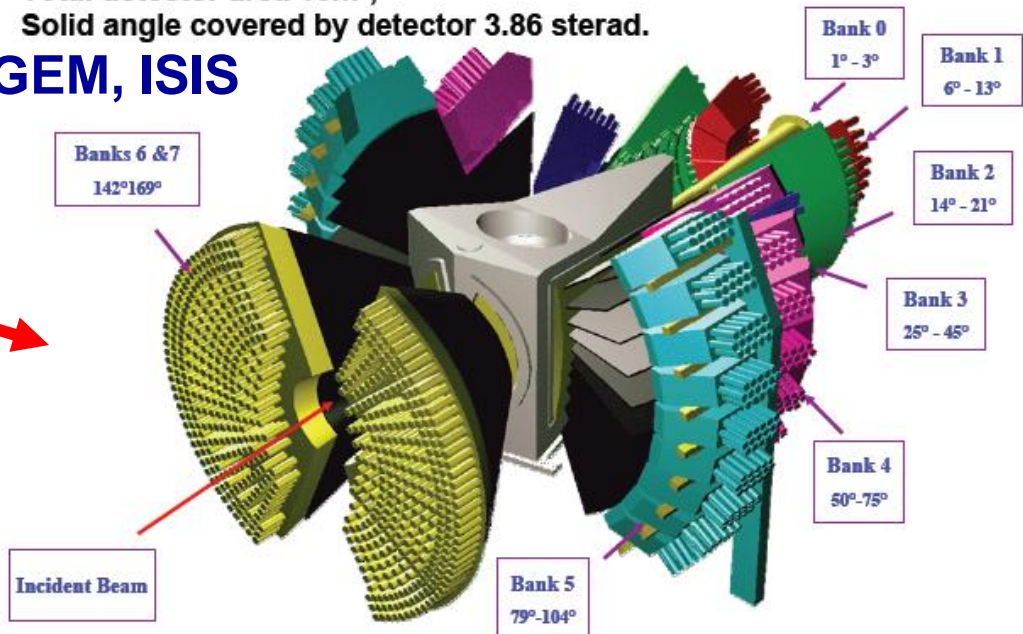
Пространственное разрешение 3-5 мм

Эффективность до 50% (1A) (V-образный сцинт. экран)



Total detector area 10m²,
Solid angle covered by detector 3.86 sterad.

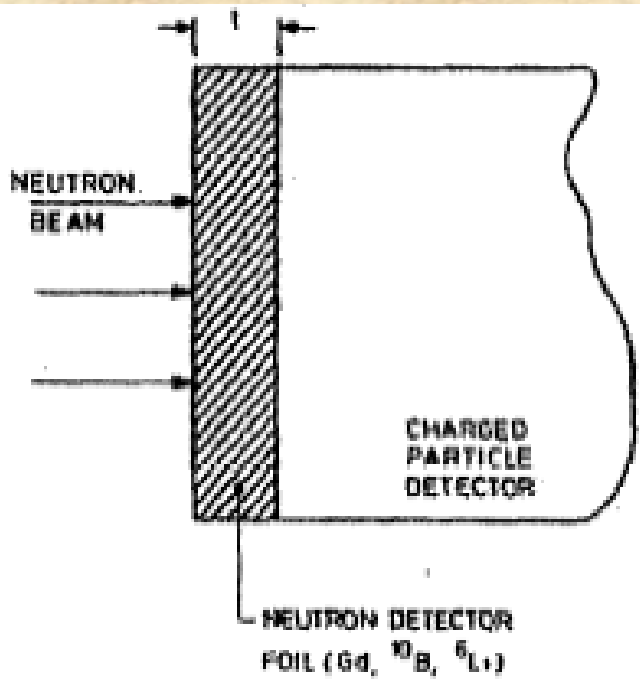
GEM, ISIS



Сцинтилляционные детекторы

- Пока не найден оптимальный сцинтиллятор, имеющий одновременно: малое время послесвечения (высокие локальные загрузки), большой выход фотонов и высокую прозрачность, низкую γ -чувствительность
- + Большие чувствительные площади, высокое разрешение
- Разнообразие методов съема
- + Чувствительность к фоновому гамма-излучению может быть снижена при анализе формы импульса (сцинтилляторы ${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$, $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$)
- + практически отсутствует эффект параллакса

Полупроводниковые детекторы

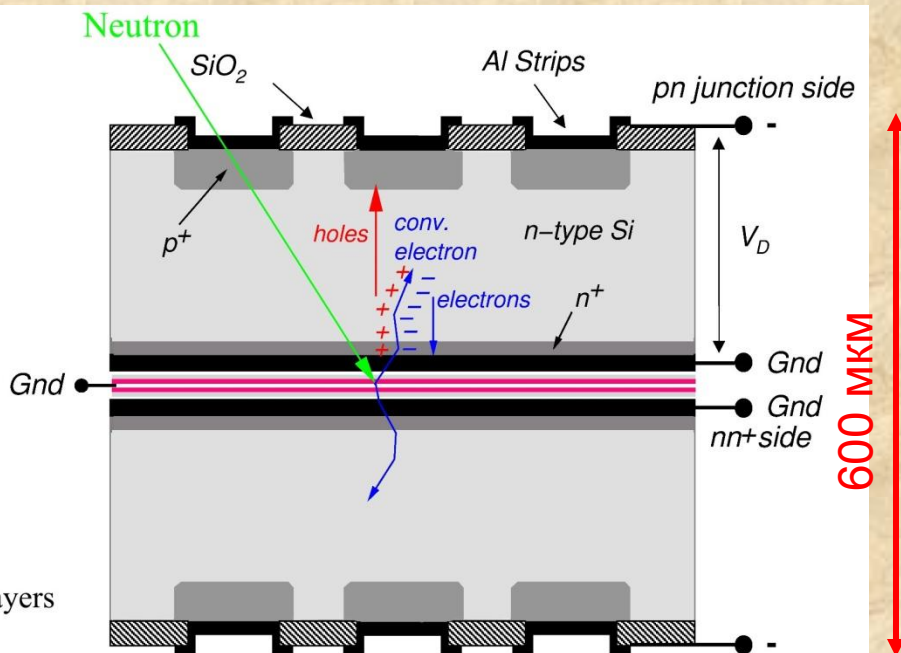
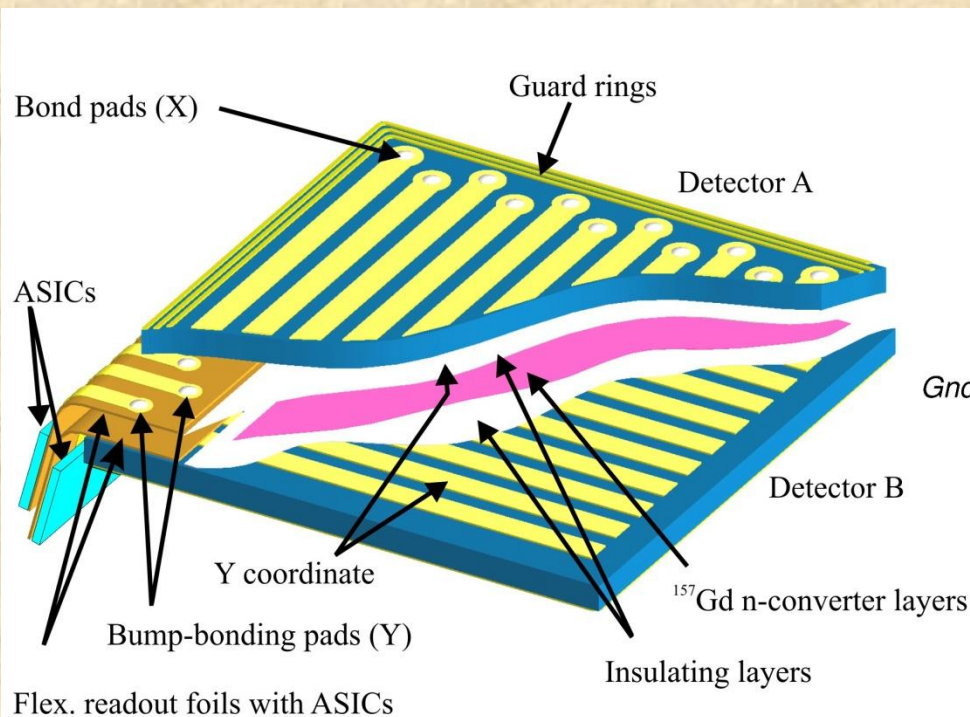


Конверторы: ^{10}B , ^6LiF , ^{157}Gd

Конвертор	Заряж. частица	Энергия	Пробег (R)	Длина своб пробега нейтрона (λ_n)	R/ λ_n	Оптим. толщина конвертора	Максимальная эффективность (1.8A)
^6Li	T	2.7 МэВ	130мкм	230мкм	0.56	97мкм	10%
^{10}B	α	1.47 МэВ	3мкм	20мкм	0.16	3.5мкм	4%
^{157}Gd	e-	< 0.182	12мкм	1.3мкм	9.15	3мкм	60%

Полупроводниковые детекторы

Gd/Si microstrip detector (DETNI)



Кремниевый диод p+-n-n+

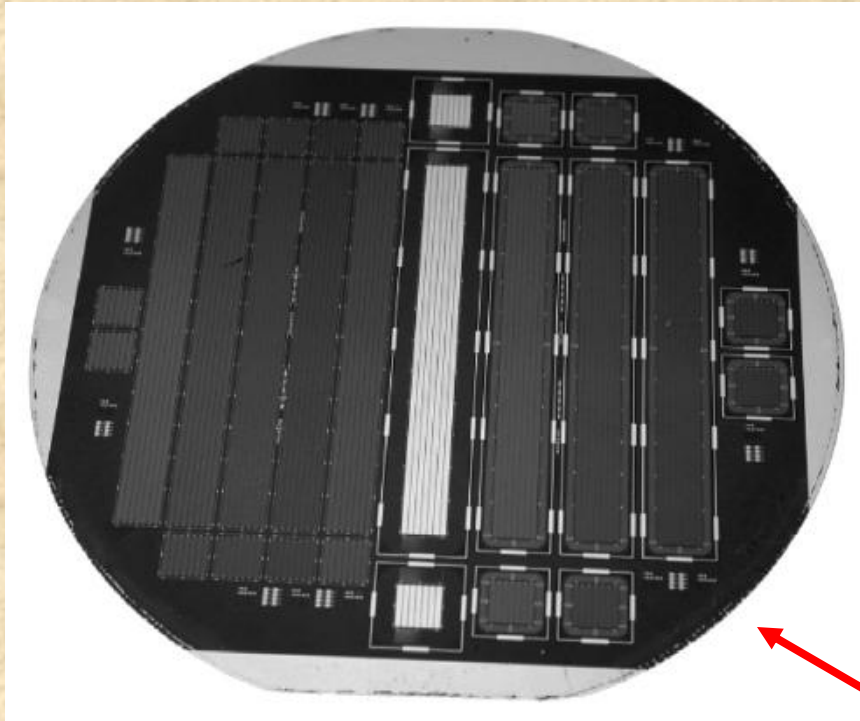
- **Размер** 51 мм x 51 мм x 0.3 мм
- **Число стрипов** 640
- **Шаг** 80 мкм
- **FWHM** 54 мкм
- **Макс. загрузка** 25МГц (1МГц/см²)
75кГц/стрип

Front end:

- $E_{\text{сигн}}$ 29-250 кэВ
- $E_{\text{пор}}$ 10кэВ
- ENC 550e (20-30 пФ)

Полупроводниковые детекторы

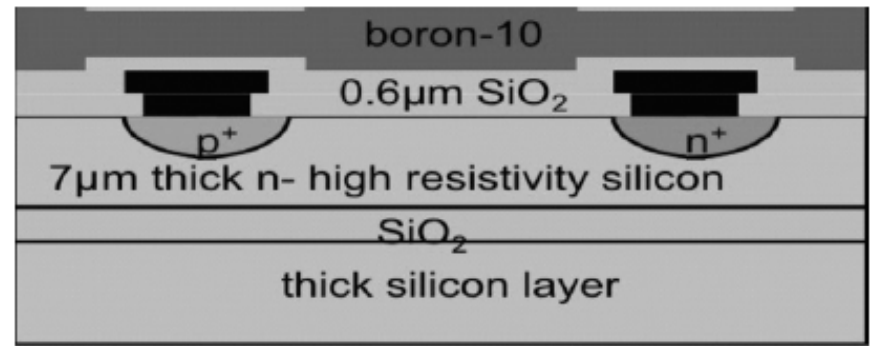
Naval Research Laboratory



Размер центр. области 96ммх96мм,
толщина детектора 0.5 мм,
кремниевая подложка 100мм диам.

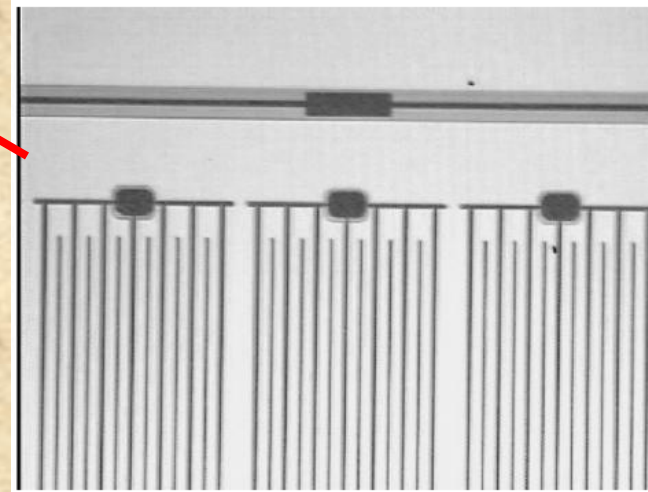
3 стрипа:
каждый состоит из чередующихся
стрипов N- и P-типа

Одностороннее покрытие ^{10}B
(1.5мкм), ^6LiF или ^6Li



Технология SOI (Silicon-on-Insulator)

- Тонкие слои кремния (7мкм) -> низкая гамма- чувствительность
- низкая стоимость производства
- возможность массового производства для покрытия больших площадей



Полупроводниковые детекторы

- + Высокое пространственное разрешение
- + Высокое временное разрешение
- + Высокое энергетическое разрешение
- + Высокая скорость счета
- + Низкая гамма-чувствительность
- + Отсутствие параллакса
- Малая рабочая область до $100 \times 100 \text{ мм}^2$
- Высокая эффективность регистрации только для Gd-конвертора
- Медленное старение только для Gd-конвертора

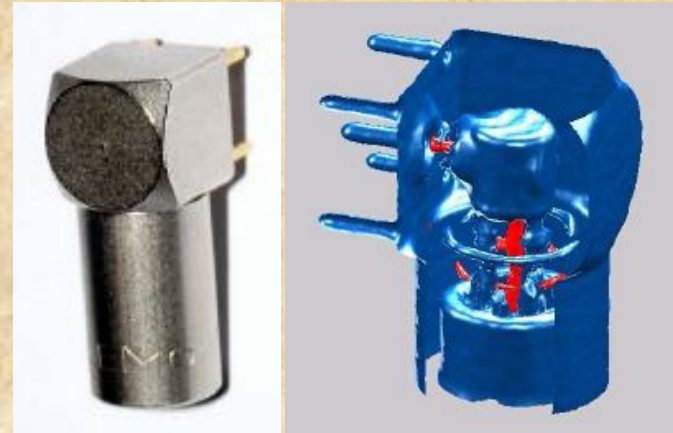
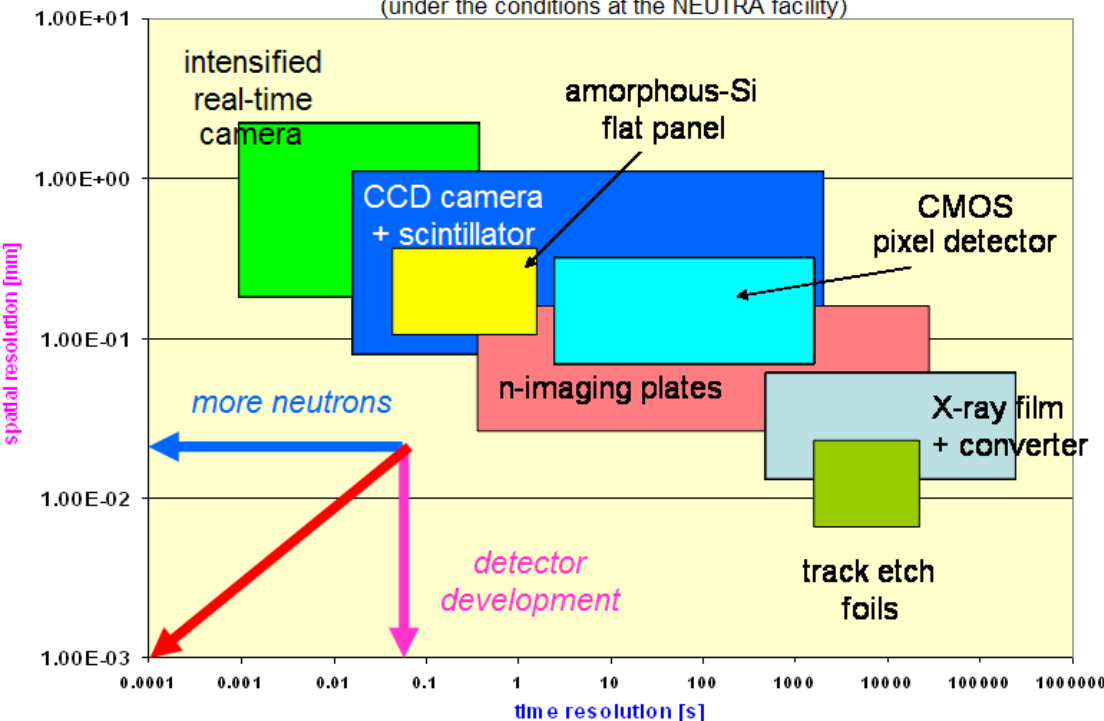
Детекторы фотографического типа

1. Image plate
2. Сцинтилляционные детекторы + CCD readout
- ...

Томография, нейтронография

Detectors for Neutron Imaging

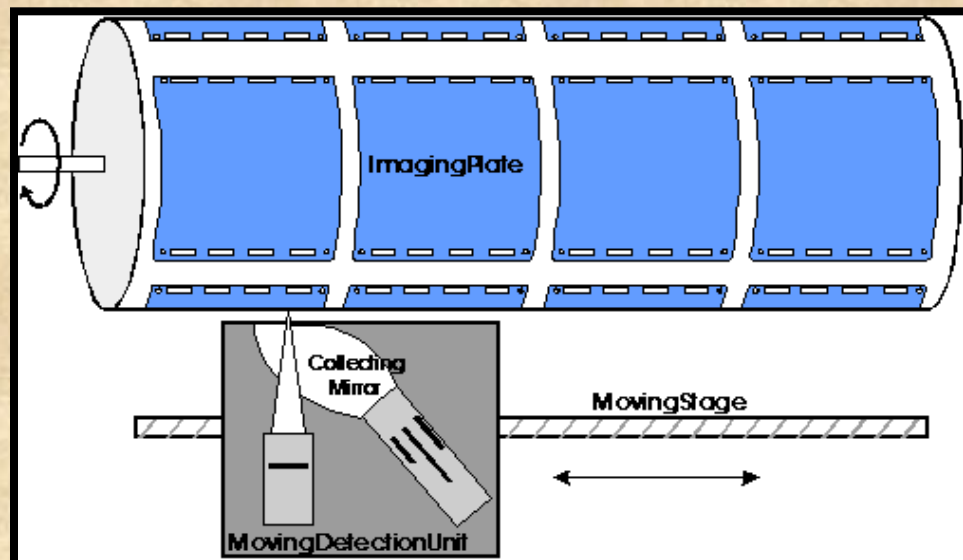
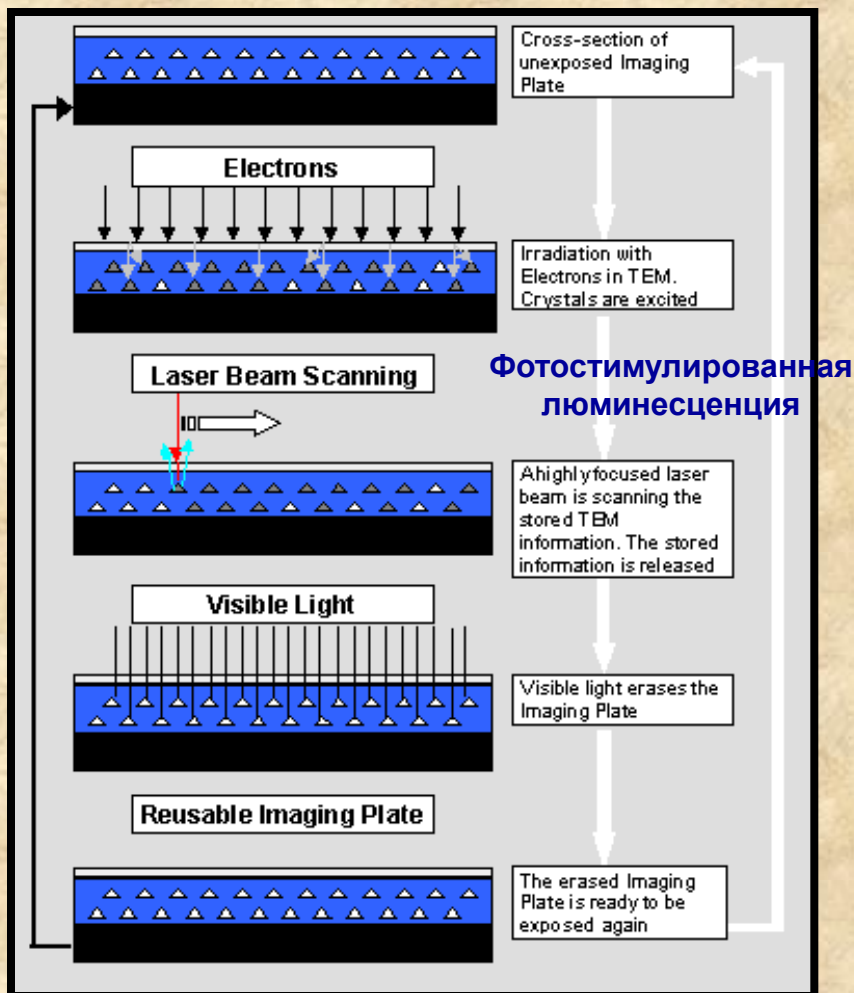
(under the conditions at the NEUTRA facility)



- Работа без монохроматизации пучка – высокие загрузки
- Простая электроника
- простр. разрешение ограничено типом конвертера и величиной пробега частиц (< 0.1 мм)
- возможность покрытия больших площадей регистрации

Image plates

IP: материал конвертора кристаллы Gd_2O_3 + запоминающий люминофор - галоид $BaFBr:Eu^{2+}$
(долгое сохранение метастабильного состояния часы и дни)



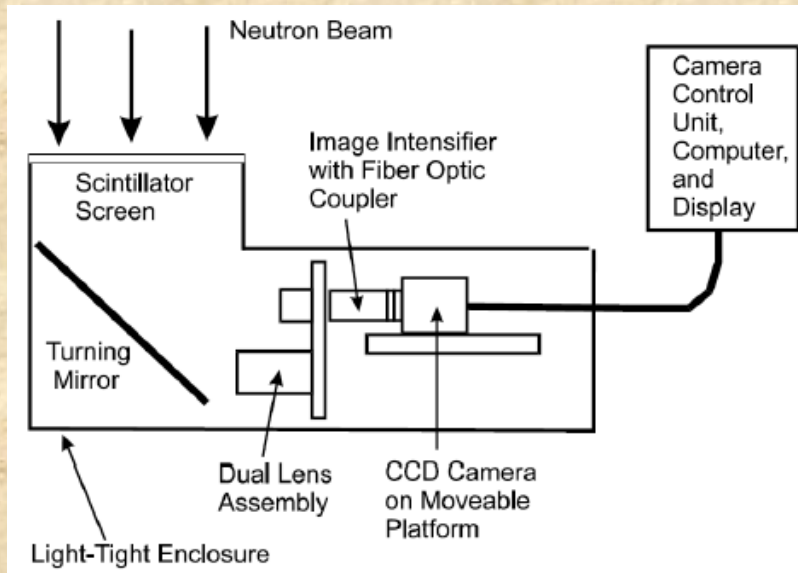
VIVALDI – LAUE diffractometer:

Вертикальный цилиндр: $r=160\text{мм}$, $L=400\text{ мм}$, $800 \times 400\text{ мм}$

угол захвата: 288 (гориз), 104 (вертик)
размер пиксела: $100\text{мм} \times 100\text{мм}$, $200\text{мм} \times 200\text{мм}$, $400\text{мм} \times 400\text{мм}$

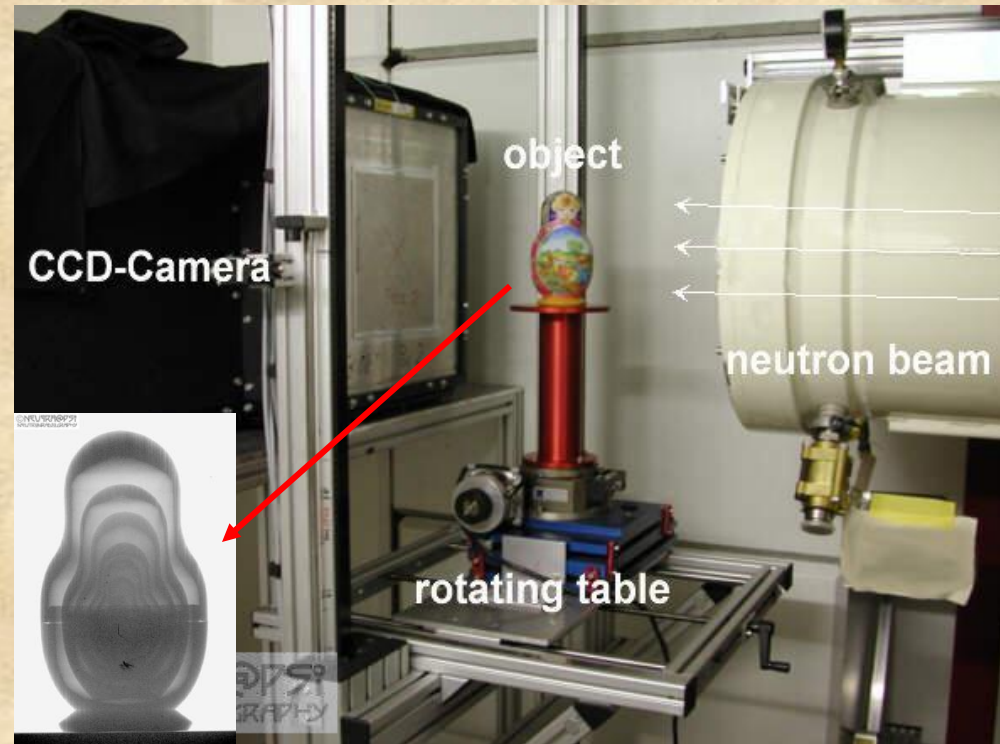
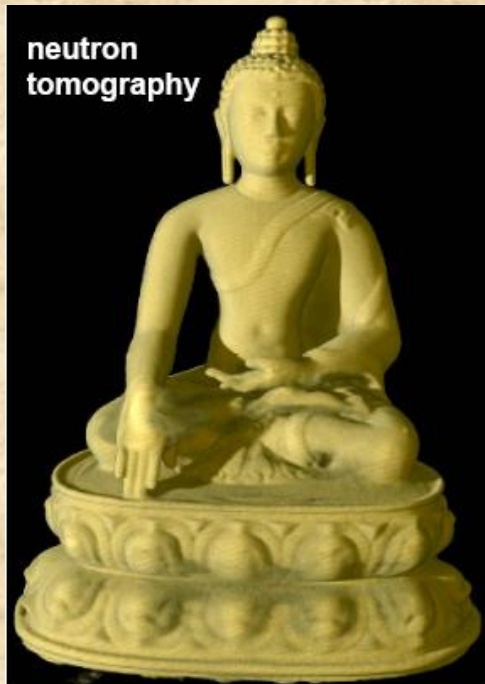
высокая чувствительность к гамма-фону (Z_{Gd})
низкая эффективность 25% (1.8A)
время экспозиции 4 мин

Сцинтилляционные детекторы + CCD readout



Томограф NEUTRA, PSI

- Размер образца 4x4 – 30x30 см
- Динамический диапазон до 16 бит
- пиксель 0.02 – 0.15 мм
- число пикселей 1024 до 2048 (X, Y)
- Сигнал/шум 120 (CCD -20 -50 С)
- время экспозиции 2-60 сек/кадр
- время считывания 2 сек/кадр



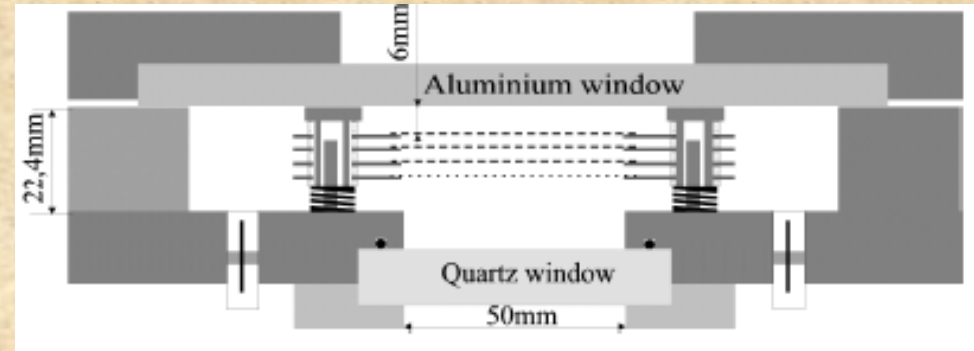
Заключение

1. Основная тенденция развития детекторов нейтронов – гибридные конструкции, которые сочетают в себе достоинства различных типов детекторов и компенсируют их недостатки
2. При этом ключевую роль играют появление новых материалов, разработка новых технологий для массового производства микроструктур с требуемыми характеристиками
3. Запуск и эксплуатация новых высокопоточных источников является стимулирующим фактором для разработки новых детекторов
4. Объемы производства детекторов нейтронов заметно ниже объемов производства детекторов ионизирующего излучения. Тем не менее, широкое применение идей и технологий разработанных для детекторов ионизирующего излучения в различных областях исследований вносят большой вклад в развитие техники нейтронных детекторов

Газовые сцинтилляторы

GEM+CCD ($^3\text{He}+\text{CF}_4$)

Lyman-Alpha Neutron Detector (LAND) – сигналом служит характеристическое излучение водорода (121.6 нм) при ионизации газа протоном и тритоном. Добавка инертных газов (Xe/Kr) может увеличить интенсивность сигнала в 1000 раз.

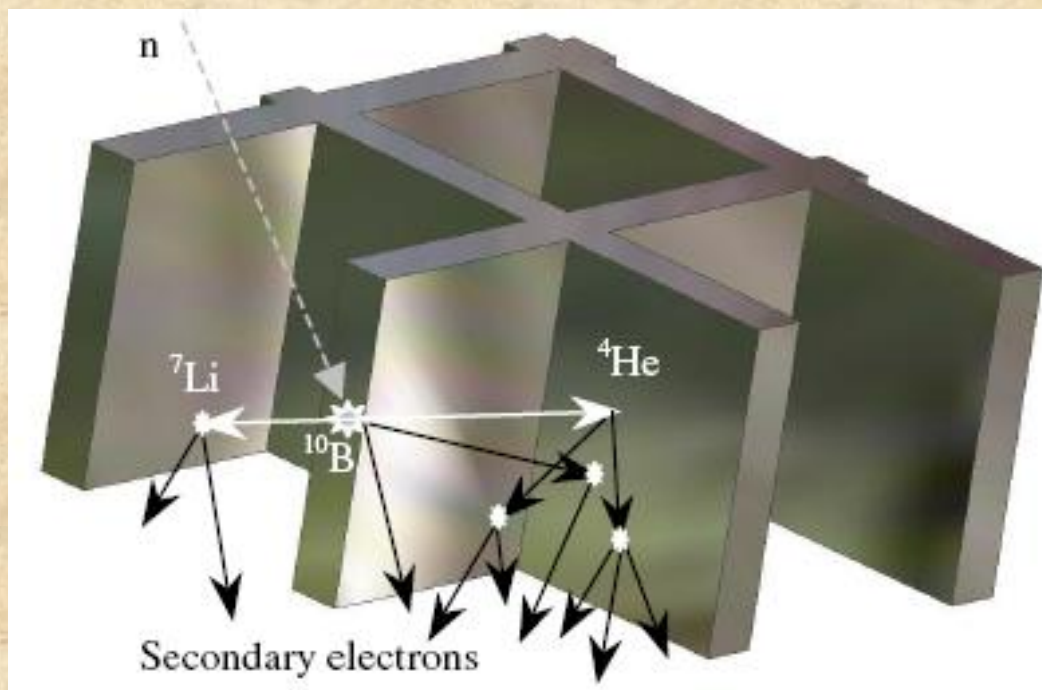
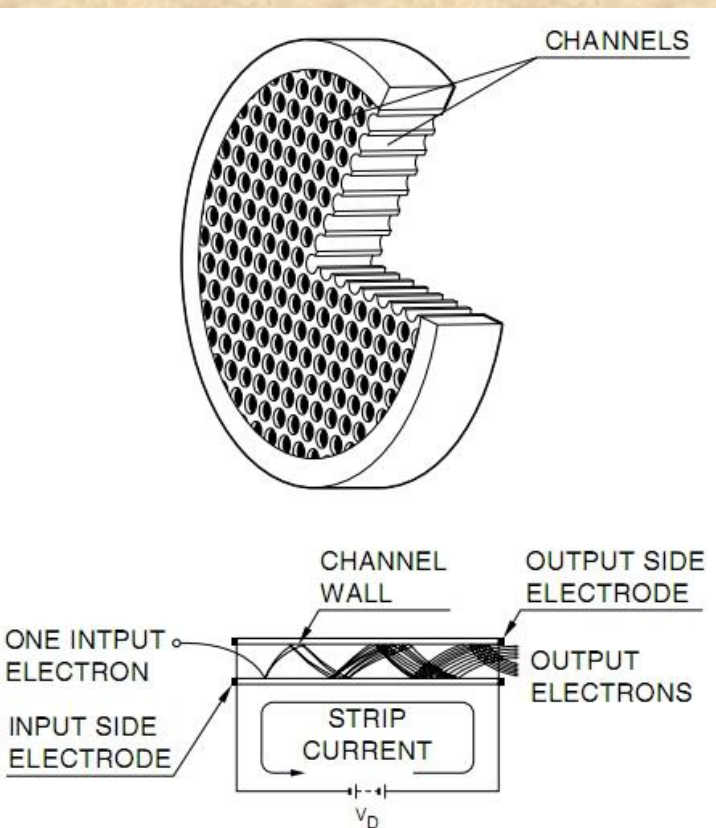


MCP – Micro Channel Plates

MCP – вторичноэмиссионный умножитель электронов

Применяются для регистрации ионов, электронов, рентг. излучение, UV

- + Расчетная эффективность до 80%
- + FWHM – размер канала (10-25 μm)
- + $\Delta t < 1\text{ns}$
- + GAIN $\sim 1\text{E}4$ и выше
- + угловая зависимость эффективности (коллимация пучка)



Readout:

- 1) strips - LC delay line, pixel ... fast
- 2) Phosphor screen + CCD slow

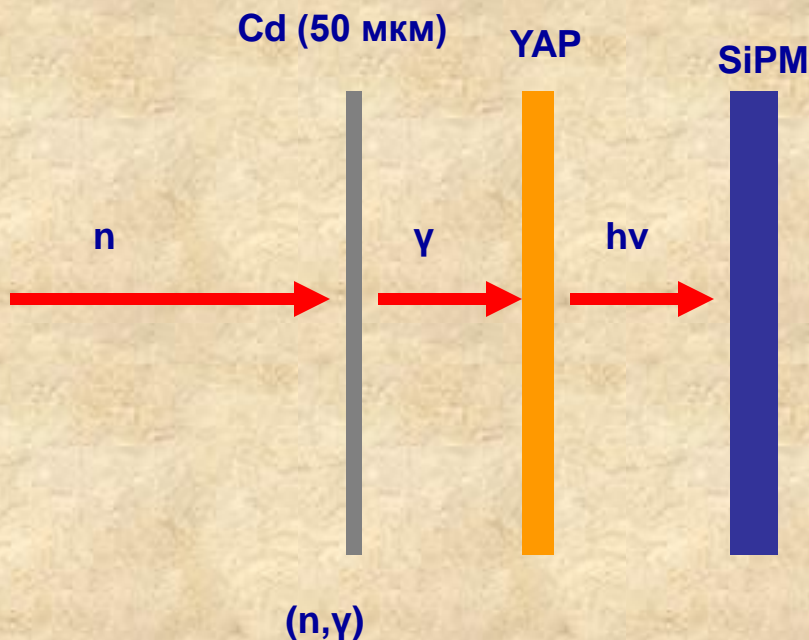
Hamamatsu Corp.
Del Mar Photonics
Burle Industries
PHOTONIS Group
North Inst.Tech.Indust.Group
ООО ВТЦ «Баспик»

Cd-YAP-SiPM detector

YAP Crystal (Yttrium Aluminium Perovskite) –
сцинтиллятор с характеристическим
временем высвечивания (decay time) 27нс
(350нм)

SiPM – матрица лавинных фотодиодов, работающий в
Гейгеровском режиме

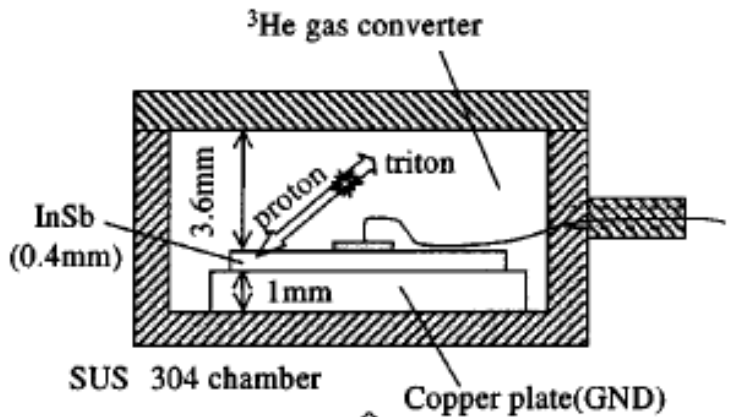
- + Динамический диапазон от 1 фотона (400нм)
- + Размер 1x1 - 6x6 (ммхмм)
- + Пиксел 25-100 мкм
- + $\Delta t < 1$ нс
- + GAIN $\sim 1E6$
- + Стабильная работа в магн. полях до 15Тл
- + Невысокая стоимость (см. PMT)



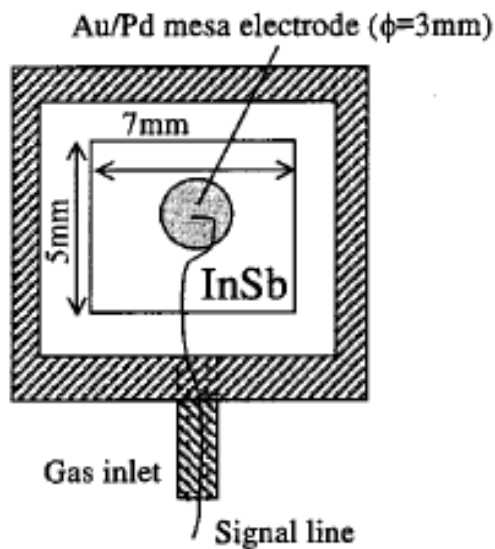
- + Постоянная эффективность в широком диапазоне (1-200 мэВ)
- + Высокое врем. разрешение
- + Стабильная работа в магн. полях до 15Тл

- Низкая эффективность
- Низкое соотношение сигнал/фон

Криогенный полупроводниковый детектор

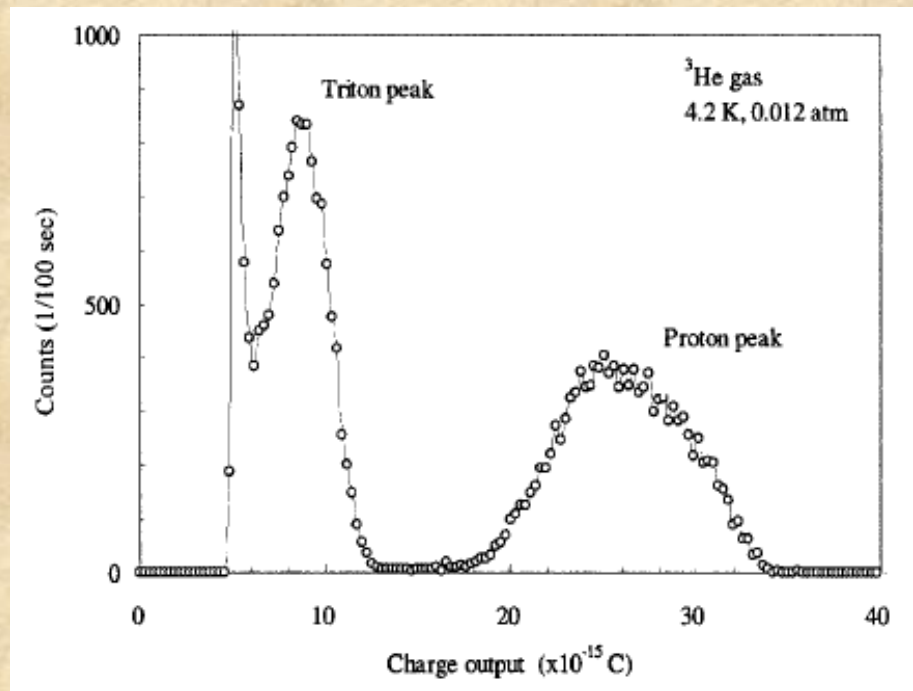


neutrons
(a) side view



(b) top view

- Полупроводник InSb (5мм x 7мм x 0.4мм)
- конвертор He-3: 4.2К, давление до 1.5 атм (160 атм при 300К)
- временное разрешение 80 нс
- пространственное разрешение 60мкм
- эффективность 20% (1.8А)



- Амплитудный спектр P(He-3)=0.012 атм, 4.2К

MILAND project (MWPC, MSGC, SGPC) for SXD&Reflect

- MWPC: 320ммx320мм, 15 бар He₃/CF₄
- Макс. скорость счета ~1 МГц (10%)
- Простр. разрешение ~1.2 мм
- Эффективность >70% (2.5A)
- n/γ: 10⁻⁸ (Co-60)
- frontend: <1 мкс
- 640-канальный параллельный readout (ASIC)

2 режима работы детектора:

- 1) Приоритет эффективности
- 2) Приоритет простр. разрешения

