

# Сцинтилляционные детекторы

- Люминесценция: флуоресценция и фосфоресценция
- Принцип работы сцинтилляционного детектора
- Основные характеристики сцинтилляторов
- Органические и неорганические сцинтилляторы
- Регистрация сцинтилляций
- Фотодетекторы

## Люминесценция

• Л. – свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии: свет, тепло, частицы

### 2 механизма эмиссии фотонов:

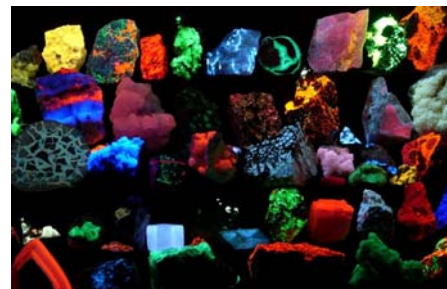
• **Флуоресценция** - эмиссия фотонов происходит после поглощения энергии и прекращается сразу после окончания воздействия.

Время высвечивания:  $\sim < \text{нс}$  – сравнимо с временем жизни атома в возбужденном состоянии.

• **Фосфоресценция** (или послесвечение) – эмиссия фотонов происходит и после завершения воздействия.

• Время свечения:  $\sim \text{мкс-часы}$ .

### Минералы флуоресцирующие при УФ облучении

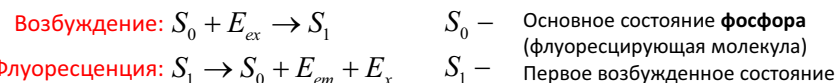


### Фосфоресценция статуэтки



## Флуоресценция:

орбитальный электрон или молекула возвращается из возбужденного состояния в свое основное состояние с испусканием фотона



↑ Безизлучательная часть энергии

**Ф. (кв. мех.) – разрешенный по спину излучательный переход между двумя состояниями одинаковой мультиплетности:**

- между синглетными уровнями  $S_1 \rightarrow S_0$
- или триплетными  $T_1 \rightarrow T_0$

$$M = 2 \sum_{s=1}^N s + 1$$

N – число электронов в молекуле/атоме  
s – спиновое число каждого электрона

Время жизни возб. состояния  $\sim 10^{-11} - 10^{-6} \text{ с}$

## «Стоксов сдвиг» волны

**Релаксация молекулы из состояния  $S_1$  также может происходить другими путями:**

1) **Без излучения** – диссипация энергии (нагрев - колебания атомов среды)

2) Органические молекулы – **конверсия в триплетные состояния:**

- излучение (фосфоресценция)
- безизлучательные переходы

$$E_{ex} > E_{em} \Rightarrow \lambda_{ex} < \lambda_{em}$$

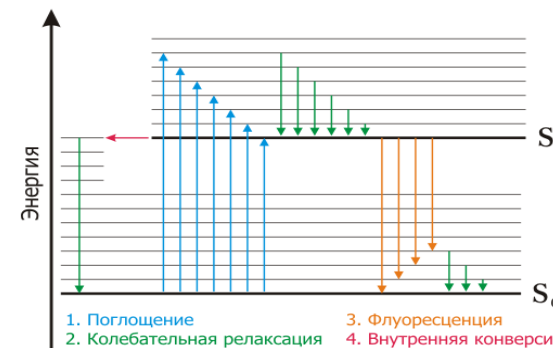
3) **Передача энергии другим молекулам**

Часть поглощенной энергии расходуется на тепловые колебания

-> безизлучательная утилизация энергии

-> спектр поглощения сдвинут относительно спектра излучения

Диаграмма Яблонского



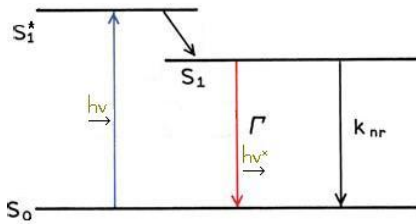
## Квантовый выход флуоресценции

- Квантовый выход флуоресценции при возбуждении атомов фотонами определяется как отношение количества испускаемых и поглощаемых фотонов

$$\Phi = \frac{N_{em}}{N_{abs}} \quad \begin{array}{l} N_{em} - \text{количество испускаемых в результате флуоресценции фотонов} \\ N_{abs} - \text{общее количество поглощаемых фотонов.} \end{array}$$

Чем больше квантовый выход фосфора, тем интенсивнее флуоресценция.

- Квантовый выход можно также определить с помощью упрощенной диаграммы Яблонского



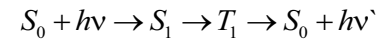
$\Gamma$  и  $k_{nr}$  – скорости излучательной и безызлучательной дезактивации возбужденного состояния.

Тогда доля излучательных переходов в основное состояние (квантовый выход) :

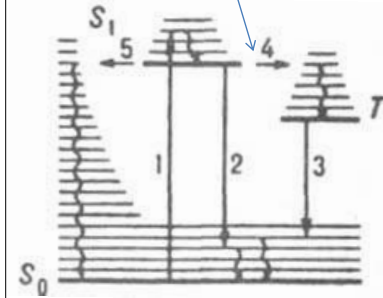
$$\Phi = \frac{\Gamma}{\Gamma + k_{nr}}$$

Квантовый выход всегда меньше единицы из-за безызлучательных потерь энергии!

**Фосфоресценция** – длительное свечение - переход в основное состояние из возбужденного состояния **иной мультиплетности** через запрещенные переходы.



Для перехода из метастабильного состояния в основное с излучением кванта света необходимо перейти в более высокое состояние, переход из которого разрешен – необходима доп. энергия (например, флуктуация энергии теплового движения).



Кв. переходы при молекулярной люминесценции:

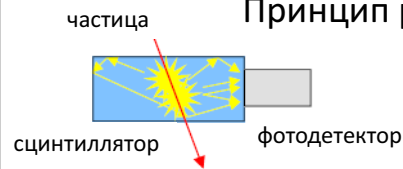
$S_0$  - основной электронный уровень (с колебат. подуровнями)  
 $S_1$  и  $T_1$  - возбужденные электронные уровни (сингл. и трипл.).

- Поглощение энергии - возбуждение
- излучательные переходы: флуоресценция и фосфоресценция
- безызлучат. переходы: интеркомбинац. конверсия ( $S \rightarrow T$ )
- внутр. конверсия

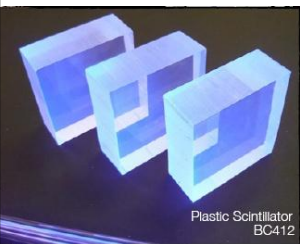
Волнистые стрелки – процессы колебательной релаксации энергии возбуждения

- В орг. молекулах с четным числом электронов  $N$  основное состояние является синглетным  $M=1$ , а возбужденные состояния могут иметь мультиплетность  $M=1$  и 3.
- В таких молекулах флуоресценция осуществляется при переходе из возбужденного синглетного состояния  $S_1$  в осн. состояние  $S_0$

## Принцип работы сц. детектора



Ионизационный «след» частицы ( $dE/dx$ ) в сц. преобразуется в фотоны видимого-УФ диапазона, которые в свою очередь регистрируются фотодетектором



**Сцинтилляторы:**

- Органические
- Неорганические (+ Газовые)

**Фотосенсоры:**

- Фотоумножители
- Микроканальные пластины
- Гибридные фотодетекторы (п/п)
- Кремниевые фотоумножители

**Требования к характеристикам сцинтилляторов:**

- **эффективное преобразование  $dE/dx$  в свет (световыход):** кол-во фотонов на кэВ поглощенной энергии
- **линейность преобразования энергии:** кол-во фотонов  $\sim dE/dx$
- **прозрачность** для собственного эмиссионного излучения
- **быстрое время высвечивания:** быстрый сигнал
- в-во д.быть хорошего **оптического качества** и подходящих размеров для практического использования
- **показатель преломления** должен быть  $\sim$  стеклу ( $n=1.5$ ), для обеспечения эффективного соединения сцинтиллятора с фотодетектором (для фотодетектора ФЭУ)

Нет сцинтиллятора одинаково хорошо удовлетворяющего всем требованиям!

## Основные характеристики сцинтилляторов

- **Конверсионная эффективность** сцинтиллятора  $C_{ef}$  – отношение энергии световой вспышки  $h\nu$  к энергии  $E$ , поглощенной в сцинтилляторе. *К.э. характеризует эффективность преобразования сц-ром энергии заряженной частицы в световую.*

$$N_0 = C_{ef} E / (h\nu) \quad \begin{array}{l} N_0 - \text{полное число фотонов со средней энергией } h\nu, \\ \text{выходящих из сцинтиллятора} \\ C_{ef} \text{ зависит от удельных потерь энергии } dE/dx. \end{array}$$

- **Удельный световыход (фотон/МэВ)** – отношение числа фотонов, возникающих в сцинтилляторе, к единице энергии, теряемой частицей  $\chi_E$  (либо к единице пробега частицы в сц.  $\chi_X$ )  $\chi_E^* (dE/dx) = \chi_X$

$$C_{ef} = \frac{h\nu}{E} \int_0^E \chi_E dE$$

Если  $\chi_E$  не зависит от энергии, то  $C_{ef} = \chi_E h\nu$

- **Световыход** – полное число фотонов, возникающих в сцинтилляторе при попадании частицы с энергией  $E$ . *С. характеризует количество света, испущенного сц.*

$$\chi \equiv N_0 = \int_0^E \chi_E dE = \int_0^R \chi_X dx \quad \begin{array}{l} E, R - \text{энергия и пробег частицы в сц.} \end{array}$$

Принято световой выход данного сцинтиллятора сравнивать со световым выходом антрацена, который используется как стандарт.

Световой выход антрацена  $\sim 0.05$  или 1 фотон на 50 эВ для частиц высокой энергии. У NaI световой выход  $\sim 0.1$  или 1 фотон на 25 эВ поглощенной энергии.

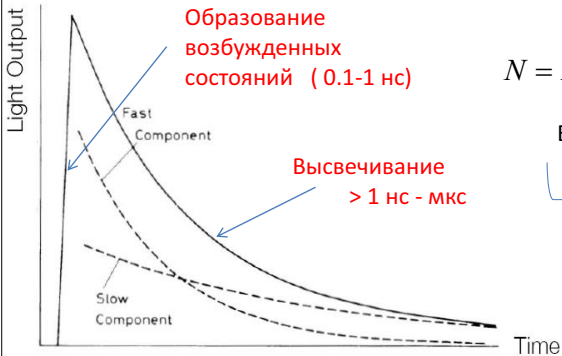
В первом приближении интенсивности эмиссии (сцинтилляции) меняется по экспоненциальному закону

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right)$$

$N$  – Число фотонов, испускаемых в ед. времени  
 $N_0$  – Общее число испущенных фотонов  
 $\tau_d$  – Характеристическая постоянная высвечивания

Время нарастания интенсивности от нуля до максимума обычно мало  $\tau_r \ll \tau_d$  и для упрощения принято  $\tau_r \approx 0$  - реально это не так!

Обычно применяют (более точно) – 2-х, 3-х компонентную зависимость



$$N = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$$

Быстрая компонента      Медленная компонента  
 Внутренние процессы в сц.

Интенсивность световой вспышки пропорциональна поглощенной энергии (в определенном ее диапазоне), поэтому сц. детектор часто используется в качестве спектрометра (калориметра) - прибора, определяющего энергию частицы.

• Сцинтиллятор испускает сплошной спектр фотонов (характерный для данного сцинтиллятора) - эмиссионный спектр фотонов – определяет вероятность испускания фотонов данной длины волны.

Необходимо, чтобы ЭСФ из сцинтиллятора максимально совпадал со спектральной характеристикой фотодетектора.

• Степень перекрытия внешнего спектра сцинтилляции со спектральной характеристикой  $\epsilon(\nu)$  данного фотодетектора определяется коэффициентом согласования

$$K = \frac{\int F(\nu) \epsilon(\nu) d\nu}{\int F(\nu) d\nu}$$

$F(\nu)$  - спектр высвечивания сцинтиллятора  
 Обычно спектр фотонов сцинтилляторов лежит в видимой-УФ области  $h\nu \sim 3$  эВ.  
 (область спектральной чувствительности ФЭУ)

• Для сравнения сцинтилляторов в сочетании с данным фотодетектором, вводят понятие сцинтилляционной эффективности

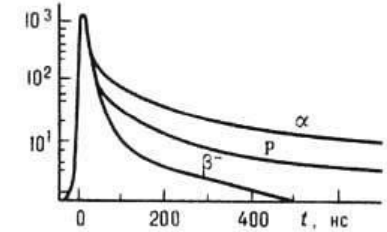
$$A = K\chi$$

Сцинтилляционная эффективность учитывает как число фотонов, испускаемых сцинтиллятором на единицу поглощенной энергии, так и чувствительность данного фотодетектора к этим фотонам.

• Время высвечивания определяется процессами преобразования энергии частицы в световую вспышку

Интенсивность/время высвечивания отличается для лёгких (электронов) и тяжёлых (протонов,  $\alpha$ -частиц и т. д.) частиц. => По форме импульса можно разделять частицы разной природы

Форма импульса в органическом сцинтилляторе для электронов, протонов и  $\alpha$ -частиц



Световой выход определяется эффективностью преобразования энергии ионизации в фотоны

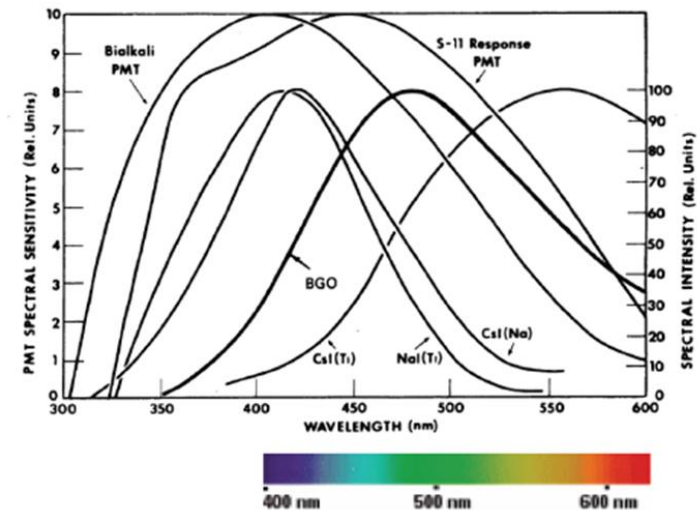
Например в неорг. сц. :

- поглощение излучения (или частицы) сцинтиллятором и конверсия энергии излучения в термализованные электроны и дырки
- передача части энергии эл/дырок центрам люминесценции
- процесс люминесценции

Световой выход зависит от:

- Типа частиц и их энергии
- типа сцинтиллятора: органика, неорганика, газ
- внешних факторов: тем-ра, окруж. среда, магнитного поля

Согласование эмиссионного спектра сцинтиллятора и спектральной чувствительности ФЭУ



Чтобы зарегистрировать световую вспышку, необходимо, чтобы световые фотоны вышли за пределы сцинтиллятора.

Применяют еще такую характеристику:

**Техническая эффективность сцинтиллятора** - отношение световой энергии, вышедшей из сцинтиллятора, к энергии, потерянной в нем заряженной частицей.

**Технический выход зависит от**

- величины сдвига спектров испускания и поглощения - прозрачности сц. к собственному излучению
- толщины слоя сцинтиллятора
- количества примесей, уменьшающих его прозрачность
- состояния поверхности и пр.

## Типы сцинтилляторов и сравнение их свойств

**Неорганические – кристаллическая структура (+ газы)**

- Большой световыход до 40000 фотонов / МэВ
- Большое время высвечивания нс-мкс
- Высокий Z  
Большой выбор по Z и ρ
- С примесями и без
- Дорогие в производстве
- Высокая радиационная стойкость (100 кГр/год)



- Рентг./ Гамма-спектрометрия
- Калориметрия (ФВЭ)
- Медицина (ПЭТ)
- Мониторинг ядерных установок

**Органические – кристаллы, пластики, жидкости**

- Малый световыход до 10000 фотонов / МэВ
- Малое время высвечивания ~нс
- низкий Z, ρ~1 г/см<sup>3</sup>
- с примесями, широкий выбор по эмиссионному спектру
- относительно дешевые
- Невысокая рад. стойкость (10 кГр/год)



- бета-спектрометрия
- Быстрые нейтроны
- Трековые измерения
- TOF, триггеры

### Характеристики некоторых твёрдых и жидких сцинтилляторов, применяемых в сцинтилляционных счётчиках

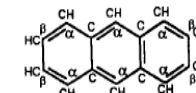
Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Время высвечивания нс	Длина волны в максимуме спектра, А	Конверсионная эффективность (для электронов), %
<b>Кристаллы</b>				
Антрацен С14Н10	1,25	30	4450	4
Стильбен С14Н12	1,16	6	4100	3
NaI (TI)	3,67	250	4100	6
ZnS (Ag)	4,09	11	4500	10
CsI (TI)	4,5	700	5600	2
<b>Жидкости</b>				
Раствор <i>p</i> -терфенила в ксилоле (5 г/л) с добавлением РОРОР (0,1 г/л)	0,86	2	3500	2
Раствор <i>p</i> -терфенила в толуоле (4 г/л) с добавлением РОРОР (0,1г/л)	0,86	2,7	4300	2,5
<b>Пластики</b>				
Полистирол с добавлением <i>p</i> -терфенила (0,9%) и <i>α</i> -NPO2 (0,05 весовых %)	1,06	2,2	4000	1,6
Поливинилтолуол с добавлением 3,4% <i>p</i> -терфенила и 0,1% РОРОР	1,1	3	4300	2

РОРОР — 1,4-ди-[2-(5-фенилосазолил)]-бензол  
NPO — 2-(1-нафтил)-5-фенилосазол

### Органические сцинтилляторы

- Ароматические углеводороды, имеющих систему сопряженных двойных, тройных связей

Вид: монокристаллы, жидкие и тв. растворы (пластики)



**Антрацен**  
конверсионная эффективность для быстрых электронов 4-6%

Сцинтиллятор (кристаллы)	Время высвечивания, нс	Максимум полосы пропускания, А	Конверсионная эффективность (к антрацену)
Антрацен (C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	25-30	4450	1.0
Нафталин (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )	70-80	3450	0.1-0.2
Трансстильбен (C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> )	4-8	4100	0.4-0.5
Толан (C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	3-5	3900	0.3-0.5
<i>P</i> -терфенил (C <sub>18</sub> H <sub>14</sub> )	10-12	4150	0.3-0.5

- Молекулярные силы связи в орг. кристаллах малы по сравнению с силами, действующими в неорганических кристаллах
- Молекулы практически не возмущают энергетические электронные уровни друг у друга
- **Процесс люминесценции органического кристалла является процессом, характерным для отдельных молекул**



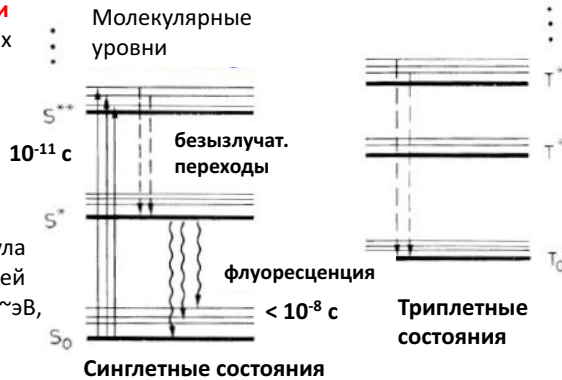
- **Способность к люминесценции под действием ИИ не зависит от агрегатного состояния.**
- Время высвечивания ~ нс - сравнимо с временем жизни отдельной молекулы в возб. состоянии

## Механизм высвечивания органических сцинтилляторов

• **Сцинтилляции связаны с переходами валентных электронов** в возбужденных молекулах.

• Эти электроны ассоциированы с молекулой, а не с конкретным атомом молекулы и занимают т.н.  **$\pi$ -молекулярные орбитали**.

• В основном и возб. состоянии молекула имеет несколько колебательных уровней (энергия м/у электронными уровнями  $\sim$  эВ, колеб. ур.  $\sim$  1/10 эВ).



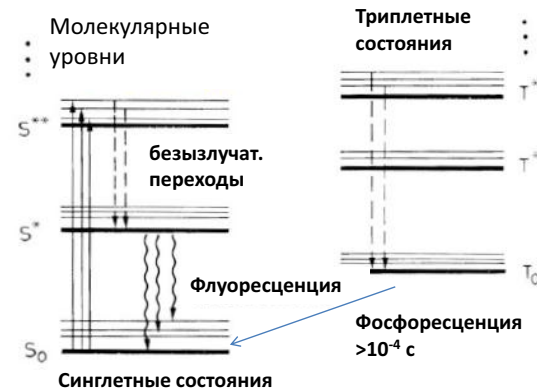
- При поглощении энергии возбуждаются электронные или колебательные уровни.

- **Возбужденные синглетные состояния** распадаются за короткое время  $< 10$  пкс в состояние  $S^*$  без излучения – процесс **внутренней деградации**

- Состояние  $S^*$  распадается в основное состояние  $S_0$  за время  $\sim$  нс (на один из колебательных уровней) с испусканием фотона – **быстрая компонента флуоресценции**  
*Сцинтиллятор прозрачен для этих фотонов: их энергия недостаточна для обратного перехода  $S_0 \rightarrow S^*$*

- При возбуждении **триплетного состояния** также происходит быстрый переход в нижнее триплетное состояние  $T_0$  без излучения.  
 - Переходы  $T_0 \rightarrow S_0$  запрещены, поэтому распад осуществляется через взаимодействие с другой молекулой находящейся в  $T_0$  состоянии:  
 $T_0 + T_0 \rightarrow S^* + S_0 + \text{фононы}$

- Излучение фотонов молекулой идет с состояния  $S^*$  – **спектр излучения совпадает с быстрой компонентой!**  
 Такой тип взаимодействий происходит с задержкой (задержанная ф.) – **медленная компонента флуоресценции**  
 (Фосфоресценция: переходы через запрещенные переходы  $T_0 \rightarrow S_0$ )



Большая часть энергии возбуждения расходуется на тепловое движение (колебания), **световой выход** (конверсионная эффективность) **орг. сц. невелик и составляет несколько процентов.**

## Спектр поглощения и высвечивания орг.сц.

Потенциальная энергия изолированной молекулы зависит от расстояния м/у центрами атомов



а – основное состояние  
 б – первое возбужденное состояние

• Потенциальная яма для возб. состояния менее глубока, минимум энергии при  $r_1$  лежит правее чем для основного состояния  $r_0$   
 • При данной температуре молекула лежит вблизи дна (а или б) на колеб. уровне.

**Возбуждение (стрелка вверх)  $\sim 10^{-14}$  с**

• Энергия фотонов необходимая для перехода из а в б д.быть не менее расстояния м/у уровнями

**Эмиссия фотона (стрелка вниз)**

• Расстояние м/у уровнями при переходе из б в а определяет энергию испущенного фотона

Среднее время жизни молекулы в возб. состоянии велико (1-10 нс), по сравнению с периодом колебания молекулы ( $\sim 10^{-12}$ с)  $\rightarrow$  переход из б в а **может произойти без излучения фотона**: энергия расходуется на тепловые колебания молекул (т.н. **тушение**)



**Перекрытие спектров:**  
 Эта часть фотонов может вновь поглотиться!

• Степень прозрачности сц. к эмиссионным (собственным) фотонам характеризуется перекрытием спектров поглощения и эмиссии.

• Перекрытие полос растет с увеличением темп-ры  $\Rightarrow$  световой выход падает

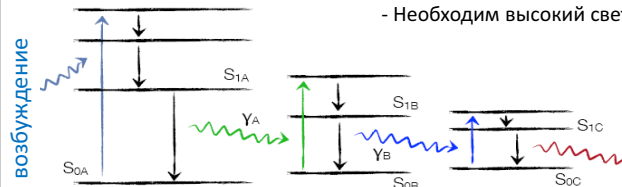
## Смещение спектра в органических сц.

### • Компонента А (растворитель)

Потеря энергии заряж. частицами  
Излучение коротковолновых фотонов

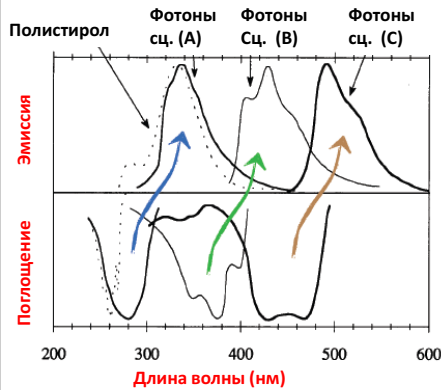
### • Компонента В (первый фосфор):

- Спектр поглощения д. совпадать со спектром эмиссии растворителя  
- Необходим высокий световыход



### • Компонента С (второй фосфор):

сместитель спектра – спектр эмиссии должен максимально совпадать со спектром чувствительности фотодетектора



### Часто применяемые составы

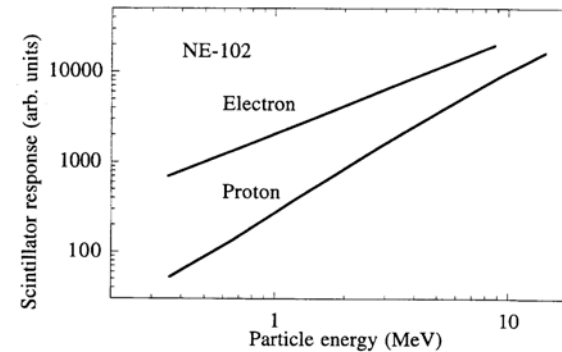
	Растворитель	Первый фосфор	Второй фосфор
Жидкие сц.	Бензол	p-Терфинил	POPOP
	Толуол	DPO	BBO
	Ксилол	PBD	BPO
Пластики	Поливинилбензол	p-Терфинил	POPOP
	Поливинилтолуол	DPO	TBP
	Полистирол	PBD	BBO
			DPS

## Световыход в орг. сцинтилляторе

Световыход и временная высвечивания  $\tau$  зависят от плотности ионизации –  $dE/dx$  – и от типа регистрируемой частицы соответственно

### Большая плотность ионизации приводит к :

- **локальному перегреву:** Например для  $\alpha$ , с  $E=5$  МэВ:  $T$  достигает  $200^\circ\text{C}$  А.И.Абрамов. Основы exper. методов яд. физ. 1985
- **Возникают электрические поля, изменяющие структуру энергетических состояний возбужденных молекул** - меняется спектр эмиссии
- **рост вероятности расщепления молекул, появление радикалов** -> рост вероятности безызлучательных переходов (**тушение**)



H.Spieler. Introduction to Radiation Detectors and Electronics

**Идеальный сцинтиллятор:** световыход пропорционален поглощенной энергии

$$\chi \sim E, \quad \chi_x = A \frac{dE}{dx}$$

Для реального сц. из-за тушения это не так!

Зависимость удельного световыхода  $\chi_x$  от удельных потерь энергии  $dE/dx$  выражается полуэмпирической **ф-лой Биркса**

$$\chi_x = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

$A \frac{dE}{dx}$  - Число возбуждений (экситонов) на ед. пробега заряж. частицы

$B \frac{dE}{dx}$  - Концентрация центров тушения (безызлучательные потери энергии) на ед. пробега заряж. частицы

$k = \sigma_{\dot{0}} / \sigma_{\dot{e}} n_{\dot{e}}$   $\sigma_{\dot{0}}$  - Сечение захвата экситона ц.т.  $\sigma_{\dot{e}}$  - Сечение захвата экситона ц.л.

$n_{\dot{e}}$  - Концентрация центров люминесценции

Полный световыход 
$$\chi = \int_0^R \chi_x dx$$

1) Если  $\frac{dE}{dx}$  малы (быстрые электроны), то  $\chi_x \sim dE/dx$

→ световыход пропорционален энергии частицы  $\chi \sim E$

2) Если  $\frac{dE}{dx}$  велики ( $\alpha$ -частицы), т.е.  $kB \frac{dE}{dx} \gg 1$ , то  $\chi_x$  не зависит от  $E$

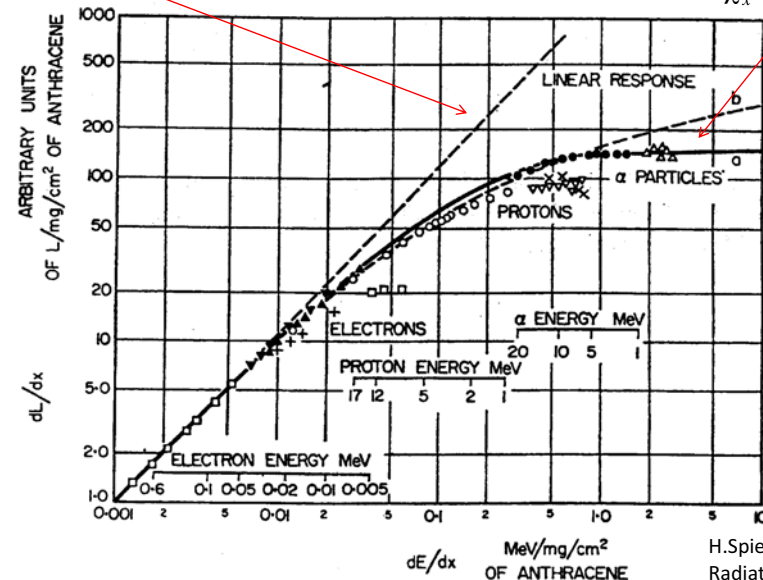
→ световыход линейно зависит от пробега частицы  $\chi \sim R$

## Относительный световыход в антрацене от $dE/dx$

$$\chi_x \sim dE/dx$$

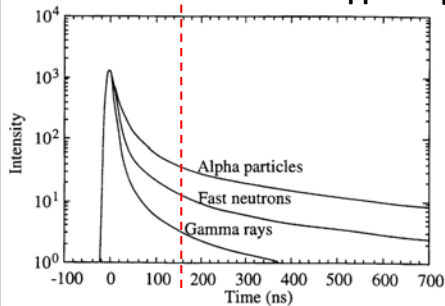
Насыщение

$\chi_x$  не зависит от  $E$

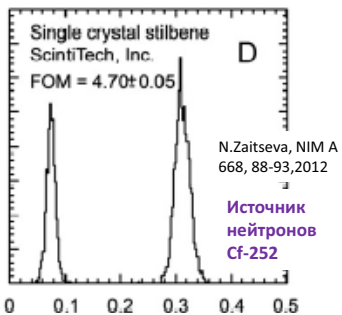


H.Spieler. Introduction to Radiation Detectors and Electronics

## Идентификация частиц



H.Spieler. Introduction to Radiation Detectors and Electronics



Отношение части заряда на «хвосте» импульса к полному заряду

- Зависимость времени высвечивания  $\tau$  от плотности ионизации применяется для идентификации частиц
- **Метод разделения событий по форме импульса (pulse shape discrimination - PSD)** — основан на различии формы импульса, вызванного регистрацией различных частиц (в орг. сц.)
- Применяется как основной метод для разделения быстрых нейтронов от гамма-излучения

**Нейтроны:** вторичные частицы – протоны: малые пробеги, высокая плотность ионизации, большее число триплетных состояний => **существенный вклад задержанной компоненты**

**Гамма-излучение:** вторичные частицы – электроны: пробеги большие, плотность ионизации меньше, меньшее число триплетных состояний => **вклад задержанной компоненты меньше**

### • Кристаллические

- + высокая конв. эфф. (Антрацен 4-6% для быстрых электронов)
- + Высокие временные характеристики – время высвечивания неск нс.
- излучение не изотропно – зависит от ориентации кристалла
- Трудно обрабатывать, очень прочные и чувствительные к перегреву
- ограничен выбор по геометрическому исполнению

**Применяется для  $\alpha$ -,  $\beta$ -спектрометрии**

### • Жидкие – растворы орг. сц. в прозрачных растворах

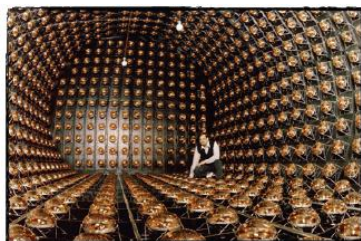
- Энергия ионизации поглощается сначала растворителем, а затем передается молекулам сцинтиллятора
- Растворители прозрачны для фиолетовой и УФ области

**Растворители:** м-ксилол, толуол, фенилциклогексан

**Сц. добавки:** п-Терфенил, 2,5-Дифенилоксазол (ППО), 1,4-Ди-[2-(5-фенилоксазолил)]-бензол, 2,5-Ди-(1-нафтил)-1,3,4-оксадиазол, 1-Фенил-2(4-бифенил)-этилен, Кватерфенил

- +малое время высвечивания 1-10 нс
  - +возможность изготовления в **больших объемах**
- Применяется для регистрации  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения, нейтрального излучения**

**Внутренний объем детектора с жидк.сц.**



LSND experiment

## Типы органических сцинтилляторов

### • Пластические – сцинтилляторы в твердых прозрачных растворах

- Наиболее часто применяются из орг.сц. в современных детекторах
- Произвольная конфигурация и форма: блоки, пленки, капилляры, волокна
- не боятся перепада температур, механическая прочность
- время высвечивания неск. нс.
- эффективность может достигать 70% от эффективности монокристалла стиблена

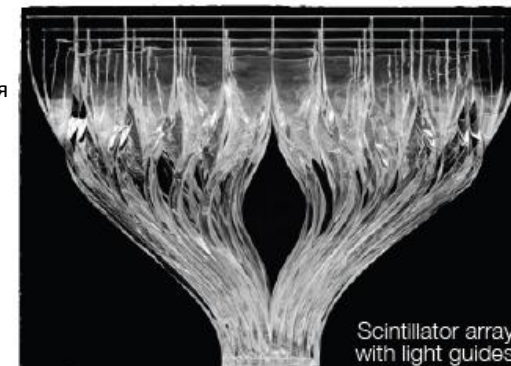
**Основа (пластик):** полистирол

поливинилтолуол

полифенилбензол

**Сц. добавка:** п-Терфенил, PPO, ...

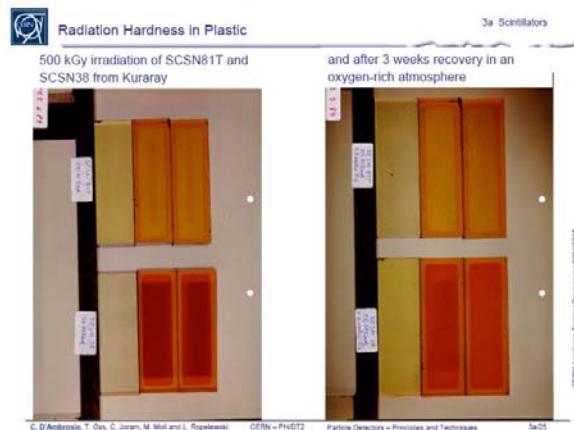
Для смещения спектра может добавляться например добавка POPOP



Scintillator array with light guides

## Органические сцинтилляторы направления усовершенствования

- Новые сцинтилляционные компоненты/добавки:
  - большой световыход
  - меньшее перекрытие спектров поглощения и излучения
- Новые методы регистрации сцинтилляций: оптоволокно – увеличение гранулярности, увеличение прозрачности и уменьшение потерь при передаче света
- Увеличение радиационной стойкости пластиков



## Неорганические кристаллические сцинтилляторы

Кристалл	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Максимум в спектре люминесценции, нм	$\tau$ , нс	$C_k$
NaI (Tl)	3,67	410	250	0,06
CsI (Tl)	4,51	560	700	0,02
KI (Tl)	3,13	410	1000	0,012
LiI (Eu)	4,06	440	1200	0,04
CaF <sub>2</sub>	3,18	250	200	0,009
ZnS (Ag)	4,09	450	10 <sup>4</sup>	0,1—0,2

- Большинство кристаллов имеют время высвечивания на 2-3 порядка больше чем орг.сц. (~500 нс)
- Некоторые кристаллы гигроскопичны, необходима герметичная упаковка
- Имеют высокий атомный вес и плотность: применяются для регистрации фотонов, электронов и позитронов
- обладают высоким световыходом, поэтому имеют лучшее энергетическое разрешение чем орг. сц. – могут применяться для спектрометрических целей

### Наиболее распространенные неорганические сцинтилляторы

	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda_{\text{макс}}$ , нм	$n$	$\tau$ , мкс	$L$ , фотон/МэВ	Прим
<b>Галлоидные соединения щелочных металлов</b>						
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38,000	1, 2, 3
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 / 3.34	65,000	1, 2
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11,000	1, 2, 3

<b>Другие неорг. кристаллы</b>						
BGO (Bi <sub>4</sub> G <sub>3</sub> O <sub>12</sub> )	7.13	480	2.15	0.30	8,200	1, 2, 3
CWO (CdWO <sub>4</sub> )	7.90	470	2.3	1.10 / 14.5	15,000	
PWO (PbWO <sub>4</sub> )	8.28	440 ~ 500	2.16	0.002 / 0.01 / 0.038	460	

<b>неактивированные кристаллы</b>						
BaF <sub>2</sub>	4.89	220 / 310	1.56	0.0006 / 0.63	1,400 / 9,500	3
чистый CsI	4.51	305 / 450	1.80	0.002 / 0.02	2,000	
CeF <sub>3</sub>	6.16	310, 340	1.68	0.005 / 0.027	4,400	

<b>активированные церием</b>						
GSO:Ce (Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce <sup>+</sup> )	6.71	440	1.85	0.056 / 0.4	9,000	Нейтроны
YAP:Ce (YAlO <sub>3</sub> :Ce <sup>+</sup> )	5.37	370	1.95	0.027	18,000	
LSO:Ce (Lu <sub>2</sub> Ce <sub>x</sub> (SiO <sub>4</sub> )O:Ce <sup>+</sup> )	7.4	420	1.82	0.040	25,000	
LGB:Ce ( <sup>6</sup> Li <sub>6</sub> Gd <sup>10</sup> B <sub>3</sub> O <sub>9</sub> :Ce <sup>+</sup> )	3.50	390	1.67 (X) 1.64 (Y)	0.2 / 0.8	9,960 - n 5,310 - electron	Нейтроны

- 1 –большие объемы
- 2- обработка
- 3 -гигроскопичен

См. <http://scintillator.lbl.gov/>

### Механизм люминесценции неорганических кристаллов

Процесс сцинтилляций описывается **зонной теорией твердого тела**.

- В отдельном атоме электроны находятся на дискретных энергетических уровнях.
- В кристаллах атомы находятся на близких расстояниях, их взаимодействие достаточно сильно.
- Благодаря этому уровни внешних электронных оболочек расщепляются и образуют зоны, отделенные друг от друга запрещенными **зонами**:

- внешняя разрешенная зона заполнена электронами - **валентная зона**
- Выше ее свободная зона - **зона проводимости**
- между ними - **запрещенная зона** (ширина неск. эВ)

+ дополнительные **примесные уровни** в запрещенной зоне.:

- **дефекты в кристалле**
- **примесные атомы**
- **активаторы**

С помощью активаторов создают доп. уровни – **центры люминесценции**





### Для чего нужны активаторные уровни?

- При снятии возбуждения в беспримесном кристалле (рекомбинации эл./дырок – обратный переход электронов из зоны проводимости в вал. зону, а также аннигиляции экситонов) возникает излучение с энергией  $\sim$  ширина запрещ. зоны :  $h\nu \sim E_{з.з.}$   
 $\Rightarrow$  велика вероятность поглощения собственного излучения  
 $\Rightarrow$  малый выход фотонов - не выгодно при детектировании!

- Введением атомов активатора создают дополнительные локальные уровни лежащие вблизи валентной зоны

Такие уровни называются **центрами люминесценции, если**

- 1) эти уровни не заняты, тогда на них могут попасть электроны из зоны проводимости
- 2) Разрешен переход с этих уровней в валентную зону

- Фотоны, излученные с активаторных уровней, имеют длину волны больше, чем в спектре поглощения, поэтому

- $\rightarrow$  активатор приводит к сдвигу спектра излучения
- $\rightarrow$  сцинтиллятор становится более прозрачным для собственного излучения
- $\rightarrow$  увеличивается интенсивность свечения

### 2) аннигиляция экситонов

### 3) Радиационные переходы через примесные уровни:

- экситоны: связанные электроны и дырки захватываются ц.л.  $\Rightarrow$  Быстрая эмиссия

- рекомбинация свободных эл. и дырок: Захватываются примесными центрами независимо (медленная компонента)

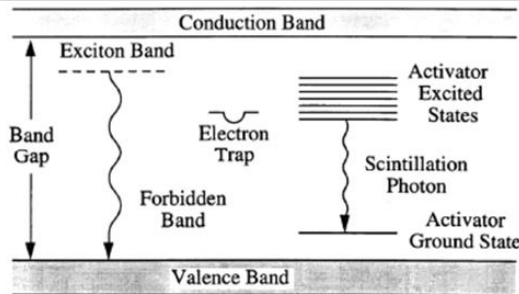
### Время высвечивания 1 нс- 1 мкс

- ловушки свободных электронов – неглубокие локальные уровни (из-за дефектов). Долгоживущие **метастабильные уровни: Время высвечивания 100 мс и более**

При переходе электронов испускаются фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны

$$h\nu < E_{з.з.}$$

Для таких фотонов вероятность поглощения в самом кристалле мала и поэтому световой выход для него много больше, чем для чистого, беспримесного кристалла.



3 основных механизма эмиссии фотонов с уровней в запрещенной зоне:

1. Экситонные уровни
  2. Дефекты в кристалле
  3. Активаторные уровни
- $h\nu < E_{з.з.}$

Ионизирующие частицы в с.с. материале передают энергию в основном электронам

### Электронны могут:

- 1) переходить из валентной зоны в зону проводимости, в валентной зоне появляется – дырки, т.е. свободные электрон и дырка  $\rightarrow$  электрическая проводимость
- 2) Если энергии для перехода эл. в зону проводимости недостаточно  $\rightarrow$  возможно образование экситонов - связанных пар «электрон-дырка» (без проводимости)

### Возбуждение снимается:

- 1) Безызлучательные переходы (в тепловую энергию) – маловероятный процесс

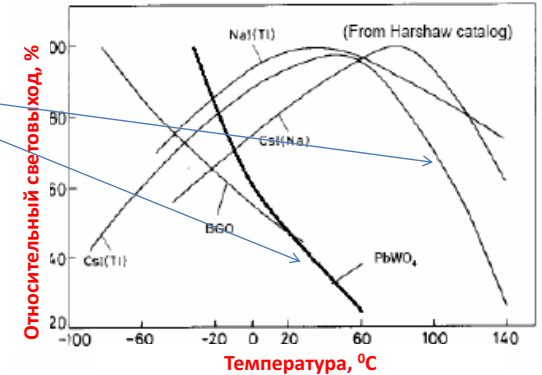
$$E_T < E_{з.з.} \sim 7 \text{ эВ}$$

Но! Вероятность экспоненциально растет с температурой:

Световыход падает !

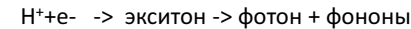
Сильная зависимость световыхода в неорг. с.с. от температуры в отличие от орг. с.с., для которых

- При  $T = -60 \div +20 \text{ }^\circ\text{C}$  световыход постояен
- При  $T = +60 \text{ }^\circ\text{C}$  – спад до 95%



### «Работа» активаторных уровней

- 1) Чистый йодид натрия NaI



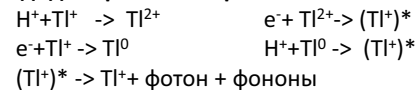
высокий световыход при криогенных температурах ( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{LN}_2$ )

76000 фотонов/МэВ

низкий световыход при норм. температуре ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$\sim 1000$  фотонов/МэВ

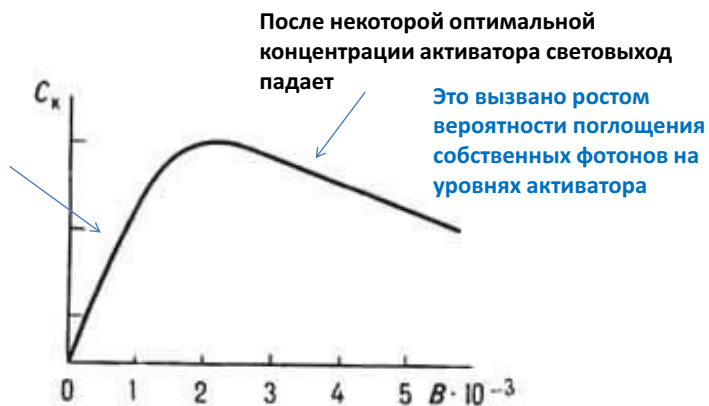
- 2) Йодид натрия активированный таллием NaI(Tl)



Световыход при нормальной температуре 38000 ф/МэВ

## Световыход зависит от концентрации активатора (B) в неорг. сцинтилляторе

С увеличением концентрации активатора световыход растет



Зависимость световыхода  $C_k$  кристалла NaI от концентрации TI.

Время высвечивания с ростом концентрации активатора до  $3 \times 10^{-3}$  уменьшается от 0,35 до 0,22 мкс.

## Неорганические сцинтилляторы направления исследований

- Увеличение плотности (Z) – эффективность фотопоглощения
- Увеличение световыхода и прозрачности
- Уменьшение времени высвечивания для увеличения временного разрешения
- оптическое и спектральное согласование сцинтиллятора и фотодетектора
- усовершенствование фотодетекторов
- радиационная стойкость
- снижение стоимости производства, технологичности обработки
- увеличение размеров кристаллов

## Общее сравнение типов сцинтилляторов

### Неорганические сц.

- Достоинства**
- высокий световыход ( $\epsilon \sim 0.13$ )
  - высокая плотность (PbWO<sub>4</sub> – 8.3 г/см<sup>3</sup>)
  - энергетическое разрешение
- Недостатки**
- сложности выращивания кристаллов
  - температурная зависимость световыхода
  - дороговизна

### Органические сц.

- Достоинства**
- быстрое высвечивание
  - легко обрабатываются
  - слабая темп. зависимость
  - возможен PSD-дискриминация импульсов
  - дешевизна
- Недостатки**
- невысокий световыход ( $\epsilon \sim 0.03$ )
  - радиационные повреждения

**Газовые сцинтилляторы** - инертные газы и их смеси в газообразном, жидком и твёрдом состояниях. Инертные газы обеспечивают наибольший световыход (Xe, Kr).

**Центрами свечения являются возбуждённые молекулы**

### Характеризуются

- коротким временем высвечивания 1-10 нс (зависит от давления)
- высоким световыходом: у Xe световыход того же порядка, что и у NaI(Tl)
- Эмиссионный спектр фотонов лежит в области ультрафиолета  $\lambda \sim 200$  нм
- малая чувствительность к гамма-излучению (низкая плотность)
- линейная зависимость величины сигнала от энергии частицы в широком диапазоне энергий
- возможностью менять тормозную способность изменением давления газа
- малые примеси других газов резко уменьшают интенсивность сцинтилляций в инертных газах

**Для регистрации эмиссионных фотонов** часто применяются

- ФЭУ с кварцевым входным окном, либо с входными окнами с нанесением смесителя спектра (дифенил-стильбен или кватерфенил)
- спектросмещающие волокна, переизлучающие фотоны в область видимого света (голубой-зеленый) и др. – область максимальной чувствительности ФЭУ

**Осн. применение газовых сц. д.** - регистрация  $\alpha$ -частиц и осколков деления (кототкопробежное сильноионизирующее излучение)

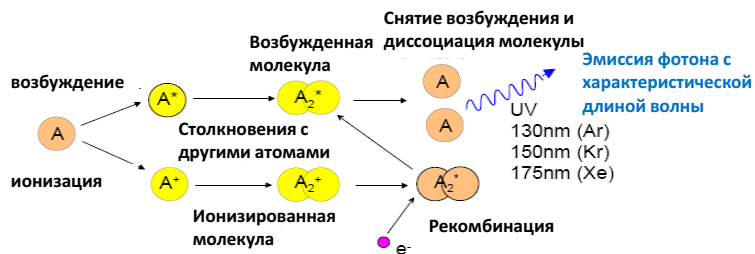
Характеристики некоторых газов, применяемых в качестве сцинтилляторов в сц. детекторах (при давлении 740 мм.рт.ст., для альфа-частицы с энергией 4.7 МэВ)

Газ	Время высвечивания t, сек	Длина волны в максимуме спектра, Å	Конверсионная эффективность η, %
Ксенон	10 <sup>-8</sup>	3250	14
Криптон	10 <sup>-8</sup>	3180	8,7
Аргон	10 <sup>-8</sup>	2500	3
Азот	3×10 <sup>-9</sup>	3900	2

**Основной механизм высвечивания в газе – релаксация возб. атома**



### Механизм свечения инертных газов в жидкой фазе

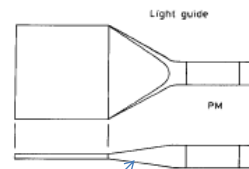


Сц-тор	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Козф. преломления	Дл. волны (макс), нм	Врем. высвеч., мкс	Световыход, фотон/МэВ
Ж.гелий	0,1	1,02	390	0,01/1,6	200
Ж.аргон	1,4	1,29 (170 нм)	150	0,005/0,86	40000
Ж.Ксенон	3,1	1,60 (170 нм)	150	0,003/0,02	40000

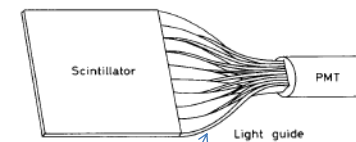
2 процесса – 2 характеристических времени высвечивания

## Светосбор и съем информации

- **Световоды** – световые каналы для передачи оптической информации от сцинтиллятора к фотодетектору
- **Конфигурация световода адаптируется** под геометрические параметры, гранулярность и эмиссионный спектр сцинтиллятора.
- Согласно теореме Лиувилля передача света с минимумом потерь происходит при сохранении фазового объема: **сечение вдоль оси световода = const (адиабатические световоды)**
- Передача фотонов по световоду осуществляется за счет **полного внутреннего отражения**



«Рыбий хвост»



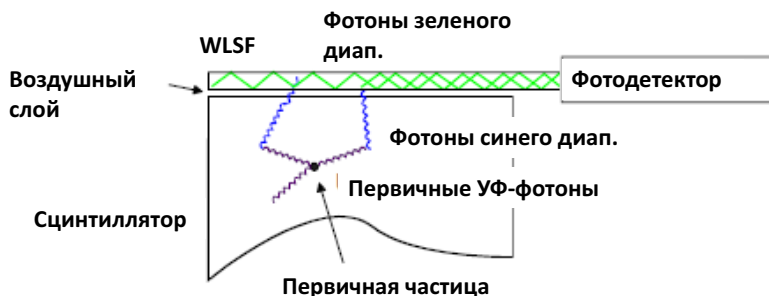
Веерный световод

Материал: органическое стекло (плексиглас, люцит)  $n=1.49$

«Веер» применяется для протяженных граней сц. Обеспечивает более однородный светосбор, одинаковое время прихода света со всех участков грани

- Оптическое соединение сц/свет/фотодет - **клей или оптическая смазка с тем же n**

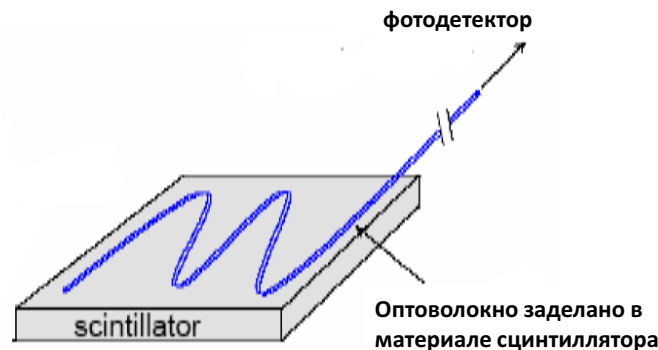
## Съем информации с помощью спектросмещающих волокон (WLSF – Wave-Length Shifting Fibres)



Интенсивность сигнала затухает из-за потерь:

- при смещении спектра из синего (300-400 нм) в зеленый (~500 нм)
- Спектральная чувствительность ФЭУ в синем диап. выше
- Рассеяние и поглощение света: шероховатости и неоднородности оптических элементов

- Оптоволокну можно применять для сбора света с больших площадей
- можно обойтись малым количеством фотодетекторов



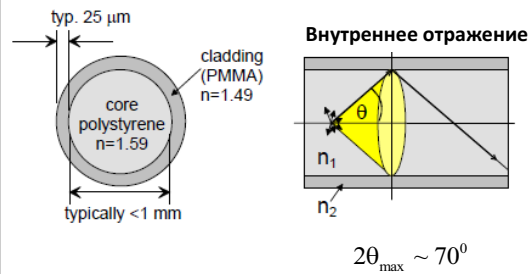
При передаче света по волокну отклониться от геометрического направления хода из-за

- 1-включений в материале
- 2 – неоднородности толщины волокна/покрытия
- 3 – рассеяние на поверхности в волокне

Пропорционально длине

Непараллельность отражающей поверхности и оси волокна, поверхностные дефекты приводящие к рассеянию света

## Сцинтилляционные оптоволоконна



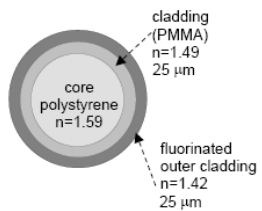
• Передача света по волокну основана на **эффекте полного внутреннего отражения**.

• Это условие выполняется при  $\theta < \theta_{\max} = \arccos(n_2/n_1)$  где  $n_1, n_2$  – показатели преломления сердцевинны и оболочки

$$2\theta_{\max} \sim 70^\circ$$

Для увеличения критического угла отражения используют волокно с двумя оболочками

Double cladding system (developed by RD7)

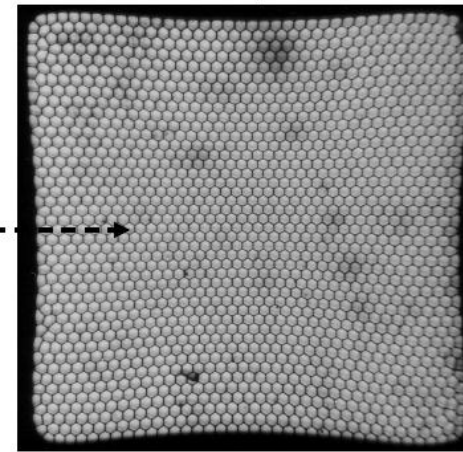


- Сердцевина – полистирол ( $n_1=1.59$ )
- Внешняя оболочка – оргстекло, акрил ( $n_2=1.49$ )
- Длина волокна ограничена из-за затухания сигнала (обычно неск. метров)
- Диаметр отдельных волокон  $\sim 0,4$  мм и более
- Волокна допускают изгиб

C. D'Ambrosio, T. Gys, C. Joram, M. Moll and L. Ropelewski CERN – PHDT2

## Применение оптоволоконна для трековых измерений в ФВЭ

Developed in RD7, they consist of bundles of hexagonal fibres (typ. 60  $\mu\text{m}$  dia., 2.5 mm bundle size)



10 mm

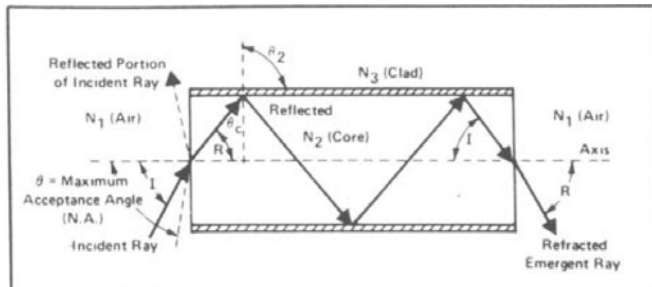
Images of tracks from 5 GeV/c pions (1989)

CERN, RD7

## Передача света по оптоволоконну

Fiber Optics: Theory and Applications

BURLE



Угол падения и угол отражения связаны через з-н Снелля

$$N_1 \sin I = N_2 \sin R$$

$N_1$  – коэф. преломления для воздуха ( $N_1 \approx 1$ )  
 $N_2$  – коэф. преломления для волокна

$$N_2 = \frac{\sin R}{\sin I}$$

<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/basic-optics-for-optical-fiber/>

## Числовая апертура (N.A.), аксептанс

N.A. – определяет величину аксептанса на входе волокна и численно равна синусу половинного угла конуса аксептанса

Из з-на Снелла

$$N_1 \sin \theta_{\max} = \sqrt{N_2^2 - N_3^2}$$

$$NA = \sqrt{N_2^2 - N_3^2}$$

Светосила волокна пропорциональна  $(NA)^2$  и равна отношению квадратов ед. площадей конуса с углом  $\theta$  и полусферы (угол  $2\pi$ )

Для волокна с N.A. = 0.66  
 Светосила =  $(0.66)^2 / (1)^2 = 0.43\%$

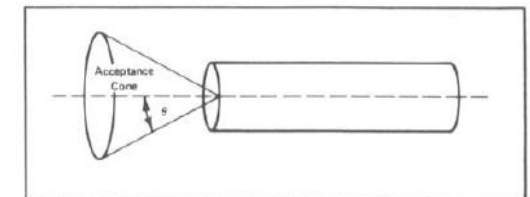
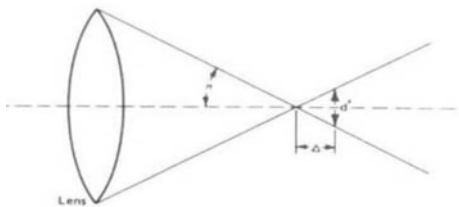


Figure 3 Numerical Aperture

В диапазоне углов аксептанса свет зайдет в волокно и пройдет через него

$$\sin \theta \leq \sqrt{N_2^2 - N_3^2}$$

При  $\theta > \theta_{\max}$  свет не пройдет через волокно



Глубина фокуса  $\Delta$  оптоволокон как и для систем линз определяется числовой апертурой через угол  $\theta$

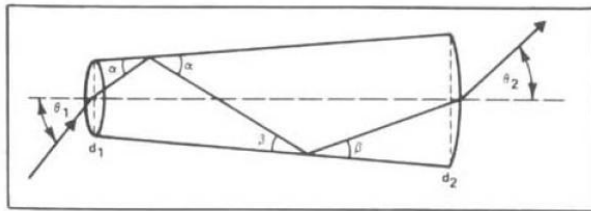
$$d'/2\Delta = \tan \theta$$

$d'$  – диаметр пятна, которое необходимо получить

Если у волокна N.A. = 0.66, то для разрешения пятна размером 0.002 дм, необходимо обеспечить  $\Delta=0.001$  дм

$$N.A. = \sin \theta = 0.66, \theta = 41.5^\circ; \tan 41.5^\circ = 0.88; 0.88 = 0.002/2\Delta; \Delta = 0.0011 \text{ дм}$$

### Конусные световоды

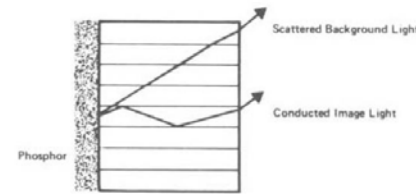


$$d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_2$$

Свет вошедший с узкой стороны выходит с большей стороны более коллимированным!

Коллимированный пучок вошедший с большей стороны выходит неколлимированным с меньшей стороны

Для передачи и формирования изображения часто применяются многоканальные сборки из тонких волокон (оптические мозаики): фоконы и фасетные пластины



Мозаика – плотноупакованные спаянные оптически разделенные оптоволоконна

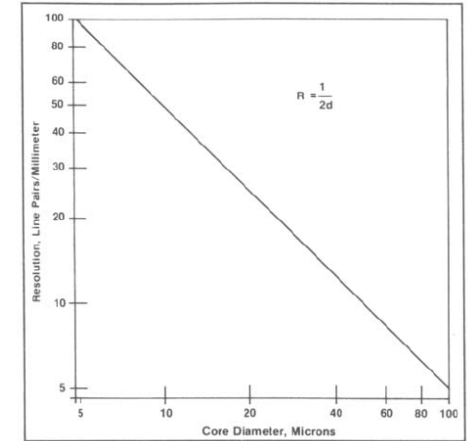
Разрешение таких оптических систем измеряется в числах пар контрастных оптически разрешаемых линий приходящихся на ед. длины (диаметр волокна) Современные фасетные мозаики имеют ~100 лр/мм

Если разрешение отдельной мозаики

$$r_1 = 1/2d_1$$

То для системы мозаик:

$$1/r_{\text{system}}^2 = 1/r_1^2 + 1/r_2^2 + 1/r_3^2 + \dots$$



Фасетные мозаики имеют толщину менее 1 дм (вакуумноплотные) – передают свет практически без потерь

Используются для коррекции изображения, контроль углового распределения света, подавление фотонного света

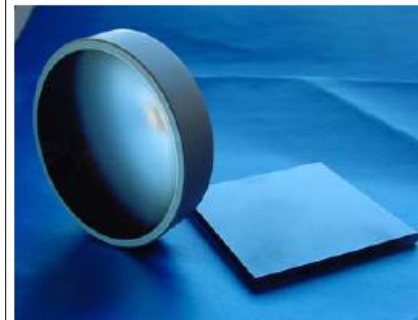
Электронно-лучевые трубки, усилители яркости изображений (image intensifiers), видиконы

Table I Specifications of Standard Faceplate Materials

Parameter	Glass Type				
	A-10	H-64	K-2	D-11/D-15	D-14
Numerical Aperture	0.35	0.66	0.66	0.95	1.0
Fiber Size, microns	15	6-25	6-25	6-25	6-25
Maximum Temperature, °C	500	460	460	525	550
Chemical Stability <sup>a</sup>	Class 1	Class 2	Class 2	Class 1	Class 1
Compatibility <sup>b</sup>	$P_c$		$P$	$P_c$	$P_c$
Coefficient of Expansion ( $\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ )	89	89	89	89/87	87
90% Spectral Transmission	@ 3200 Å	@ 3750 Å	@ 3750 Å	@ 3900 Å	@ 4000 Å

<sup>a</sup>Class 1 glass weathers well and will not discolor when heated in a strongly reducing atmosphere. Class 2 glass weathers well but surface discolors slowly when heated in a strongly reducing atmosphere.

<sup>b</sup> $P_c$  = photocathode; P = phosphor.



Приложения передачи изображения высокого разрешения с минимальными потерями света

- Выравнивание поля,
- системы усиления изображения
- Рентгеноские системы отображения
- Совместимость с CCD/CMOS-матрицами, CRT/LCD дисплеями
- Размеры 250 мм и более
- Сечение волокна 2.5-25 мкм
- Вакуумноплотное исполнение

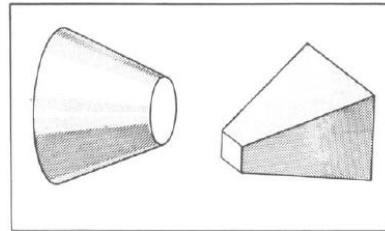
SCHOTT  
glass made of ideas

Typical Face Plate Specifications

Typical Performance Parameters	Glass Type								
	47A	47AH Radiation hardened	24A	24AS	24C	75A	75C	55A	55C
Fiber Size (µm) Resolution lp/mm	6/102 4/128	6/102	25/23 10/64 8/72 6/102	8/72 4/128 2.5/203	10/64 6/102 4/128	27/23	6/102	60/10	60/10
Numerical Aperture	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.58	0.58	0.28	0.28
Stray Light Control (EMA)	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Collimated Transmission 250 nm 10mm Thick (normal) (%)	70	68	70	70	85	68	80	68	80
Coefficient of Thermal Expansion ( $\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ )	68	68	68	68	68	61	61	78	80
Lead Free	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Phosphor Compatible	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Twist/Stretch Capability	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
Maximum Formats (mm)	250	250	250	≤31	250	250	250	250	250

**Оптическое волокно** - используется в качестве концентратора в оптических системах с малой угловой апертурой

Изображение, спроецированное на один из торцов, переносится с соответствующим изменением масштаба на другой торец.



**SCHOTT**  
glass made of ideas



Typical Taper Specifications	
Glass Type	SCHOTT 24 Glass
Element Size (µm)	6, 10, 18, 25
Numerical Aperture – small end	1.0
Stray Light Control (EMA)	Available with or without EMA
Coefficient of Thermal Expansion (x10 exp -7 / °C)	68
Phosphor Compatible	Yes

**Назначение:**

- Увеличение/уменьшения изображения
- Дисплеи
- Считывание на матрицы CCD/CMOS
- Медицинская и зубная радиология
- Устройства усиления изображения



- 5) **Динамический диапазон** – максимальный уровень сигнала (отношения сигнал/шум)
- 6) **Время отклика** – время между приходом фотона и образованием электрического импульса и неопределенность времени прихода (фронт импульса и его ширина)
- 7) **Загрузочная способность** – обратно пропорционально времени восстановления детектора

**Характеристики некоторых детекторов фотонов**

Тип	λ (нм)	ε <sub>Q</sub> ε <sub>C</sub>	G	Время нараст имп-са (нс)	Площ. (мм <sup>2</sup> )	Ур. шума (1 ф.э.) (Гц)	NV (В)	Цена (\$)
Вак	PMT*	115–1100	0.15–0.25	10 <sup>3</sup> –10 <sup>7</sup>	0.7–10	10 <sup>2</sup> –10 <sup>5</sup>	10–10 <sup>4</sup>	100–5000
	MCP*	100–650	0.01–0.10	10 <sup>3</sup> –10 <sup>7</sup>	0.15–0.3	10 <sup>2</sup> –10 <sup>4</sup>	0.1–200	10–6000
	HPD*	115–850	0.1–0.3	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>	7	10 <sup>2</sup> –10 <sup>5</sup>	10–10 <sup>3</sup>	~2 × 10 <sup>4</sup> ~600
Газ	GPM*	115–500	0.15–0.3	10 <sup>3</sup> –10 <sup>6</sup>	O(0.1) O(10)	10–10 <sup>3</sup>	300–2000	O(10)
	APD	300–1700	~0.7	10–10 <sup>8</sup>	O(1)	10–10 <sup>3</sup>	400–1400	O(100)
П/п	PPD	400–550	0.15–0.3	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	~1	1–10	30–60	O(10)
	VLPC	500–600	~0.9	~5 × 10 <sup>4</sup>	~10	1	~7	~1

PMT – фотоэлектронные умножители  
MCP – микроканальные пластины  
HPD – гибридные фото детекторы (с п/п сенсором)  
GPM – газовые фотоумножители (GEM и др.)  
APD – лавинные фотодиоды (+ G-APD)  
PPD (SiPM) – пиксельные лавинные фотодетекторы  
VLPC – счетчики видимого света на основе As с примесью Si (T<sub>раб</sub> = 7 К)

\* – детекторы могут иметь многоанодную конструкцию (для них площадь, шум и цена за канал)  
O – усредненная величина

**Методы регистрации сцинтилляций – детекторы фотонов**

3 основных типа фотодетекторов: газовые, вакуумные, полупроводниковые

**Назначение:** генерация электрического сигнала пропорционального количеству первичных фотонов с длинами волн 100-1000 нм (E ~ 1 эВ)

**Три основных процесса в ф.д.:**

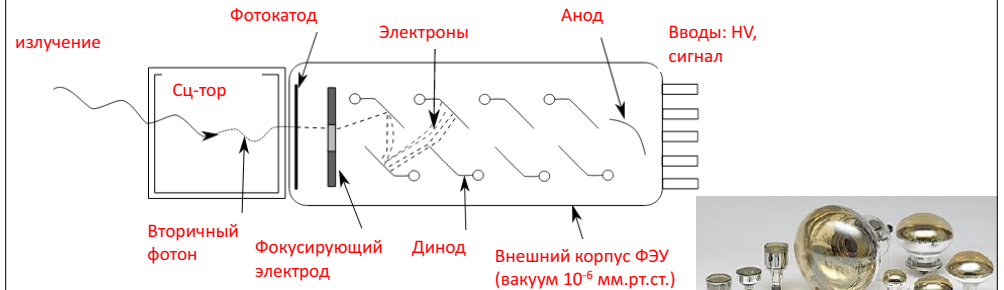
- 1) Генерация первичных фотоэлектронов или электрон-дырочных пар
- 2) Усиление первичного сигнала до детектируемого уровня (пошаговое или лавинное)
- 3) Собираение вторичных электронов и формирование электрического сигнала

**Основные характеристики ф.д.:**

- 1) **Квантовая эффективность (QE, ε<sub>Q</sub>)** – число фотоэлектронов на один поглощенный фотон: QE=0÷1  
в п/п может образоваться > 1 э/дырочная пара на фотон
- 2) **Эффективность сбора фотоэлектронов (CE, ε<sub>C</sub>)** внутри ф.д.: CE=0÷1
- 3) **Коэффициент усиления (G)** – число собранных электронов к начальному числу фотоэлектронов
- 4) **Темновой шум и темновой ток** – уровень сигналов при отсутствии внешних фотонов
- 5) **Энергетическое разрешение** – определяется уровнем шума электроники (ENC ~ N<sub>e</sub>), статистическими флуктуациями при усилении сигнала и числа фотонов от источника

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \sqrt{\frac{fN}{n\gamma\epsilon_Q\epsilon_C} + \left(\frac{N_e}{Gn\gamma\epsilon_Q\epsilon_C}\right)^2} \quad fN - \text{фактор Фано}$$

**Сцинтилляционный счетчик с ФЭУ**



- В сц. излучение преобразуется в фотоны видимого диапазона
- Эти фотоны попадают на фотокатод ФЭУ
- В результате фотоэффекта образуются фотоэлектроны (кв. эфф. ~ 25% - зависит от материала)
- Электроны ускоряются и направляются электрическим полем к динодам (9-15 шт)
- Происходит вторичная электронная эмиссия на динодах  
выход вторичных электронов 3-10 (коэффициент вторичной эмиссии зависит от материала)
- Электронная лавина собирается на аноде (Коэффициент усиления сигнала до 10<sup>10</sup>)

- характерное время усиления (время сбора электронов на аноде) ~ неск. нс  
- Сигнал пропорционален энергии частицы  
- ФЭУ подвержены воздействию магнитного поля (большой путь дрейфа электронов)

### Чем ограничен сбор фотонов

- 1) Поглощение фотонов в сцинтилляторе: прозрачность (полоса поглощения) и геометрические размеры сцинтиллятора
- 2) поглощение между сцинтиллятором и фотокатодом, например в световоде
- 3) поглощение в упаковке сцинтиллятора, отражателе, стеклянной колбе ФЭУ



• **Конверсионная эффективность фотокатода  $C_{fe}$**  (вероятность выбивания фотоэлектрона из фотокатода ФЭУ)

$$C_{fe} \sim 0.05 - 0.1$$

• **Коэффициент усиления ФЭУ  $G=10^5-10^7$**

• **На аноде имеем  $N_0 g C_{fe} G$  электронов**

Если анодная нагрузка  $R$  достаточна, чтобы  $RC \gg \tau$  ( $\tau$  - время высвечивания), то **амплитуда импульса**

$$V = \frac{E C_{ef} C_{fe} g G e}{h\nu C} \quad \begin{array}{l} E - \text{поглощенная энергия} \\ C - \text{входная емкость усилителя} \end{array}$$

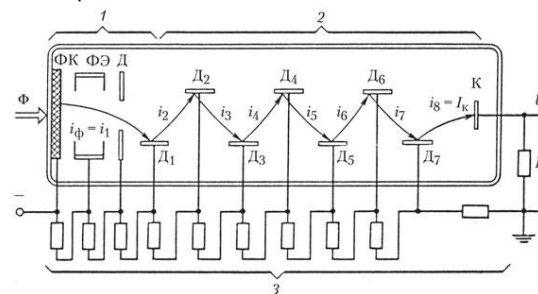
Если  $C_{fe}$  и  $C_{ef}$  не зависят от энергии частицы, то  $V \sim E$  **Можно определять энергию частицы!**

## Background

### Сцинтилляционные детекторы

1. Тип сцинтиллятора – органические, неорганические, газы – определяет основные свойства сц. детектора: количество фотонов, интенсивность высвечивания, зависимость от энергии излучения, временные характеристики, чувствительность к данному типу излучения
  2. Механизм люминесценции для различных типов сц. существенно различается
    - орг. сц. – меньшие времена высвечивания
    - неорг. сц. – более длительное высвечивание ( $\sim$  в 10-100 раз)
  3. Сц. Должен быть максимально прозрачен для собственного излучения
    - орг. сц. – более прозрачны + сместители спектра
    - неорг. сц. – активаторы
  4. Световоды – оптическая передача информации на фотодетектор
  5. Фотодетекторы - газные, вакуумные, п/п, гибридные
  6. Выбор ф.д. – обуславливается экспериментальной задачей
- Много факторов:** площадь регистрации, эффективность, стоимость, наличие фонового излучения, интенсивность и длина волны регистрируемого излучения, температура, окружающая среда, наличие магнитного поля, требования по высоковольтному напряжению, размер детектора, счет/интегрирование и др.

### Устройство ФЭУ



Фотоны, попадая на фотокатод ФЭУ, в результате фотоэффекта выбивают электроны, в результате чего на аноде ФЭУ возникает электрический импульс, который далее усиливается динодной системы за счёт механизма вторичной электронной эмиссии. Анодный токовый сигнал ФЭУ – через усилитель или непосредственно - подается на вход измерительного прибора – счетчика импульсов, осциллографа, аналого-цифрового преобразователя и т.п. Амплитуда и длительность импульса на выходе определяются свойствами как сцинтиллятора, так и ФЭУ. В ряде случаев на выходе усилителя наблюдается большое число импульсов (обычно малых по амплитуде), не связанных с регистрацией ядерных частиц, а именно, импульсов собственных шумов ФЭУ и ускорителя. Для устранения шумов между усилителем и счётчиком импульсов включается интегральный амплитудный дискриминатор, пропускающий лишь те импульсы, амплитуды которых больше некоторого значения порогового напряжения

Фотоэлектронный умножитель представляет собой стеклянный цилиндр, откаченный до остаточного давления не выше 10-6 мм рт. ст., в торце которого расположено прозрачное плоское окно, на поверхность которого со стороны эвакуируемого объёма нанесён тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов (фотокатод), обычно на основе сурьмы и цезия. Далее в эвакуированном пространстве располагается серия электродов – динодов, на которые с помощью делителя напряжения от источника электропитания подаётся последовательно возрастающая разность потенциалов. Диноды ФЭУ изготавливаются из вещества также с малой работой выхода электронов. Они способны при бомбардировке их электронами испускать вторичные электроны в количествах, превышающих число первичных в несколько раз. Последний динод является анодом ФЭУ. Основным параметром ФЭУ является коэффициент усиления при определённом режиме питания. Обычно ФЭУ содержит девять и более динодов и усиление первичного тока достигает для различных умножителей величин 105 – 1010 раз, что позволяет получать электрические сигналы амплитудой от вольт до десятков вольт.