

Газоразрядные детекторы фотонов

- Параметры и выбор состава газовой смеси
 - эффективность регистрации
 - пространственное разрешение
 - амплитудное разрешение
- Применяемые конструкции детекторов и их параметры
- Регистрация фотонов УФ диапазона, примеры

- Газоразрядные детекторы регистрация гамма-квантов **3-50 кэВ** (SAXS, WAXS)
- Необходимое пространственное разрешение **~100 мкм** (структурные исследования)

Чем обусловлены границы по энергиям – 2 основных фактора:

- 1) Эффективность регистрации
- 2) Пространственное разрешение

нижняя граница энергий:

- высокое сечение ФЭ,
- но и высокие потери во входном окне детектора – Бериллий, алюминий – необходим для создания избыточного давления газа в рабочем объеме детектора

Верхняя граница:

- малое сечение ФЭ => для эффективной регистрации необходимо увеличить давление и/или толщину детектора
- избыточное давление: более сложная механика

Выбор газовой смеси

- Эффективность регистрации (квантовая эффективность) - Сечение реакции (ФЭ, КР)
- Амплитуда сигнала и с/ш – число первичных э/и пар и высокий КГУ
- Пространственное и амплитудное разрешение – развитие вторичных процессов

Энергия фотонов СИ: $0.1 \text{ кэВ} < E < 100 \text{ кэВ}$

Основные механизмы: фотоэффект, Комптоновское рассеяние

Фотоэффект

Первичная частица – фотоэлектрон $E_e = E_\gamma - E_B$

E_γ - энергия регистрируемого фотона

E_B - энергия связи электрона на атомной оболочке (K, L, M...)

вторичные - фотон: $E_{\gamma 1} = E_{b1} - E_{b2}$ Переход e с уровня 2 на 1

либо - Оже-электрон: $E_{оже} \approx E_B$

			18
		17	He
8	9	10	
O	F	Ne	
16	17	18	
S	Cl	Ar	
34	35	36	
Se	Br	Kr	
52	53	54	
Te	I	Xe	
84	85	86	
Po	At	Rn	

Сечение ФЭ $\sim Z^5$:

выгодно использовать газ с высоким Z: благородные газы Ar(дешевый), Xe (10\$/л), Kr(3\$/л)

Кроме этого,

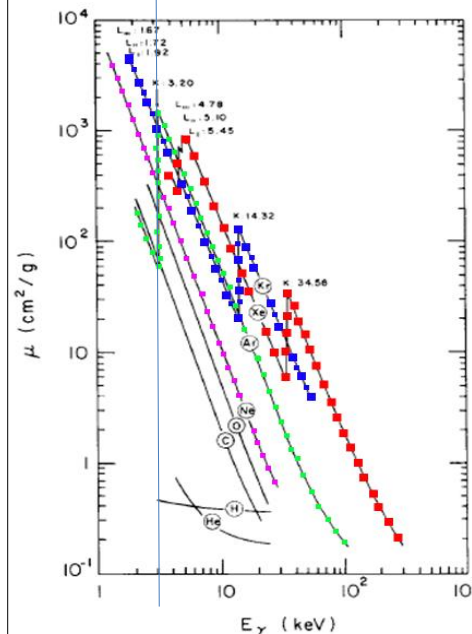
Благородные газы – высокое газовое усиление

Гаситель вторичных электронных лавин:

чаще CO₂, объем газа ~ 10%

Выбор газа-конвертора: эффективность

Массовый коэффициент поглощения фотонов в различных газах



Аргон:

линейность в широком диапазоне энергий

K-оболочка Ar: $E_K = 3.2 \text{ кэВ}$ $\mu \sim 1000$
для $E = 3.0 \text{ кэВ}$ $\mu \sim 170$

Ксенон:

более эффективен,

имеет 2 скачка μ : $E_K = 34.56 \text{ кэВ}$, $E_L \sim 5 \text{ кэВ}$

Криптон:

эффективен для высоких энергий

K-оболочка $E_K = 14.32 \text{ кэВ}$

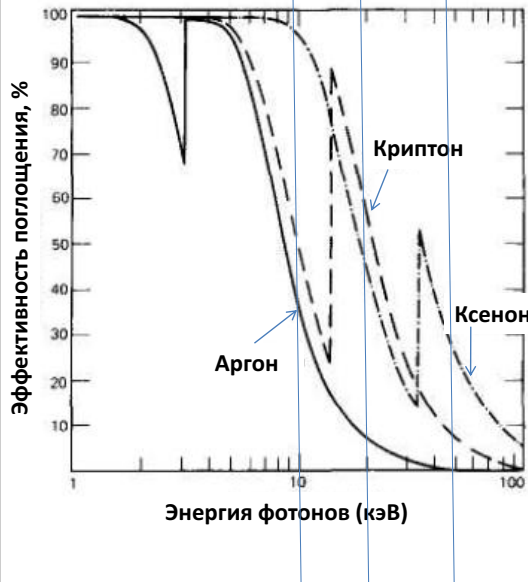
Необходимо выбирать газ-конвертор под определенный диапазон энергий

<http://xdb.lbl.gov/>

http://henke.lbl.gov/optical_constants/

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>

Эффективность поглощения фотонов в пропорциональном счетчике

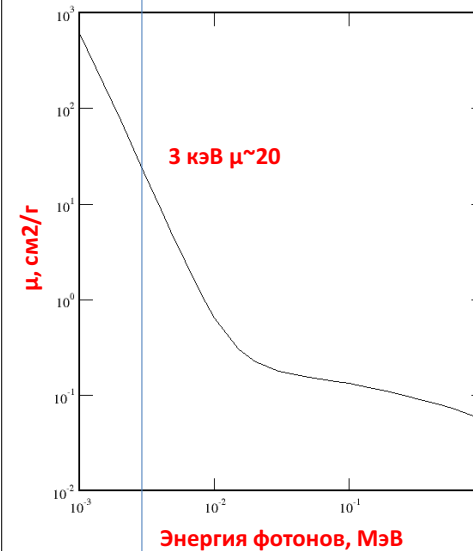


Толщиной счетчика 5 см
Газы при нормальных условиях:
1 атм., 20 С

Тип газа-конвертора определяет область «эффективности счетчика»

Поглощение фотонов во входном окне

Массовый коэффициент поглощения фотонов в бериллии (Be)



Часть фотонов неизбежно поглотится во входном окне
- необходимо учитывать при вычислении эффективности регистрации

Например, для $E_f = 3$ кэВ

Ar $\mu = 170$ (ФЭ)
Be $\mu = 20$ (поглощение)

для $E_f = 3.2$ кэВ

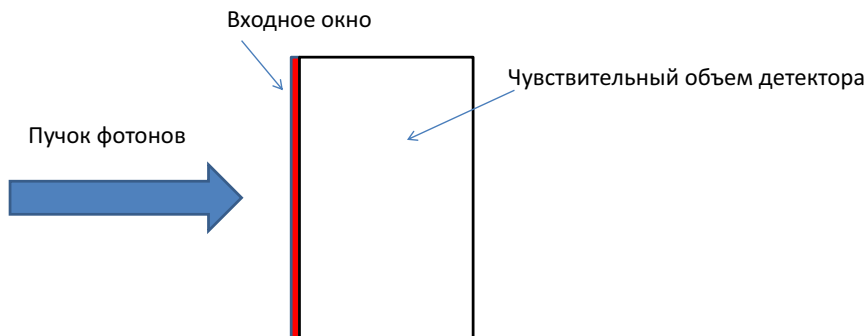
Ar $\mu = 1000$ (ФЭ)
Be $\mu = 15$ (поглощение)

- окно нельзя изготовить очень тонким
Обычно 50-250 мкм

• Рост поглощения в окне при уменьшении энергии ограничивает практическое применение детекторов до энергий ~ 2 кэВ

• Для снижения поглощения применяют тонкие фольги с поддерживающей сеткой

При учете потерь фотонов во входном окне детектора эффективность регистрации составит

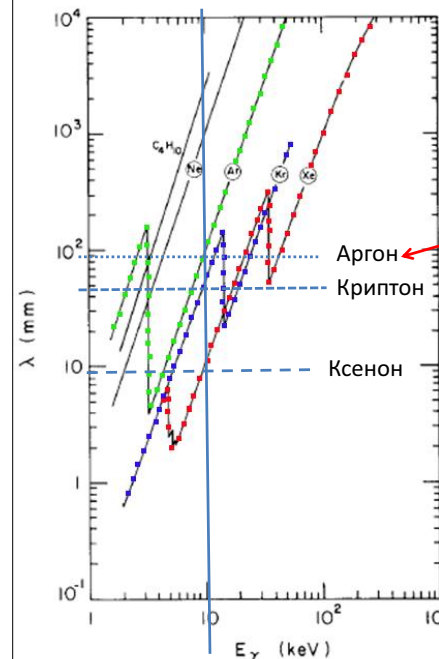


$$\varepsilon = \exp(-\mu_w d_w) * [1 - \exp(-\mu_d d_d)]$$

$$\mu [cm^{-1}] = \mu [cm^2 / g] * \rho [g / cm^3]$$

Толщина Be-окна $\sim 50-300$ мкм
Алюминий до неск. мм.
Толщина детектора $\sim 2-5$ см и более

Выбор толщины детектора



Длина свободного пробега фотонов в различных газах при н.у. (1 атм., 20 С)

На длине λ поглотятся только 63% частиц

Много!
нужно повышать давление газа
Или увеличивать толщину детектора

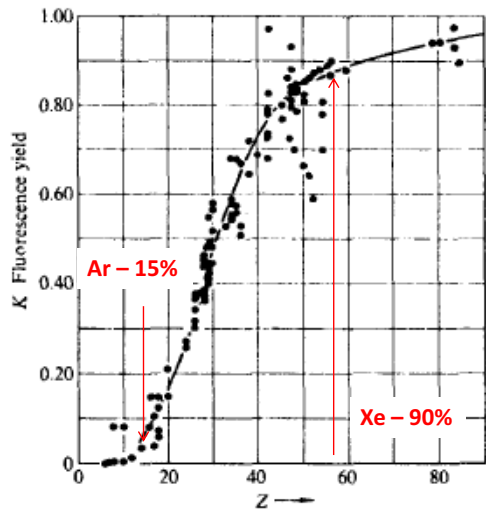
Рост толщина детектора (MWPC):

- Увеличение времени дрейфа ионов, т.е. снижение загрузки. способности
- параллакс – зависимость разрешения от угла падения частиц
- рост прикладываемого высокого напряжения

Вторичные процессы

После испускания фотоэлектрона, возбужденная молекула возвращается в основное состояние по 2 каналам:

- 1) флуоресценция (испускание фотона)
- 2) Оже-эффект (испускание электрона)



Выход флуоресценции (ВФ) с К-оболочки - (часть вторичных процессов с излучением фотона) как функция Z

$$ВФ = \frac{N(фл)}{N(фл)+N(Оже)}$$

ВФ отражается на структуру амплитудного спектра и пространственное разрешение

Ar (К-оболочка):

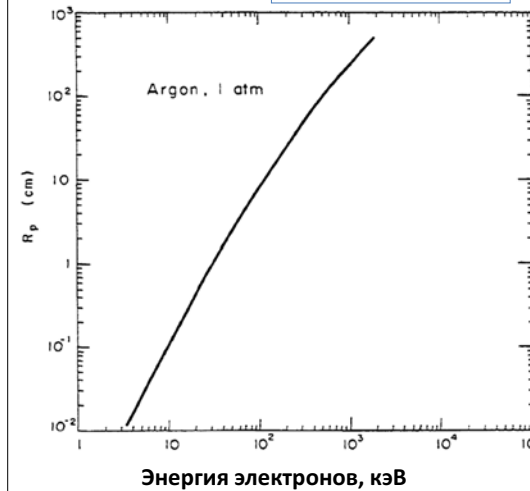
- 15% эмиссия фотона с энергией $\sim E_K$
- 85% выход 2-х электронов с энергиями $E_e = E_\gamma - E_K$ (ФЭ)
- $E_e \sim E_K$ (Оже)

Пространственное разрешение

Пространственное разрешение детектора **определяется расстоянием между точкой захвата фотона (ФЭ) и центром тяжести облака зарядов ионизации**, которые образуют вторичные электроны в газе

Пробег электронов

$$R_p = 0.71 E^{1.72}$$



E (МэВ) - энергия электронов
 R_p (г/см²)

$$R(см) = R_p(г/см^2) / \rho(г/см^3)$$

Ar:

- $E=3$ кэВ $R = 100$ мкм при н.у.
- $E=10$ кэВ $R = 1$ мм при н.у.
- $E=30$ кэВ $R = 1$ см при н.у.



- 1) Давление газа? Использование стоп-газов?
- 2) Для получения высокого пространственного разрешения предпочтительнее использовать более тяжелый Xe (3.3 раза)

Пространственное разрешение

2 основных фактора:

- Энергия вторичных электронов: энергия фотонов, тип газа (энергия оболочки)
- Удельные потери энергии электронов dE/dx : атомный номер газа (Z, ρ)



Из-за «оболочечной» структуры атомов газов энергия вторичных электронов нелинейно зависит от энергии фотонов

Например у ксенона $E_K = 34.6$ кэВ.

При энергиях фотонов $E_\gamma < E_K$ «работает» L-оболочка ($E_L = 5.22$ кэВ)

энергия фотоэлектронов $E_e = E_\gamma - E_L$ до 29.4 кэВ!

=> существенно больше чем для $E_\gamma > E_K$ (до энергии $E_\gamma = E_K + 29.4$ кэВ = 64 кэВ)

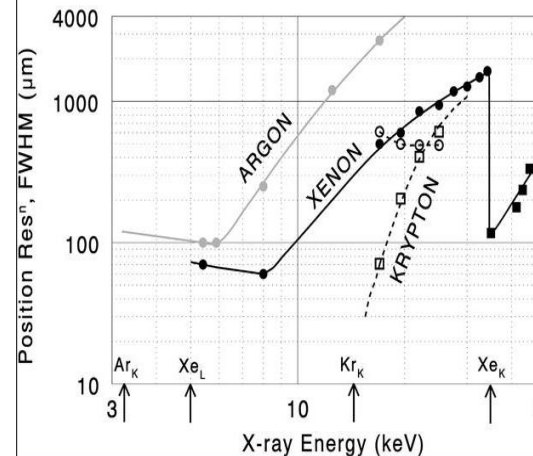
=> пробег электронов больше => пространственное разрешение хуже

Для криптона К-линия $E_K = 14.3$ кэВ

Для аргона К-линия $E_K = 3.2$ кэВ

Получить более высокое разрешение удастся для энергий фотонов немногим превосходящей энергию К, L...-линии с одновременным сочетанием высокого давления газа.

Подбирая газ, его давление можно оптимизировать газовую смесь для регистрации фотонов данной энергии с максимальным разрешением



Аргон

- Пр. разрешение (FWHM) ~ 100 мкм
- Достижимо в области энергий фотонов **3.2-6 кэВ**

Ксенон

- (FWHM) ~ 100 мкм в диапазоне **6-10 кэВ**
- Рост со 100 мкм до 300 мкм в диапазоне **10-15 кэВ**

Криптон

- Вблизи К-оболочки Kr_K в области **15-20 кэВ** (FWHM) $\sim < 100 - 200$ мкм

- В области **20-34.6 кэВ** доминируют ФЭ с большими длинами пробега (Kr, Xe)

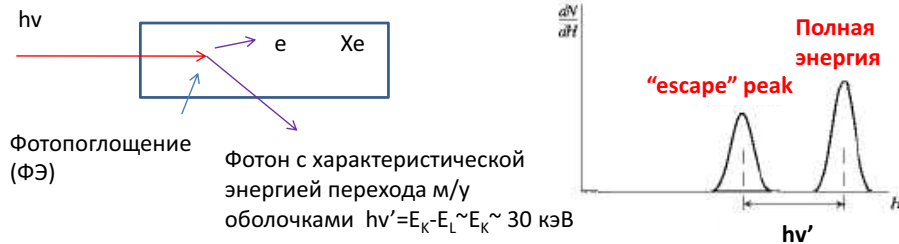
Давление газа: 10^5 Па (с 10% CO_2)

- В области **34.6-45 кэВ** (выше Xe_K) (FWHM) $\sim 100 - 350$ мкм

Амплитудные спектры

Функция отклика (характеристический амплитудный) спектр может иметь сложную форму из-за вклада нескольких эффектов:

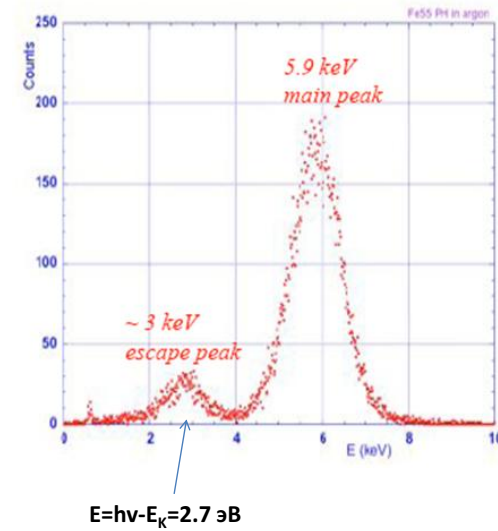
1) **Вторичный фотон может покинуть рабочий объем детектора** (например поглотился в стенке), унося энергию E_K , в этом случае мы «видим» только $E = hv - E_K$ – “escape” peak



2) **Первичные фотоны могут вырывать электроны из входного окна детектора** – выбирают материал с низким Z (бериллий)

3) Энергия вторичных фотонов может быть достаточной для **вырывания электронов из материала катода** (часто это медь)

Амплитудный спектр поглощения 5.9 кэВ фотонов в аргоне (источник фотонов Fe-55)



Криптоновая смесь

Амплитудный спектр поглощения фотонов 17.4 кэВ:

1) «**Escape-пики**» с **K-подоболочек (~60% событий)**: вторичные фотоны 12.6 кэВ и 14.1 кэВ (Kβ)

Пробег ≈ 100 мм (Kr/10% CO₂ 1 атм.) в большинстве случаев покидают детектор, без взаимодействия.

Т.к. энергия связи на K-оболочке 14.3 кэВ, энергия фотоэлектрона 17.4-14.3=3.1 кэВ.

Малый пробег электрона и мы имеем хорошее пространственное разрешение. FWHM~80 мкм

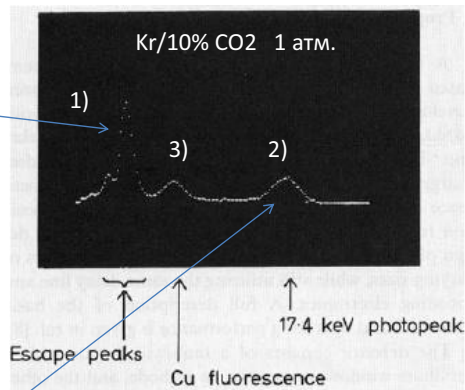
2) **События из пика полной энергии:**

- Снятие возбуждения через Оже-эмиссию
Энергия электронов ~ 10.7 кэВ

- Взаимодействие первичного фотона с L-оболочкой ($E_L = 1.8$ кэВ)

Оба эффекта приводят к появлению электрона с большой энергией

Разрешение хуже! FWHM~580 мкм



3) **Часть фотонов проходят через газ и приводят к эмиссии фотонов с K-оболочки катода с медным покрытием**

Амплитудным анализом и отбором событий по амплитудам можно обеспечить FWHM~80 мкм!

Реальное пространственное разрешение детектора

$$\sigma_{\text{det}} = \sqrt{\sigma_{\text{noise}}^2 + \sigma_{\text{diff}}^2 + \sigma_{\text{el_range}}^2 + \sigma_{\text{aval}}^2}$$

Вклад 4-х независимых компонент (Параллакс не учтен)

σ_{noise} – шум электроники

σ_{diff} – диффузия электронов при дрейфе к аноду

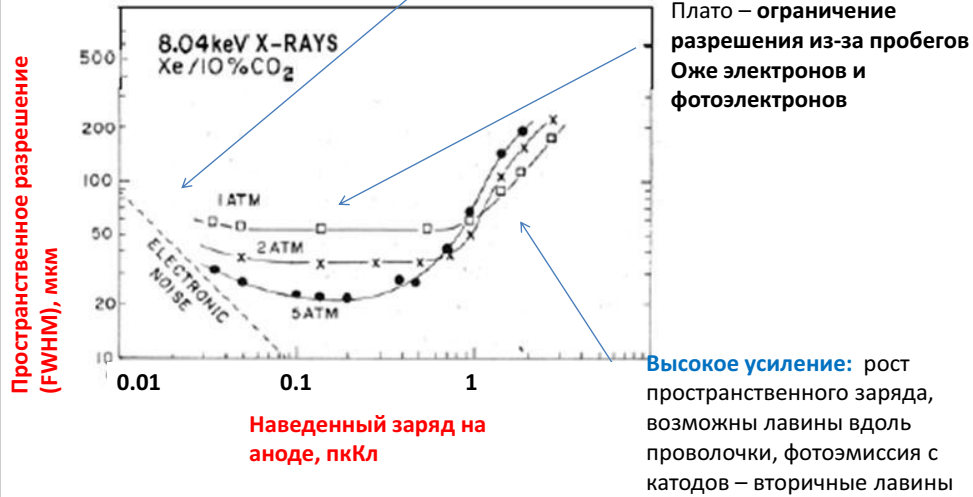
σ_{er} – пробег фотоэлектрона или Оже-электрона

σ_{aval} – флуктуации центра тяжести электронной лавины

- Уровень шума электроники зависит от типа и качества считывающей электроники
- Вклад диффузии обычно невелик (малые расстояния дрейфа)
- Пробеги электронов можно оценить зная тип газа и энергию фотонов
- σ_{aval} зависит от типа детектора и величины КГУ (режим работы детектора)

Пространственное разрешение (FWHM) пропорционального счетчика от величины заряда на аноде

Смесь Xe/10%CO₂ (1, 2, 5 атм.)



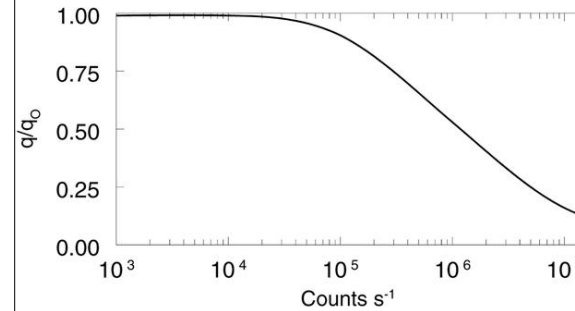
Загрузочная способность

Как увеличить загрузочную способность многопроволочных пропорциональных камер?

- уменьшение расстояния анод-катод (дрейф-ионов)
- применение «быстрых» газов – CF₄, например смесь Xe/CO₂/CF₄
- малое время интегрирования сигнала (необходим высокий КГУ)

- Стандартный съем сигналов на линию задержки 100-200 кГц
- Поканальный метод съема до 10⁸ Гц/ детектор

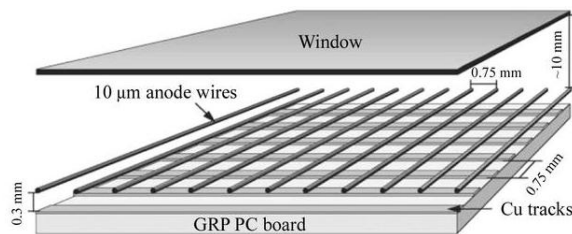
MWPC – ограничение на локальную загрузку детектора 10³-10⁴ ф*с⁻¹*мм⁻² из-за дрейфа «медленных» ионов. **Для современных источников СИ этого мало!**



Т.к. заряд зависит от КГУ (размера лавины), то более высоких загрузок можно достичь снижая КГУ (число электронов в лавине).

Как увеличить загрузочную способность детектора – многоканальность и микроструктуры

Установка одного усилителя на анодную проволочку MWPC (микрозазорная геометрия)



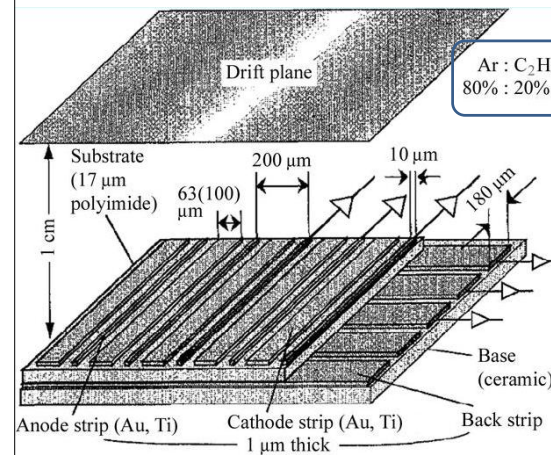
Daresbury Laboratory:
RAPID (refined ADC per input detector) system

Сочетание:

- быстрого времени сбора ионов (оптимизирована геометрия и газ)
- Малого времени формирования импульса
- Быстрой регистрирующей электроники

- Интегральная (на детектор) скорость счета 2 × 10⁷ Гц
- На дифракционный пик до 10⁶ Гц
- Пространственное разрешение 300 мкм (FWHM)

Усилитель на стрип (MSGC)



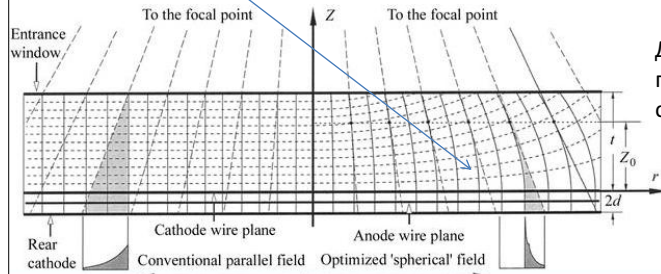
Двухкоординатный детектор изготовлен на основе тонкой основы – 17 мкм полиамидная пленка

С одной стороны пленки – чередующиеся стрипы анода и катода X, На другой стороне стрипы катода Y, которые перпендикулярны стрипам X

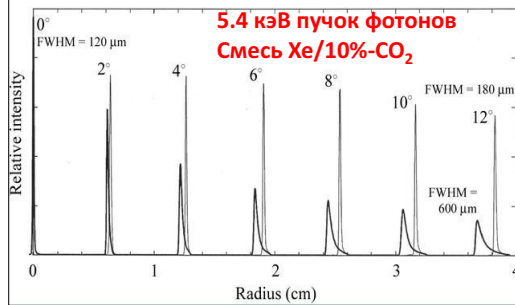
Подобный детектор использовался для экспериментов на ускорителе Spring-8 для малоугловой дифракции (SAXS)

Проблема параллакса

Одна из первых работ группы CERN – изучение возможности использования **сферического дрейфового поля** вместо традиционного плоского MWPC



Детектор со сферическим полем реально применялся на синхротроне LURE в 1980гг



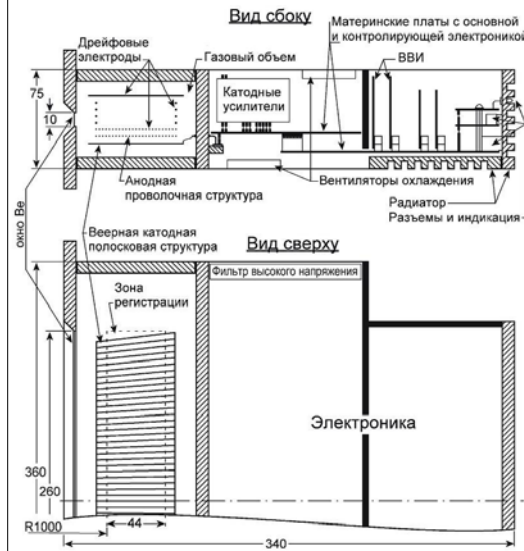
Пространственное разрешение
Плоская и сферическая геометрия
Углы падения пучка 0-12°.

Заметно улучшение,
Но схема со сферическим полем
большого распространения не получила

- Изучалась а лаб. Daresbury
- В ILL изучалась возможность использования в детекторах нейтронов

Примеры современных разработок

Детектор ОД-3М – быстрый, беспараллаксный, однокоординатный рентгеновский детектор для угловых измерений в дифракционных экспериментах на пучках СИ.
ИЯФ СО РАН (Будкера)



- Используется MWPC, съем сигналов с каждого стрипа.
- Верная структура катода обеспечивает отсутствие параллакса.

Детектор работает в счетном режиме:
определяет координаты каждого зарегистрированного кванта

Характеристики детектора

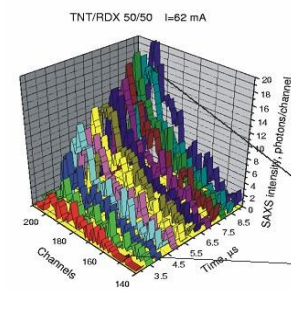
входное окно (Be)	200 * 10 * 0.2 мм
Количество каналов	3328
фокусное расстояние, м	0.35 0.7 1 1.5
угол регистрации, град	30 15 13 7.5
Угловое разрешение (FWHM), ~град (*1E-3)	50 25 129 125
скорость счета (50% потеря)	10 ⁷ событий/сек
диапазон энергий	6-10 кэВ
газовая смесь	Ar90% / CO2
избыточное давление в камере	0.2 - 1 атм

Детекторы на основе микроструктур

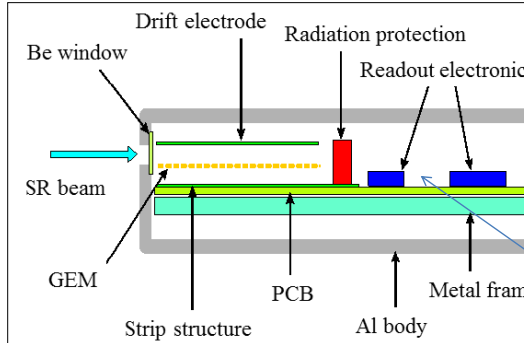
DIMEX – Detector for IMaging of Explosions
(детектор для исследования взрывов):

ИЯФ им Г.И. Будкера

получение динамической картины взрыва синхронно со вспышками СИ от отдельных импульсов (250 нс, ВЕПП-3), м/у вспышками 100 нс



образование
наноалмазов
прохождение
фронта
детонации



Камера состоит из:

- дрейфового электрода
- GEM (отв. 70 мкм, м/у отв. 140 мкм)
- MSGC – катодный стрипы 100 мкм (256 – 512 шт.)

- Смесь Xe/20%CO2 при 7 атм.
- Окно углепластик(DIMEX1) или Be (DIMEX3).

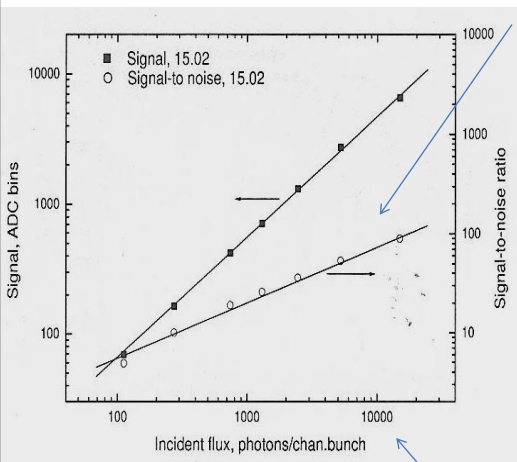
Электроника расположена в газовом объеме и закрыта от прямого излучения.

Характеристики DIMEX

- временное разрешение – менее 40 нс
- пространственное разрешение – менее 100 мкм (RMS) (200 FWHM)
- число каналов – 256 – 512 (в зависимости от модификации)
- эффективность регистрации – 50% при E_q=20 кэВ
- быстродействие – до 10¹¹ фотонов/канал/с
- динамический диапазон – 100
- Частота кадров до 8 МГц (32 кадра через 100 нс)
- Размер кадра до 512 каналов

Считывающая электроника интегрирующего типа, позволяет измерять входной сигнал с точностью 1%.

Динамический диапазон DIMEX



Линейная работа до 10000 ф/имп/канал (импульс 250 нс, канал 100 мкм)

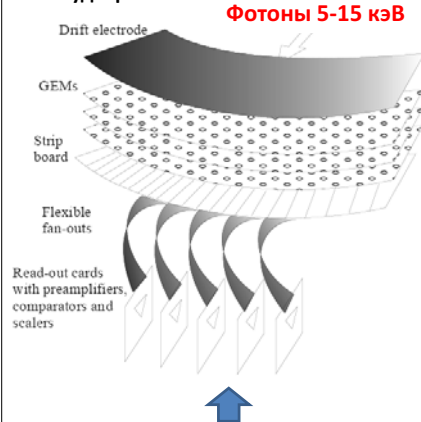
Дин. диапазон: (Сигнал/шум) ~100

Максимальная нагрузка и дин. диапазон ограничены пространственным зарядом – накоплением положительных ионов дрейфовом промежутке

Эта нагрузка соответствует 10^{11} ф/мм²/с

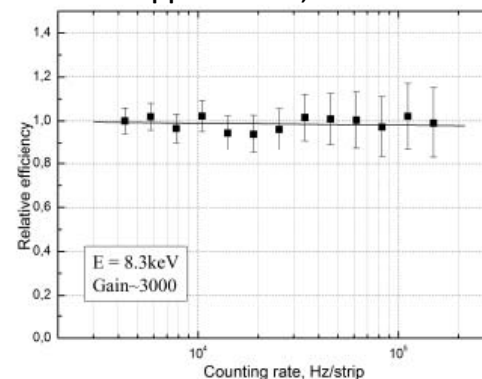
Детектор для широкоугольной дифракции (WAXS) – OD4

ИЯФ Будкера



- В основе 3-х каскадный GEM, изогнутой формы
- Др. промежутков 5мм, м/у GEM 1.5 мм
- Счит. Электрод: стрип 200 мкм, 2048 шт.
- Длина стрипа 30 мм, внутр. радиус кривизны 350мм
- Апертура детектора 67 градусов
- Входное окно – Ве
- Газ Ar/CO₂ (75/25 - 1 атм.)

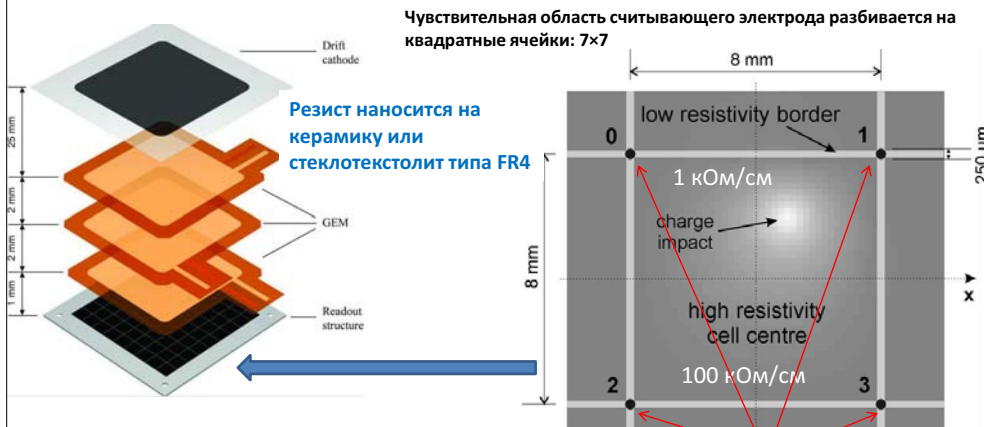
Загрузка до ~200 кГц/канал без заметного снижения эффективности, FWHM <0.5 мм



Электроника работает в счетном режиме, с единым порогом дискриминатора для каждого канала: усилитель, дискриминатор, счетчик импульсов

Если амплитуда больше порога, событие записывается, его координата – номер стрипа

Детектор VIP (Virtual Pixel detector) – перспективная разработка на основе GEM



Чувствительная область считывающего электрода разбивается на квадратные ячейки: 7x7

Резист наносится на керамику или стеклотекстолит типа FR4

Съем сигналов (3, 4, 6)

- После усиления облако электронов (кластер) собирается на считывающем электроде (анод) – с заданной резистивной структурой.
- Методом взвешивания сигналов с вершин определяется ц.т. кластера сразу по двум координатам

Для точности восстановления координаты комбинируют 3, 4, 6 точечные методы

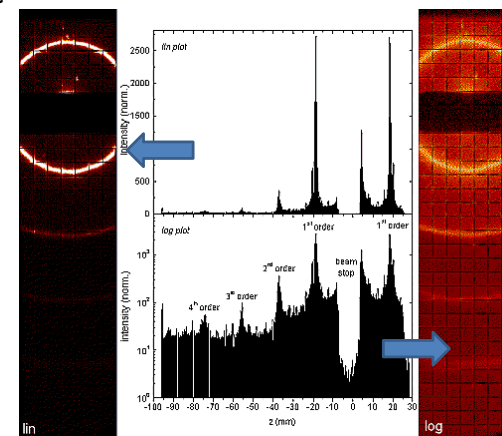
Особенности VIP :

- большая площадь регистрации,
- разрешение ~100 μm (FWHM) – на 2 порядка меньше размера ячейки.
- Но высокие требования к качеству электроники и уровню сигнала: (КГУ ~10⁴, ксенонная смесь), т.к. пр. разрешение ~ соотношению «сигнал/шум»

Характеристики 3 x GEM + VIP – анод:

- Газ: Xe/CO₂ (90/10) при н.у. (1.3×10^5 Па)
- Длительность сигнала <100 нс
- Средняя нагрузка до 2×10^5 фотонов/см²с⁻¹ на детектор с ячейкой 8 x 8 мм (7x7 ячеек)
- уровень собственного шума ~Гц/детектор
- 280x280 виртуальных пикселей: размер пикселя 200x200 мкм, т.е. уровень шума на пиксел 10⁻⁴ Гц
- пространственное разрешение FWHM=120 μm (6.4 кэВ)

Дифракционная картина, полученная на липидных мембранах



Сравнение детекторов: ViP и Микрозасорной MWPC (RAPID system)

	ViP (существующий)	ViP (проект)	RAPID
Тип детектора	3 x GEM	3 x GEM	MWPC
Площадь регистрации	5.6 x 5.6 см	20 x 20 см	20 x 20 см
Число ячеек	7x7	50x50	-
Размер ячейки	8 x 8 мм	4 x 4 мм	-
Интегральная нагрузка (на детектор)	1) + 2)	1)	3)
Газовая смесь	Xe/CO ₂ 1.3 x 10 ⁵ Па	Xe/CO ₂ /CF ₄ 2 x 10 ⁵ Па	Xe/Ar/CO ₂
Толщина	25 мм	8 мм	15 мм
Эффективность @ 8 кэВ	99%	90%	70%
Число пикселей	4) 280x280	4) 2000x2000	4) 1024x1024
Каналов электроники	8x8	50x50	128x128
Временное разрешение	5)	5)	6) 10 мс

- 1) Средний детектируемый поток, умноженный на площадь детектора
- 2) Ограничено регистрирующей электроникой
- 3) Не зависит от площади
- 4) Кол-во пикселей может меняться в зависимости от метода интерполяции. Приведено для типовых значений
- 5) Ограничено временем дрейфа зарядов
- 6) Ограничено методом считывания из памяти регистрирующей электроники

Регистрация VUV (Vacuum Ultra Violet) и UV (Ultra Violet) газовыми детекторами: несколько слов

Проблемы:

- **Малая энергия фотонов 10-100 эВ:** ионизационный эффект мал, поэтому необходимо использовать газовые добавки с низким потенциалом ионизации
- **Необходимо «прозрачное» входное окно детектора** - с совместимой полосой пропускания фотонов данной энергии

Практических вариантов не много:

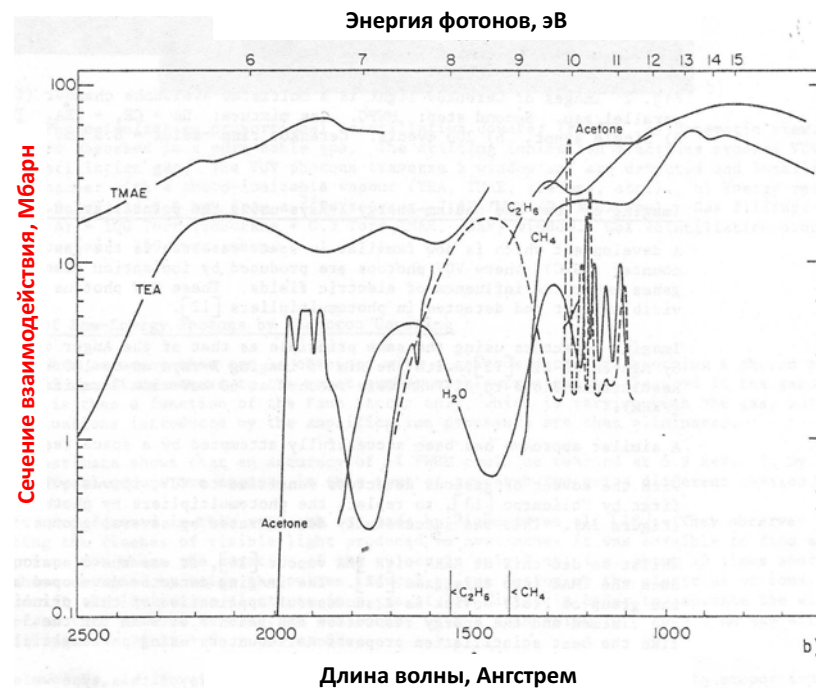
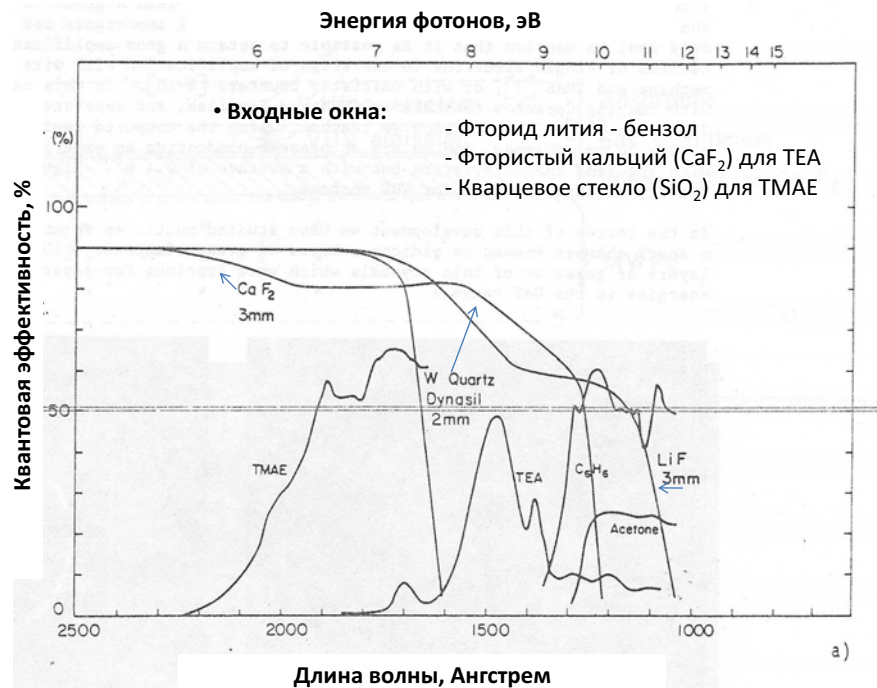
• Газы:

- Ряд углеводородов (бензол)
- ТЕА: Триэтиламин (C₂H₅)₃N
- ТМАЕ: Тетракис-диметиламиноэтилен [(CH₃)₂N]₂C

	E _I (eV)
C ₆ H ₆	9.3
TEA	7.45
TMAE	5.6



Соответствие сечения для данного газа и полосы пропускания окна



Твердотельные конвертеры УФ-фотонов: йодистый цезий

Фотокатод – электрод с покрытием, имеющее низкую работу выхода электронов
Таких материалов много: см. [wiki:Фотокатод](#)

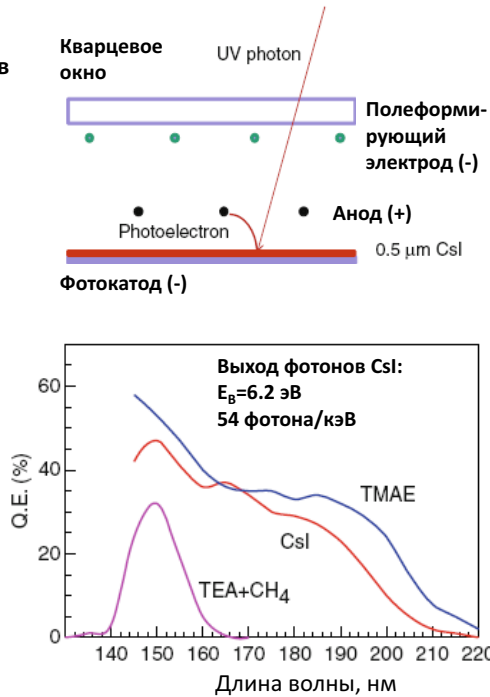
Фотон в фотокатодe вызывает эмиссию электронов (ФЭ). Они регистрируются детектором

- Эффективная толщина CsI $\approx 0.5 \mu\text{m}$,
- Материал химически совместим с газами CH₄, CF₄.

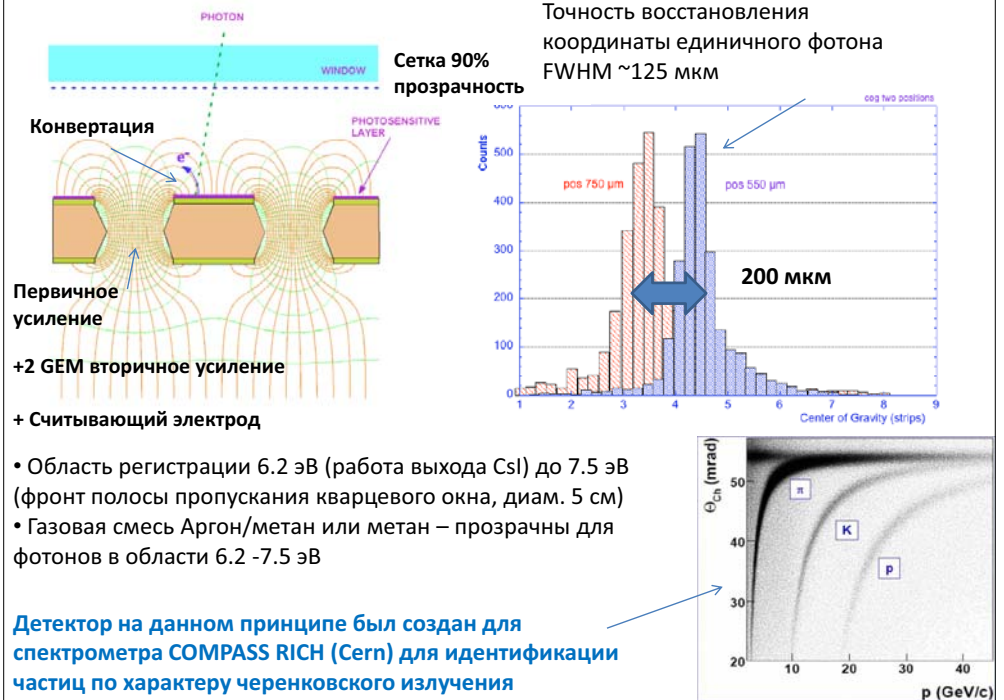
Необходимо:

- минимизировать вклад вторичных фотонов, образующихся в электронной лавине при усилении фотоэлектронов, а также
- высокая чистота газа: примесь O₂ на уровне ~ ppm приводит к снижению эффективности и стабильности

В газовых фотодетекторах усилителями электронов могут служить MWPC, Micromegas, GEM



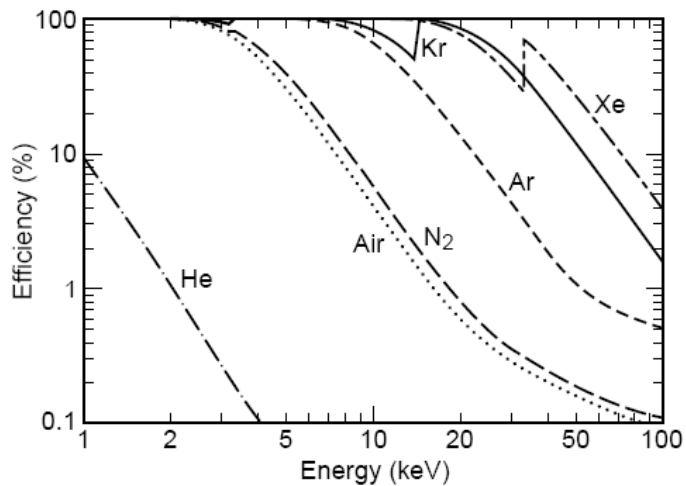
Регистрация УФ GEM детектором



Выводы по газоразрядным детекторам СИ

- Основной механизм – фотоэффект, сечение ФЭ $\sim Z^5$ – эффективны тяжелые газы
- Электронная структура атомов (энергии связи электронов на оболочках) определяют характер вторичных процессов в детекторе (энергию фотоэлектронов, Оже электронов, вторичных фотонов).
- Пробеги вторичных частиц и пространственное разрешение детектора нелинейно зависит от энергии первичных фотонов.
- Приемлемая эффективность регистрации детектора для более высоких энергий фотонов обеспечивается избыточным давлением газа-конвертора. Не маловажен при этом механический фактор – лимитирующий фактор при разработке газового объема детектора.
- Для регистрации низкоэнергетичных фотонов (УФ-диапазон) $< 1 \text{ кэВ}$ используют газы с низким потенциалом ионизации. Материал входного окна должны обеспечивать максимальную трансмиссию фотонов.
- Альтернатива газовым конверторам УФ-фотонов – твердотельные конвертеры (фотокатоды), с низкой работой выхода фотоэлектрона. Д. быть стабильны к составу газа.
- Максимальную загрузочную способность детектора удается достигнуть при использовании микроструктурных детекторов GEM, MSGC...

Background slides



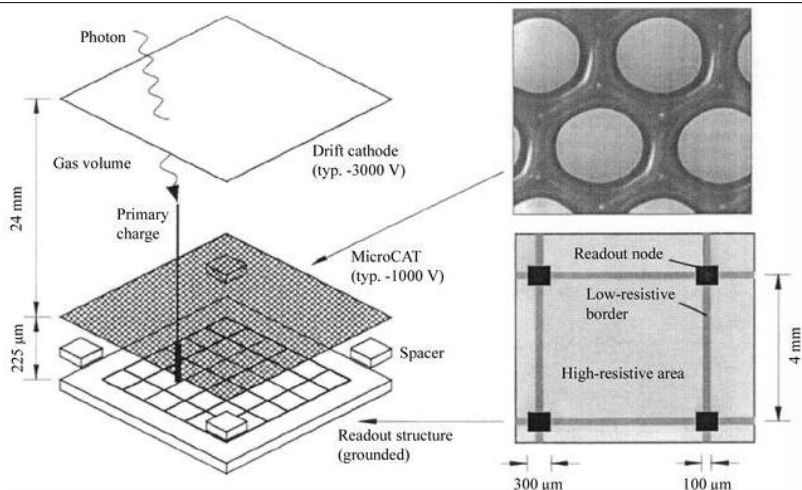
Efficiency of a 10-cm-long gas ionization chamber as a function of energy, for different gases at normal pressure.

MICROMEGAS Xrays

MICROMEGAS detectors have been developed for X-ray imaging.

Operate with pure Xenon at atmospheric pressure

Vertebra scanned with a MICROMEGAS



Gas-filled detectors can provide efficient high-resolution high-rate detection of X-rays. They have extremely low background, and in many applications provide a cost-effective solution that is unattainable with any other device. While they are considered a mature instrument, new developments in operation of wire chambers and innovative methods for electron multiplication in a gas are occurring. It appears likely that these detectors will continue to find useful application in synchrotron experiments in the foreseeable future.

PHOTON IMAGER:

UV FLOODLIGHT



CsI on QUARTZ WINDOW
FINE PITCH GEM
30 μm HOLES
@ 50 μm PITCH

