

# Детекторы ионизирующих излучений

# СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

## Историческая справка

Первый сцинтилляционный детектор, названный спинтарископом, был открыт Круксом в 1903 году и представлял собой экран, покрытый слоем ZnS. Вспышки, возникавшие при попадании в него заряженных частиц, фиксировались с помощью микроскопа. Именно с таким детектором Гейгер и Марсден в 1909 г. провели опыт по рассеянию альфа-частиц атомами золота, приведший к открытию атомного ядра. Начиная с 1944 г. световые вспышки от сцинтиллятора регистрируют фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Позже для этих целей стали использовать также полупроводниковые фотодиоды или микроканальные пластины

## СЦИНТИЛЛЯТОРЫ - вещества способные преобразовать энергию ядерных излучений в фотоны – кванты видимого или ультрафиолетового излучения



### ТВЕРДЫЕ

*Неорганические кристаллы:* **NaI(Tl), KI(Tl), CsI(Tl), LiI(Eu), LiF(Eu), NaCl(Ag Cl), ZnS(Ag)**. Малая длительность сцинтилляции, линейная зависимость между амплитудой импульса и энергией частицы.

*Органические кристаллы:* **антрацен, стильбен, нафталин.**

*Пластики:* Это твердые растворы флуоресцирующих органических соединений в подходящем прозрачном высокомолекулярном веществе. Антрацен, стильбен (0,1-0,4%) в полистироле или полиметилметакриле (оргстекло)



### ГАЗОВЫЕ

*Благородные газы:* **криптон, ксенон, аргон и гелий.** Газовые сцинтилляторы обладают линейной зависимостью величины сигнала от энергии частицы в широком диапазоне энергий. Источник может быть введен в объем газового сцинтиллятора. Требуют высокой чистоты газа и специального ФЭУ с кварцевыми окнами



### ЖИДКИЕ

*Органические растворители,* (толуол, ксилол, бензол, фенилциклогексан), в который добавлены *сцинтилляторы* (дифенилоксазол, паратерфенил). Обладают высокой эффективностью к корпускулярному излучению и гамма-квантам низких энергий. Возможность спектрометрических измерений. Возможность использования ЖС-спектрометров для регистрации Черенковского излучения

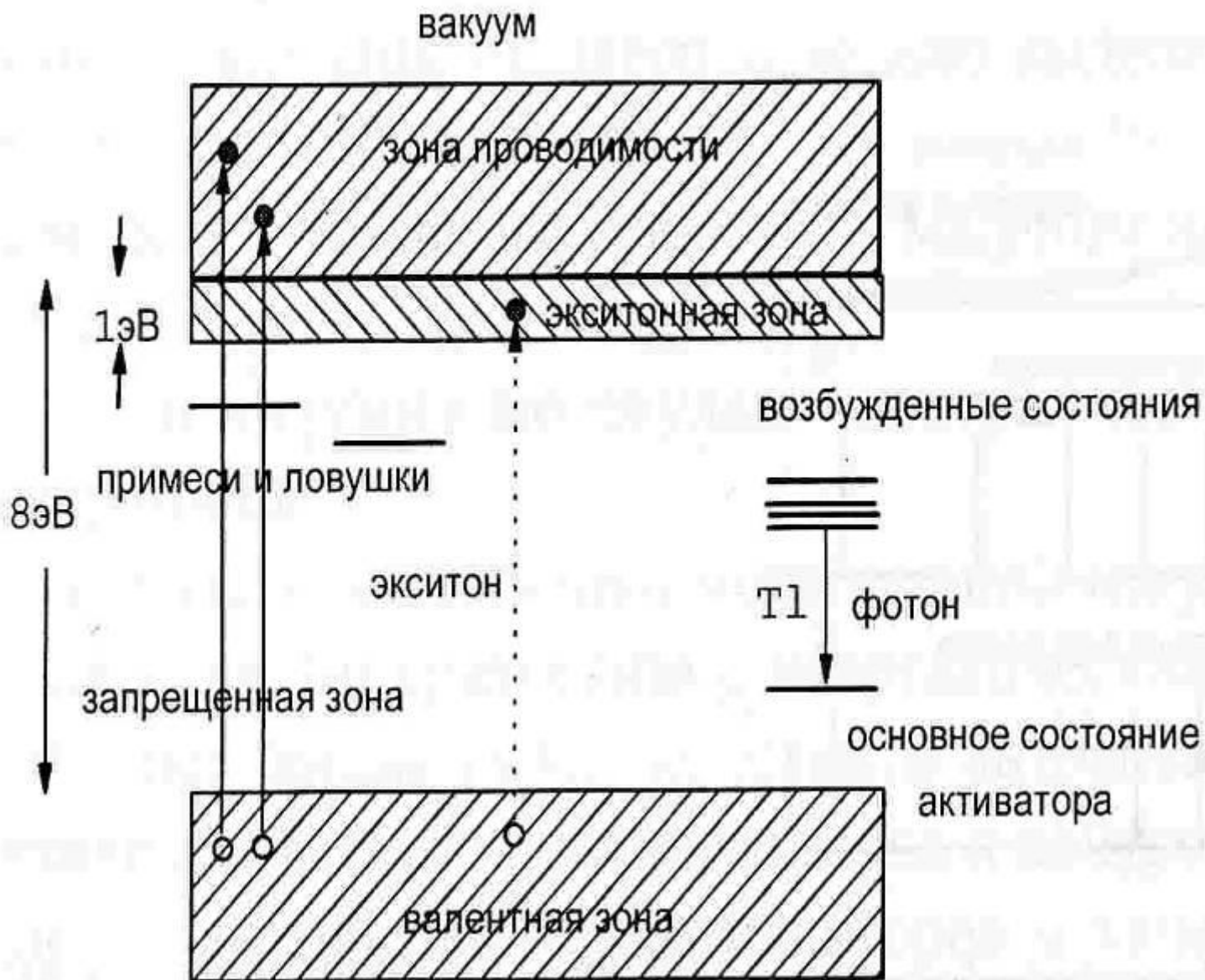
## Основные физико-химические процессы при сцинтилляции

### ЖИДКИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

Возбужденные молекулы (~10%) возникают в растворителе в результате переходов  $\pi$ -электронов в возбужденные  $\pi$ -состояния. При переходе возбужденных  $\pi$ -состояний в основное испускаются кванты света в видимой или ближней ультрафиолетовой области спектра. Для повышения квантового выхода к растворителю добавляют сцинтиллятор (РРО). Нижний уровень возбуждения  $\pi$ -состояний молекул сцинтиллятора должен быть меньше уровня возбуждения молекул растворителя. Если в процессе тепловой миграции возбужденная молекула р-теля оказывается в достаточной близости от молекулы сцинтиллятора, происходит процесс переноса энергии от молекулы р-ля к молекуле сцинтиллятора. Возбужденные  $\pi$ -состояния молекул активатора тратят всю энергию возбуждения на испускание квантов света

### ТВЕРДЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

Процесс возникновения сцинтилляций можно представить при помощи зонной теории твердого тела. Если в кристалле имеются какие-либо дефекты, нарушения решетки или примесные атомы, то возможно появление энергетических электронных уровней, расположенных в запрещенной зоне. При внешнем воздействии электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости. В валентной зоне останутся свободные места, обладающие свойствами положительно заряженных частиц с единичным зарядом и называемые дырками. Описанный процесс и является процессом возбуждения кристалла. Возбуждение снимается путем обратного перехода электронов из зоны проводимости в валентную зону, происходит рекомбинация электронов и дырок. Во многих кристаллах переход электрона из зоны проводимости в валентную происходит через промежуточные люминесцентные центры, уровни которых находятся в запрещенной зоне. При переходе электронов в две стадии испускаются фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны. Для таких фотонов вероятность поглощения в самом кристалле мала и поэтому световой выход для него много больше, чем для чистого, беспримесного кристалла.



## Основные характеристики сцинтиллятора

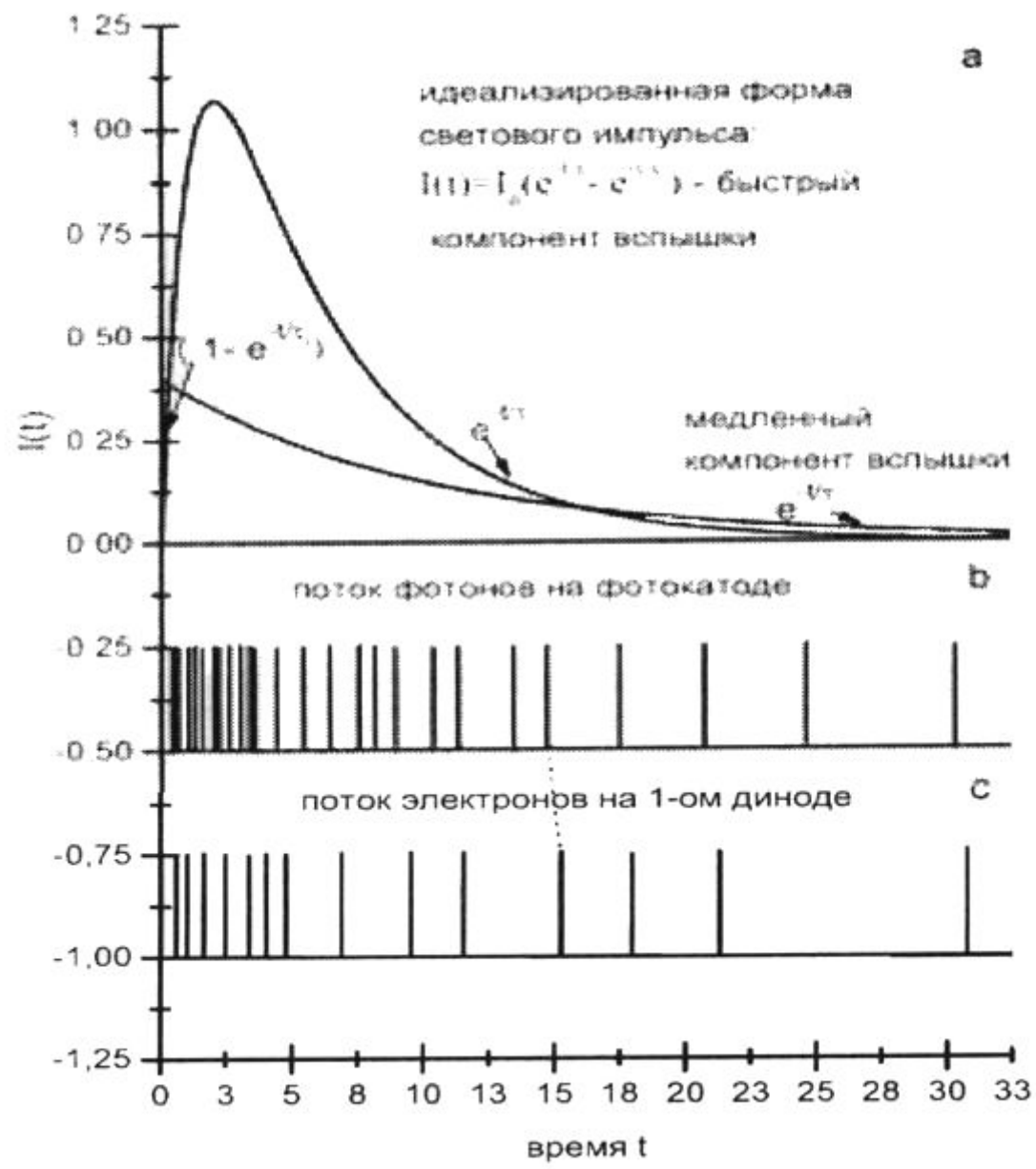
**1. Конверсионная эффективность** - это отношение энергии световой вспышки, к энергии, потерянной заряженной частицей в сцинтилляторе. Оно лежит в пределах от долей процента до 10 — 15%.

**2. Спектр излучения** - отношение световой энергии, вышедшей из сцинтиллятора, к энергии потерянной в нем заряженной частицей, называется техническим выходом или технической эффективностью.

Диапазон длин волн излучения должен как можно лучше перекрываться со спектром поглощения сенсора.

**3. Время высвечивания** сцинтиллятора – время ( $\tau$ ), в течение которого интенсивность падает в  $e$  раз. Длительность вспышки должна быть достаточно короткой, чтобы обеспечить необходимое быстродействие.

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$



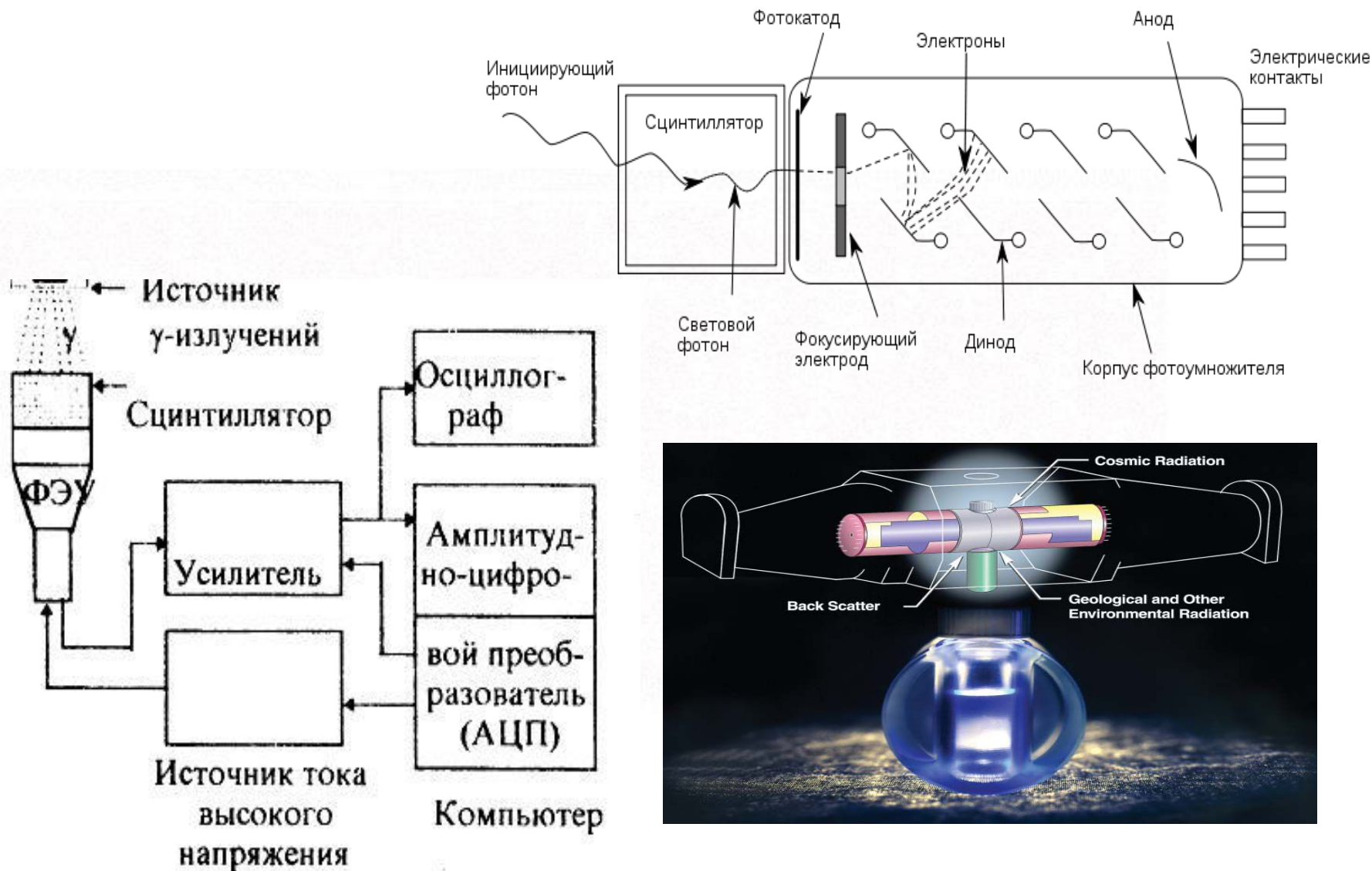


Материал	Плотность, $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	$\tau$ ( $\tau_1$ ), (нс)	Энергетическое разрешение, %	Энерг. выход., $\eta$	$\lambda_{\max}$ , (нм)
NaI(Tl)	3.67 5	230(5)	6-8	0,16	415
CsI(Tl)	4.51	700 (20)	10	0,06	550
BGO Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	300-600(нет)	10.1	0,013	480

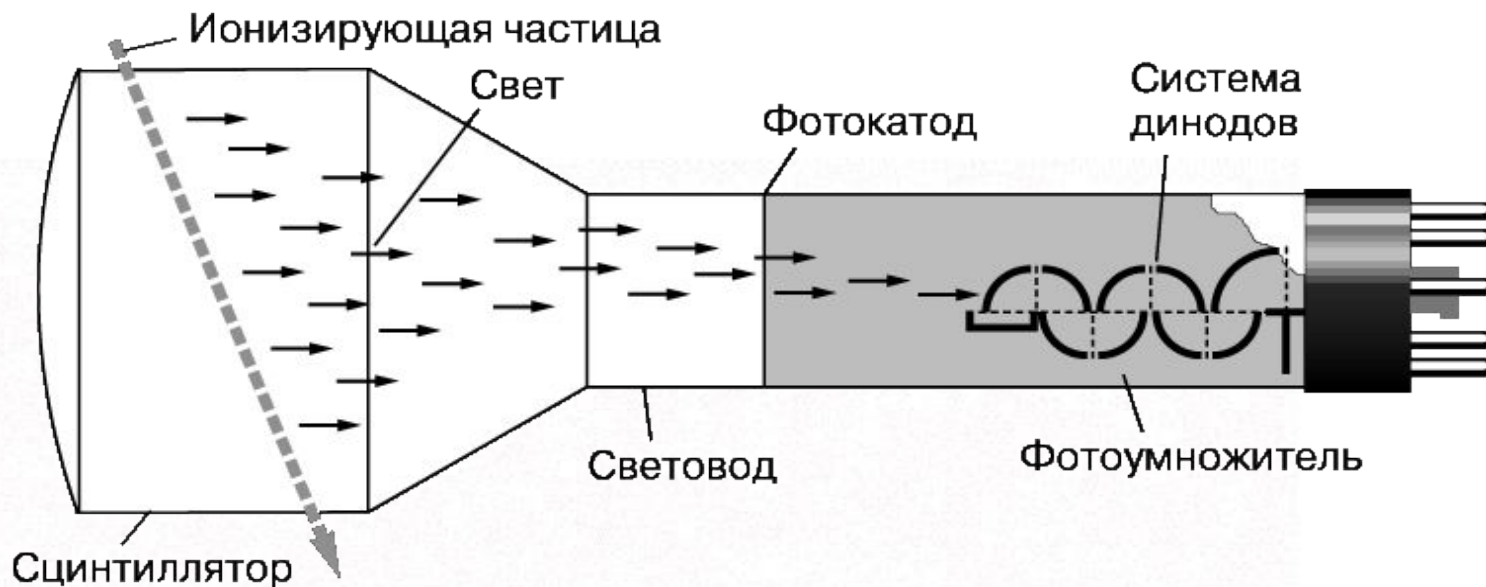
Материал	Время высвечивания, с	Длина волны в максимуме спектра, нм	Конверсионная эффективность $\eta$ , %
Ксенон	$10^{-8}$	325	14
Криптон	$10^{-8}$	318	8,7
Аргон	$10^{-8}$	250	3

Материал	Плотность, (г/см <sup>3</sup> )	Время высвечивания, с	Длина волны в максимуме спектра, нм	Конверсионная эффективность $\eta$ , %
Транс-стильбен, крист	1,16	$6 \cdot 10^{-9}$	410	2,0
Нафталин	1,15	$(7-8) \cdot 10^{-8}$	345	0,4
Антрацен	1,25	$2,7 \cdot 10^{-8}$	445	4,0
Ксилол + РОРОР	0,86	$2 \cdot 10^{-9}$	350	0,5
Толуол +РОРОР	0,86	$2,7 \cdot 10^{-9}$	430	0,6
Полистирол с добавками	1,06	$2,2 \cdot 10^{-9}$	400	0,4
ПВТ с добавками	1,1	$3 \cdot 10^{-9}$	430	0,5

# Схематическое устройство сцинтилляционного детектора



## ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ (ФЭУ)



**Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – фотоэлемент с многократным усилением, основанным на явлении вторичной эмиссии. Самый распространенный сенсор фотонов сцинтилляционных вспышек, служит для преобразования последних в импульсы электрического тока. Впервые разработан и предложен Л.А. Кубецким в 1930–34 г.г.**

Основными элементами ФЭУ являются фотокатод (сурмяно-цезиевый), фокусирующая система, умножительная система (диноды), анод (последний динод), делитель. Вся конструкция помещается в стеклянный баллон с высоким вакуумом -  $10^{-6}$  мм рт.ст. Между электродами ФЭУ создается ускоряющее поле с помощью делителя напряжения.

## Основные характеристики ФЭУ

1. *Максимум спектральной чувствительности* фотокатода 350 – 420 нм.

2. *Коэффициент усиления умножителя*:  $K = q \cdot \sigma^n$ ,

где  $q$  - множитель, меньший единицы, учитывающий неполное собиране электронов с фотокатода на первый динод;  $n$ - число динодов;  $\sigma$  - коэффициент вторичной эмиссии (отношение числа вторичных электронов к числу первичных). Для фотоумножителей типа ФЭУ-39 в рабочем режиме  $\sigma = 2-4$ , что соответствует коэффициенту усиления  $K = 10^4 - 10^8$ . Поскольку  $K$  не зависит от числа падающих электронов, ФЭУ представляет собой линейный прибор, т.е. заряд переносимый лавиной на анод пропорционален числу первичных фотоэлектронов, собираемых с фотокатода, и, следовательно, пропорционален световой вспышки, попавшей на катод.

## Помехи в ФЭУ

Кроме полезных импульсов существует темновой ток ФЭУ. Причины помех ФЭУ (космическое излучение, авто- и термоэмиссия из динодов и т.д.), проявляются случайным образом в случайной точке усилительного тракта. Такие электроны пройдут неполный процесс умножения и на выходе дадут импульс малой амплитуды. Сюда же попадут и микропробои по цепи питания и элементам конструкции. Исключение составит только термоэмиссия из фотокатода. Термоэлектроны пройдут тот же процесс умножения, что и фотоэлектроны, и дадут на выходе импульсы, неотличимые от полезных.

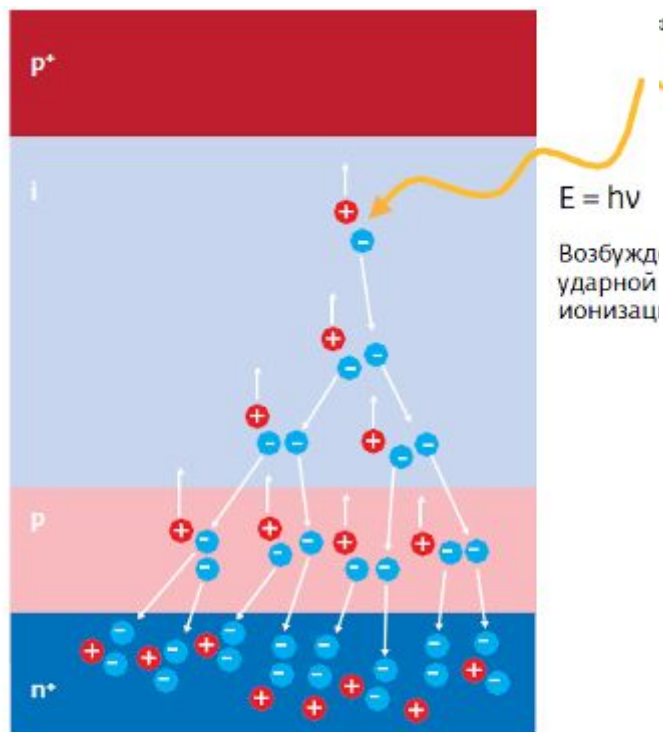
## Твердотельные ФЭУ (фотодиоды)

**Альтернативой традиционным вакуумным ФЭУ являются твердотельные фотоприемники, представленные фотодиодами (ФД) которые до последнего времени имели недостатки - отсутствие внутреннего усиления и большой темновой ток. Сегодня данные фотоприемники становятся все более актуальными и отличается от вакуумного ФЭУ значительно более низким напряжением питания, меньшей потребляемой мощностью, небольшими габаритами и весом, более высокими надёжностью и стабильностью характеристик, нечувствительностью к магнитным полям, высокой линейность световой характеристики в широком (до восьми порядков) диапазоне интенсивности светового потока.**

- лавинный фотодиод;
- кремниевый фотоэлектронный умножитель
- PIN фотодиод;
- металл-диэлектрик полупроводниковый фотодиод

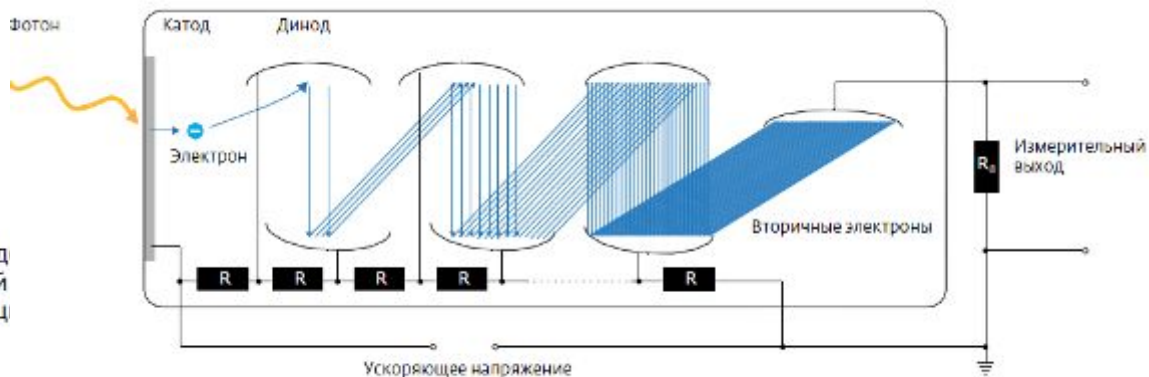
# Лавинный фотодиод

# Кремниевый фотоэлектронный умножитель

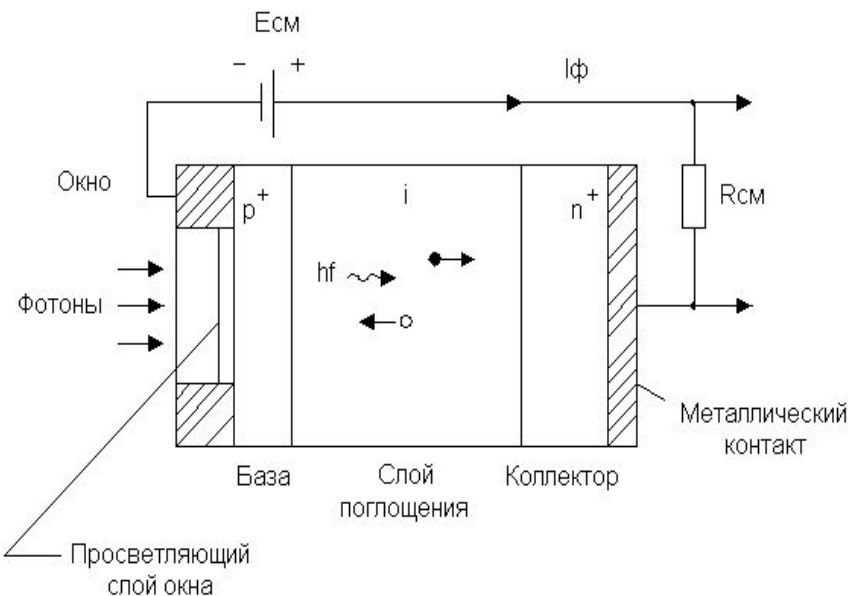


- + Дырка  $h^+$
- Электрон  $e^-$

Рис.3. Принцип работы лавинного фотодиода. Падающий фотон создает электронно-дырочную пару. Электрон, который ускоряется, создает дополнительную электрон-дырочную пару посредством ударной ионизации, и возникает эффект лавины



## Конструкция pin-фотодиода



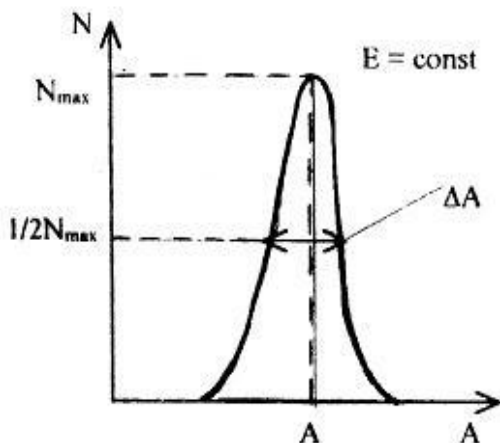
## Характеристики сцинтилляционного детектора

**Временные характеристики.** Время пролета электронов испытывает значительные отклонения из-за разброса скоростей электронов по величине и по направлению, а так же от их траекторий. Поэтому даже от мгновенной световой вспышки в сцинтилляторе на аноде ФЭУ будет возникать импульс растянутый до  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с. Т.е. ФЭУ обладает временным разрешением. Для неорганических сцинтилляторов время высвечивания сравнительно велико ( $>10^{-7}$  с), поэтому флуктуации времени пролета электронов через ФЭУ не играет роли. Для органических сцинтилляторов разрешающее время ФЭУ может оказаться сравнимым по величине со временем высвечивания сцинтиллятора и необходимы ФЭУ специальной конструкции с временным разрешением  $10^{-10}$  с.

**Энергетическое разрешение.** Амплитуда импульса на выходе ФЭУ может быть определена из соотношения:

$$A = E \frac{\alpha\beta\varepsilon}{C} ek$$

где  $E$  - энергия в эВ потерянная в сцинтилляторе заряженной частицей,  $e$  - заряд электрона,  $C$  - емкость анодной цепи,  $\alpha$  - конверсионная эффективность сцинтиллятора,  $\beta$  - коэффициент, учитывающий неполное собиране света на фотокатод,  $\varepsilon$  - эффективность фотокатода на 1 эВ энергии света.  $C$  и заряд  $e$  постоянные величины.

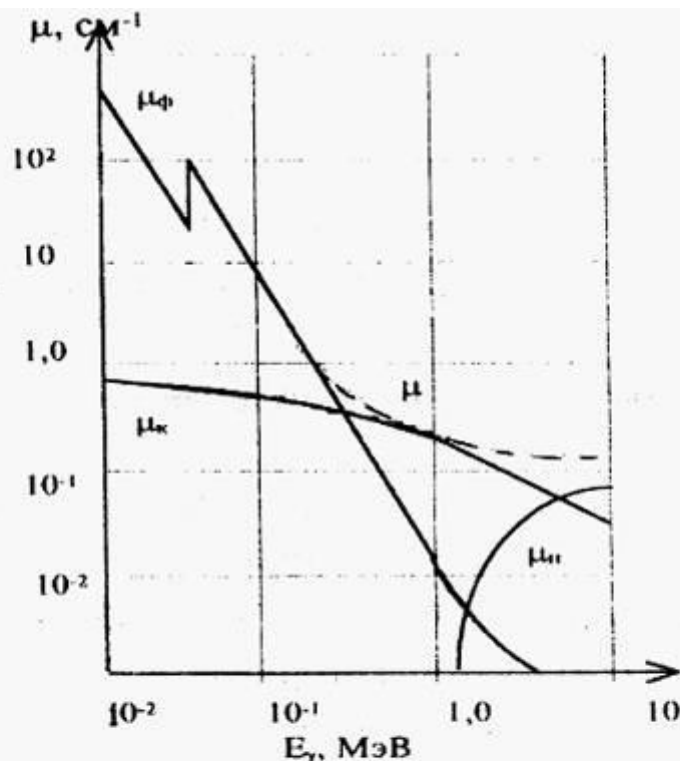


Распределение амплитуд импульсов  $A$  на выходе ФЭУ при прохождении через сцинтиллятор моноэнергетических заряженных частиц;  $N$  - число импульсов с амплитудой в интервале от  $A$  до  $(A+dA)$

*Экспериментальной амплитудной разрешающей способностью сцинтилляционного спектрометра  $R$  называют отношение ширины распределения на половине высоты  $\Delta A$  к средней амплитуде распределения при условии облучения сцинтиллятора моноэнергетическим облучением.  $R = \Delta A/A$ , так как  $A \sim E$ , то  $R = \Delta E/E$  (энергетическое разрешение).*



**Эффективность регистрации.** Для заряженных частиц эффективность регистрации близка к 100%, однако для взаимодействия с гамма-квантами надо учитывать фотоэффект, комптон эффект и эффект образования пар



Зависимость коэффициента поглощения  $\mu$  для кристалла NaI(Tl) от энергии  $\gamma$ -излучения:  $\mu_\phi$  - за счет фотоэффекта,  $\mu_k$  - за счет комптон-эффекта,  $\mu_p$  - за счет образования пар

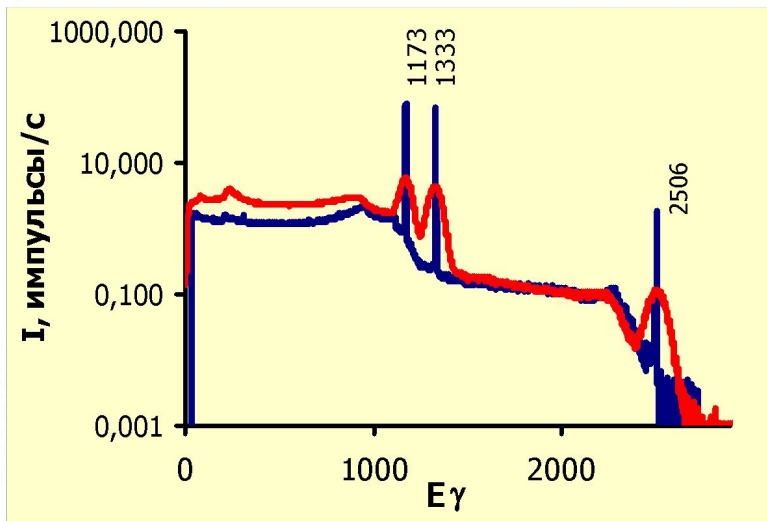
## **ПРИМЕНЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

**Достоинства сцинтилляционного счётчика: высокая эффективность регистрации различных частиц; быстрое действие; возможность изготовления сцинтилляторов разных размеров и конфигураций; высокая надёжность и относительно невысокая стоимость. Благодаря этим качествам сцинтилляционные счётчики широко применяются в ядерной физике (например, для измерения времени жизни возбуждённых состояний ядер, измерение сечения деления, регистрация осколков деления газовыми сцинтилляционными счётчиками), физике элементарных частиц и космических лучей (например, экспериментальное обнаружение нейтрино), в промышленности (гамма-дефектоскопия, радиационный контроль), дозиметрии (измерение потоков  $\gamma$ -излучений, испускаемых человеком и другими живыми организмами), радиометрии, геологии, медицине и т. д.**

**Недостатки сцинтилляционного счётчика: малая чувствительность к частицам низких энергий ( $1 \text{ кэВ}$ ), невысокая разрешающая способность по энергии.**

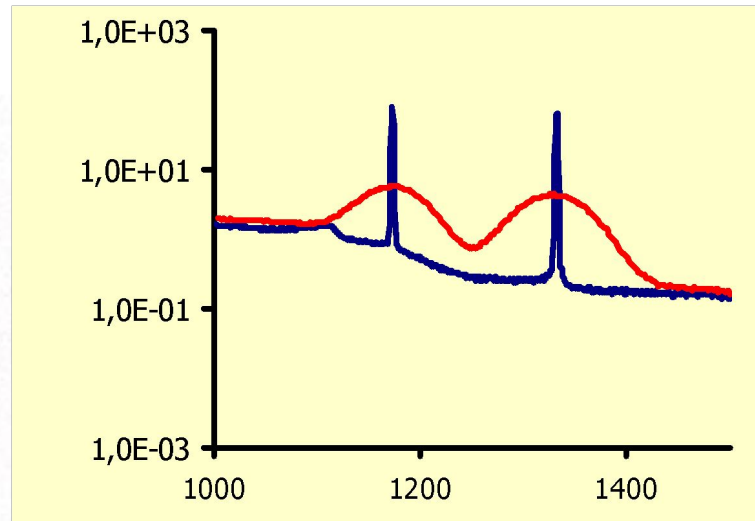
# Гамма-спектроскопия

## ГАММА-СПЕКТРЫ $^{60}\text{Co}$ - NaI(Tl) И HPGe ДЕТЕКТОРЫ



NaI(Tl)

HPGe



**Основным преимуществом сцинтилляционных детекторов является более высокая эффективность, поскольку можно выращивать кристаллы сцинтилляторов очень большого размера. Эти детекторы просты в обращении, не требуют охлаждения, что позволяет использовать их в тех случаях, когда нужен оперативный контроль или постоянный мониторинг радиоактивности, а также в экспериментах, не требующих высокого энергетического разрешения.**

**Они также обладают лучшим временным разрешением по сравнению с полупроводниковыми**

# ЖИДКОСТНО-СЦИНТИЛЯЦИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ

Энергетический порог регистрации  $\beta$ - $e^\pm$ -излучений от 2 кэВ,

Эффективность регистрации:

- $\alpha$ -излучения  $\sim 100\%$
- высокоэнергетического ( $> 50$  кэВ)  $\beta$ -излучения  $\sim 100\%$

МДА: для  $\beta$ -излучателей  $\sim 10-20$  мБк для  $\alpha$ -излучателей  $\sim 5$  мБк

Возможность  $\alpha$ - $\beta$ -разделения

Возможность проведения  $\alpha$ - $\beta$ -спектрометрии

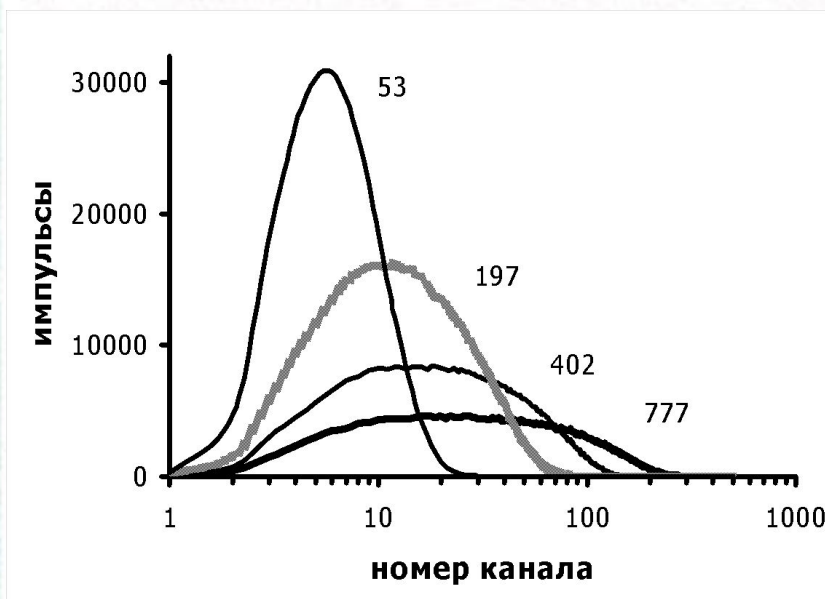
Быстрота и надежность получения оперативной информации о радионуклидном составе анализируемых объектов;

Минимальные трудозатраты при подготовке счетного образца;

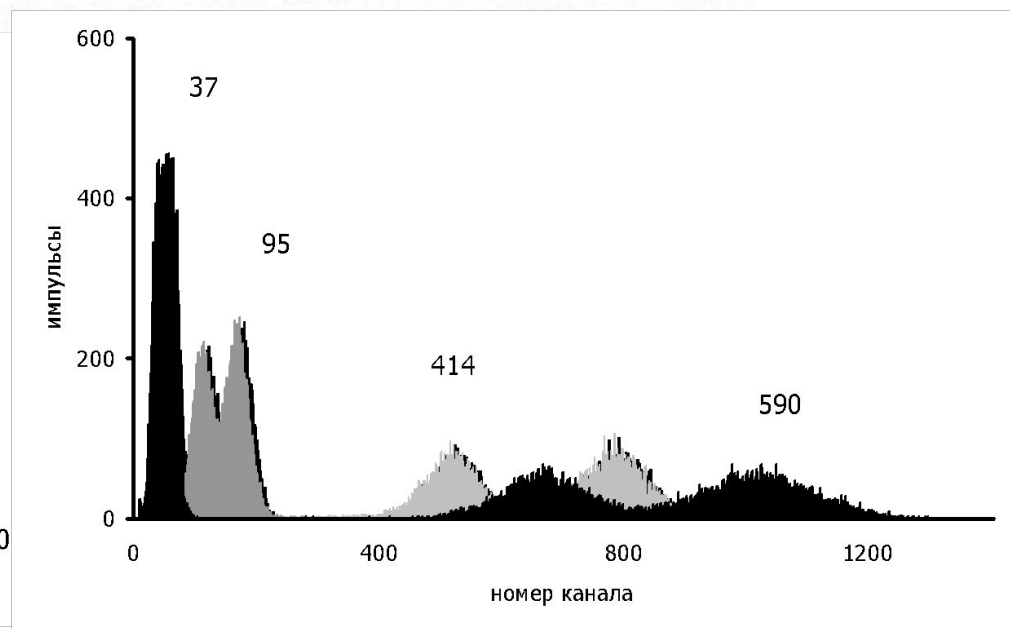
Возможность исключить в ряде случаев из аналитического цикла другие методы анализа ( $\alpha$ -,  $\gamma$ -спектрометрические);

...

**В ЖС препарате могут происходить процессы, приводящие к снижению доли энергии ионизирующей частицы, затрачиваемой на собственно сцинтиляционный процесс, т. е. к уменьшению квантового выхода флуоресценции, или гашению**



Жидкостно-сцинтиляционные спектры препаратов  $^{14}\text{C}$  с различным уровнем гашения.



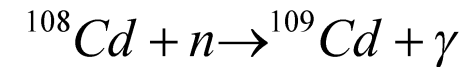
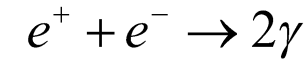
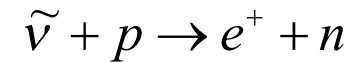
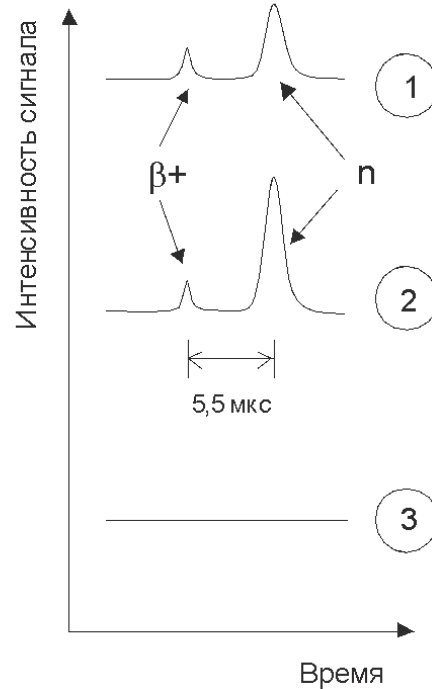
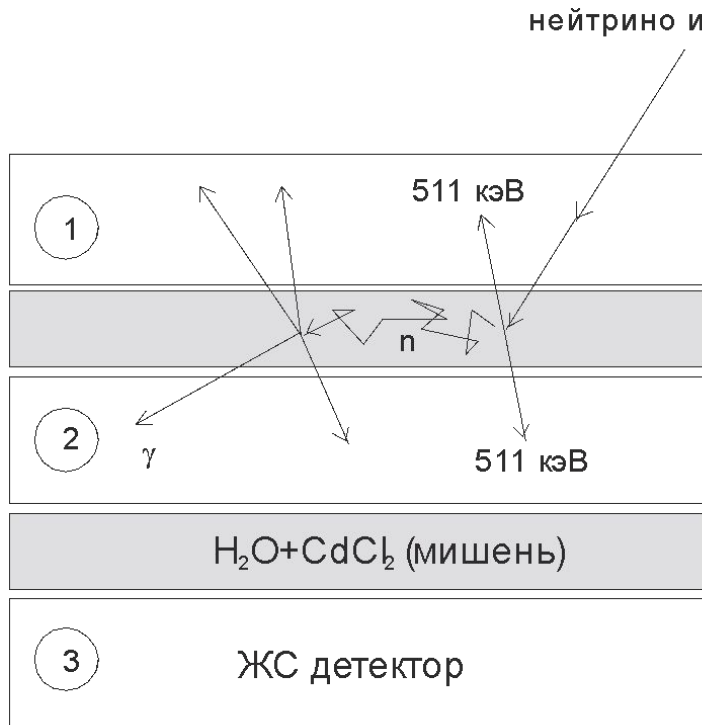
Смещение альфа-пиков в ЖС спектре в зависимости от гашения. Спектры  $^{211}\text{At}$  с дочерним  $^{211}\text{Po}$

## Области применения

- ❖ Мониторинг естественных ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  ...) и техногенных ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $\text{Pu}$  ...) радионуклидов в объектах окружающей среды (воздух, почва, вода, донные отложения, осадки, листва ...) на фоновых уровнях - включает радиохимическую подготовку проб;
- ❖ Экспресс-анализ (метод «скрининга» без радиохимической подготовки) различных радионуклидов в объектах окружающей среды при контроле выбросов и сбросов предприятий неядерного цикла – угольные, нефтяные, газовые месторождения, ТЭЦ;
- ❖ Контроль техногенных радионуклидов в выбросах и сбросах предприятий ядерного цикла ( $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  ...) - включает радиохимическую подготовку проб;
- ❖ Радиационный контроль источников питьевого водоснабжения:
  - экспресс-анализ (без радиохимической подготовки) содержания альфа- и бета- излучателей с одновременным определением основных компонентов, а также
  - анализ отдельных нормируемых радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ...) - включает радиохимическую подготовку проб;
- ❖ Радиационный контроль продуктов питания;
- ❖ Контроль РАО;

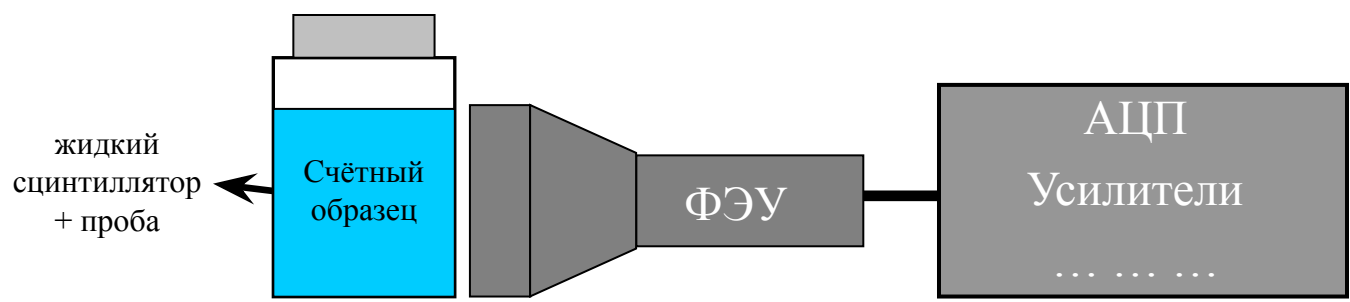
- ❖ Контроль содержания различных радионуклидов (учитывая специфику предприятия) в технологических средах на предприятиях ядерного цикла - экспресс-анализ методом «скрининга» без радиохимической подготовки или с минимальной упрощенной подготовкой;
- ❖ Контроль содержания в воздухе, а также внутреннего содержания различных радионуклидов персонала на предприятиях ядерного цикла;
- ❖ Вывод из эксплуатации и реабилитация территорий после демонтажа реакторов ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  ...);
- ❖ Экспрессное обследование больших групп людей в случае чрезвычайных ситуаций (например, с использованием анализов мочи или мазков из носа);
- ❖ Определение суммарной  $\alpha$ - $\beta$ -активности в различных объектах;
- ❖ Радиоуглеродный анализ;
- ❖ Прецизионный анализ содержания радона и торона в воздухе помещений;
- ❖ Контроль радиоизотопных трассеров в медицинских и биологических исследованиях;
- ❖ Контроль качества изотопной продукции;

# Регистрация электронного антинейтрино (Райнес, Коуэн, 1956)



Источник  
антинейтрино –  
Реактор  
200 ч – 567 событий,  
фон 209





1 ФЭУ

*Triathler*



*PERALS®*

*ORDELA, Oak Ridge, USA*



- => отсутствие активной защиты
- => большой и нестабильный фон

*Green Star*  
*Москва, Россия*



*Tri-Carb*, Packard, USA



*Guardian 1414*, Wallac, Finland



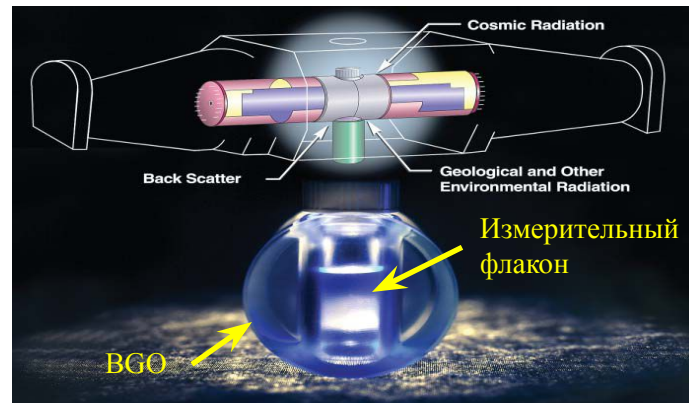
*Beckman*  
*Beckman Coulter Inc., USA*



## 2 ФЭУ + дополнительная активная защита

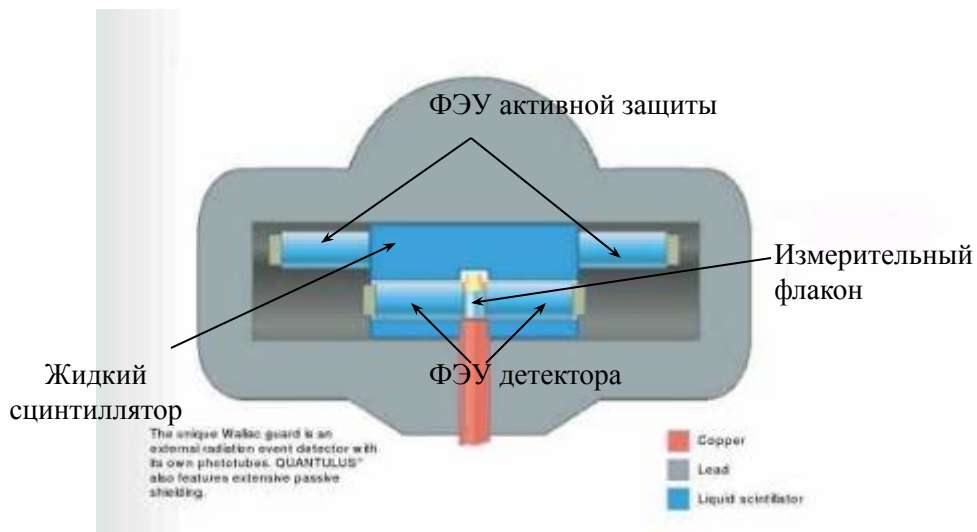
### Tri-Carb 3170, Packard, USA

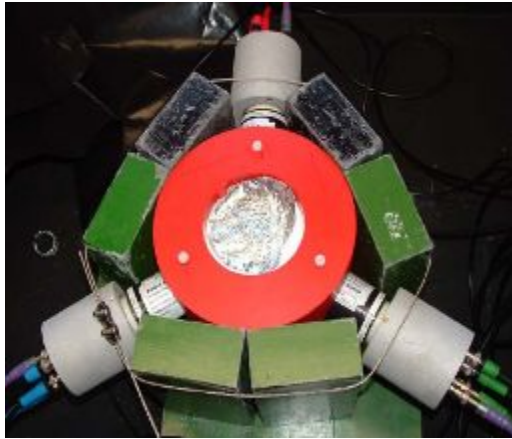
Активная защита из скнтилляционного кристалла BGO (германат висмута)



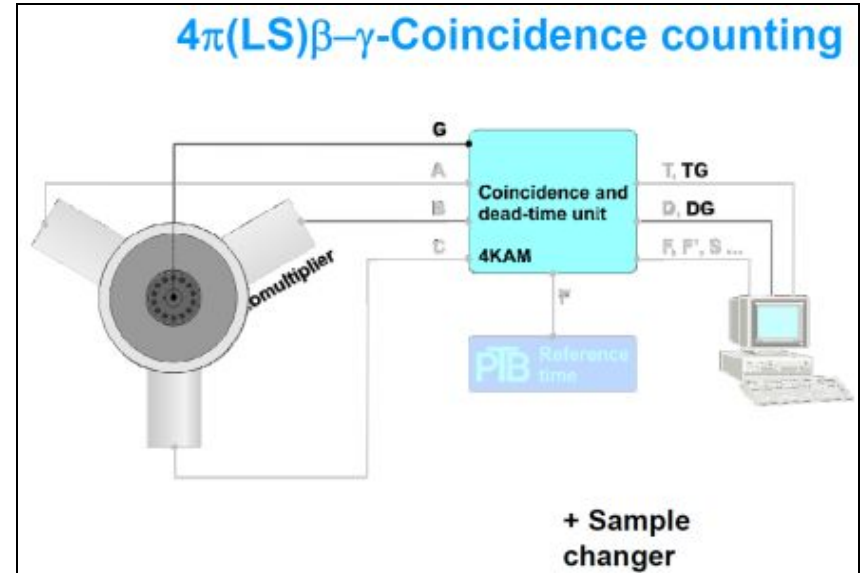
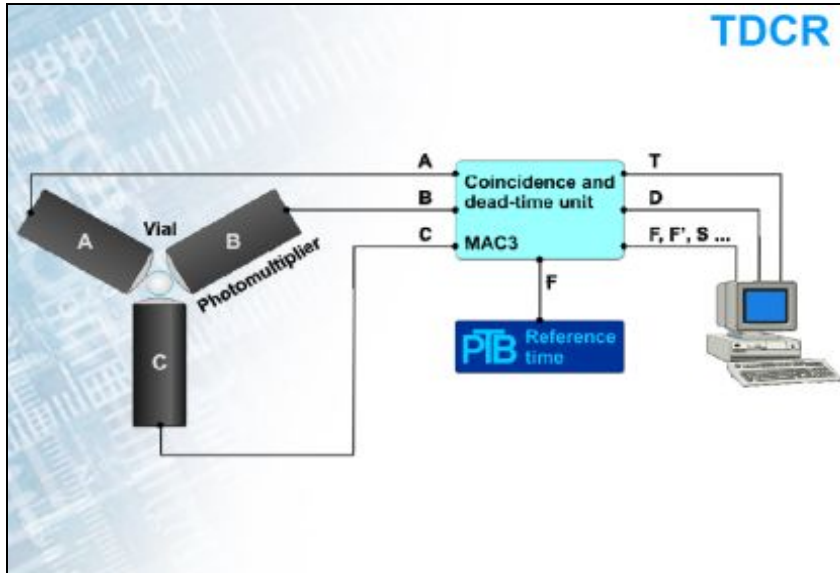
### Quantulus 1220, Wallac, Finland

Активная защита из жидкого скнтиллятора со своими ФЭУ





*Hidex 300 sl*  
*Hidex, Finland*



Черенковский счетчик представляет собой детектор, внешне сходный с со сцинтилляционным счетчиком. Он регистрирует так называемое черенковское излучение – свечение, испускаемое заряженной частицей, которая движется в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде

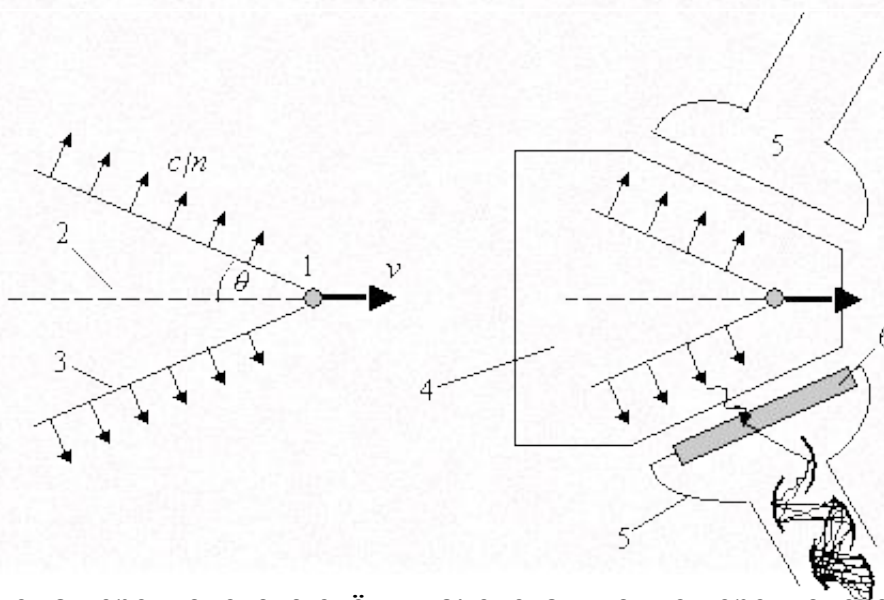
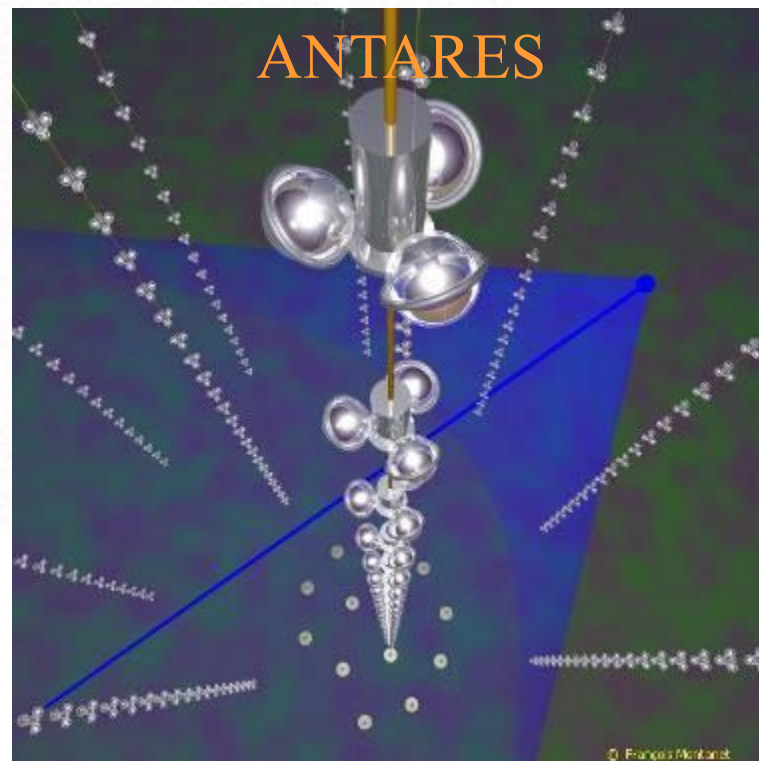
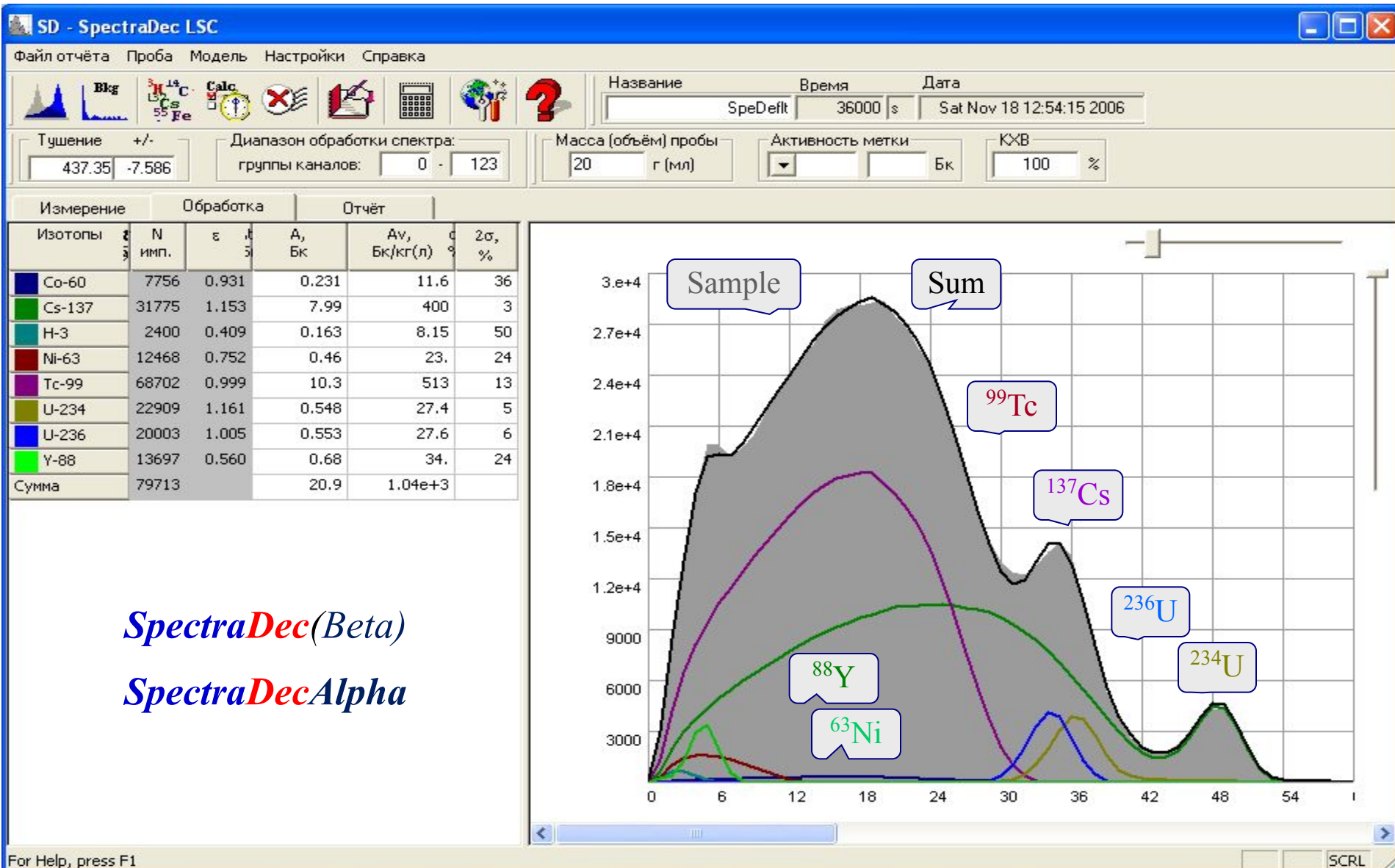


Схема черенковского счётчика: слева – конус черенковского излучения, справа – устройство счётчика. 1 - частица, 2 - траектория частицы, 3 - фронт волны, 4 - радиатор, 5 - ФЭУ (показано развитие лавины вторичных электронов, вызванное фотоэлектроном), 6 - фотокатод



Семейство программ “*SpectraDec*”. Позволяет оперативно в автоматическом режиме анализировать сложные спектры, в том числе спектры с малой статистикой и большой степенью наложения спектров отдельных радионуклидов друг на друга.



## Литературные источники

- 1. Ю.А. Сапожников, Р.А. Алиев, С.Н. Калмыков.**  
Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика.  
Бином. Лаборатория знаний. 2006. 286 с.
- 2. Р.А. Алиев.** Практические аспекты гамма-  
спектрометрического анализа. Российский химический  
журнал. Том LIV. 2010, №3, С. 180-190.
- 3. И.Н. Бекман.** Измерение ионизирующих излучений (курс  
лекций). Москва. 2006.  
[http://profbeckman.narod.ru/radiometr.htm#Лекция\\_2.\\_ДЕТЕКТОРЫ\\_РАДИОАКТИВНЫХ\\_ИЗЛУЧЕНИЙ](http://profbeckman.narod.ru/radiometr.htm#Лекция_2._ДЕТЕКТОРЫ_РАДИОАКТИВНЫХ_ИЗЛУЧЕНИЙ):
- 4. Сапожников Ю.А, Калмыков С.Н., Алиев Р.А.**  
Методическое руководство к курсу «Основы радиохимии и  
радиоэкологии». Жидкостно-сцинтилляционная  
спектроскопия. М.: Химфак МГУ, 2003.

# Трековые детекторы (авторадиография, компьютерная радиография и твердотельная трековая радиография)

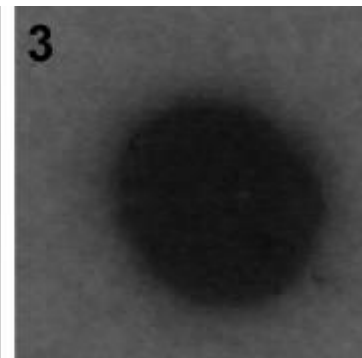
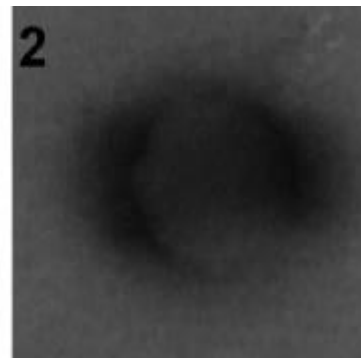
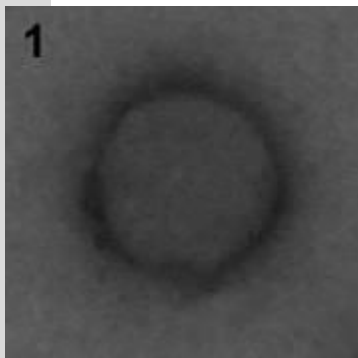
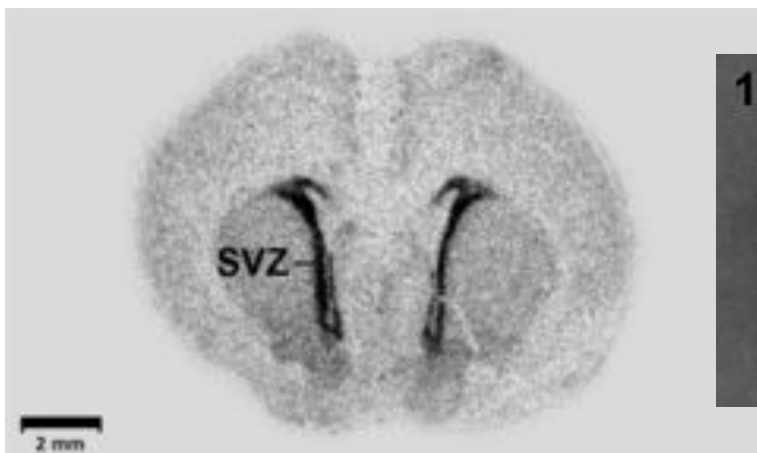


# Авторадиография

Пленка (фотоматериал) с чувствительной к радиоактивному излучению фотоэмульсией накладывается на поверхность или срез объекта.

Для получения распределения тех или иных веществ в объекте используют маркирование нужных молекул изотопным индикатором. Радиоактивные вещества, содержащиеся в объекте, как бы сами себя фотографируют (отсюда название).

После проявления места затемнения на пленке соответствуют локализации радиоактивных частиц. Метод используется в медицине, технике, а также в биологии, например, для изучения процессов фотосинтеза, где прослеживается след радиоактивного диоксида углерода, проходящего через различные химические стадии.



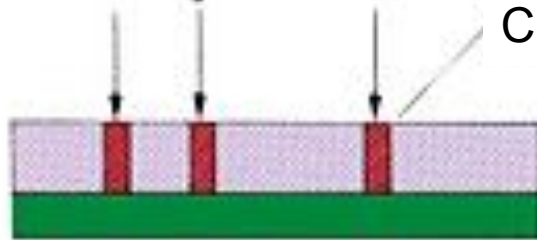
# Компьютерная радиография

Запасающая гибкая пластина



Фосфор: BaFBr (Eu<sup>2+</sup>)  
Подложка

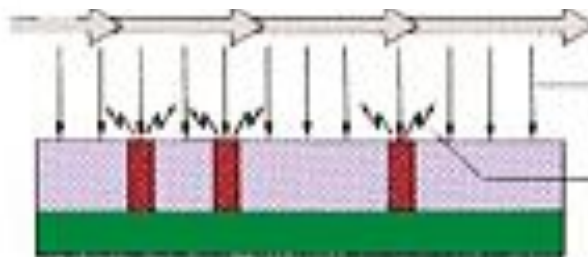
X-ray Photons



Скрытый образ

Экспонирование

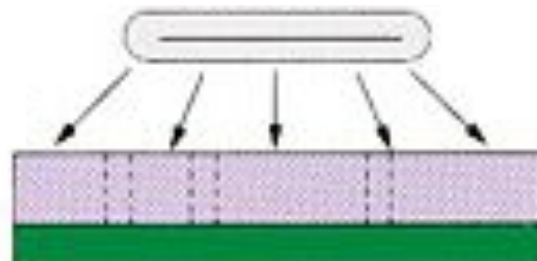
He-Ne лазер: Сканирование



Возбуждение: 633 нм

Люминисценция: 400 нм

Видимый свет



Erasing

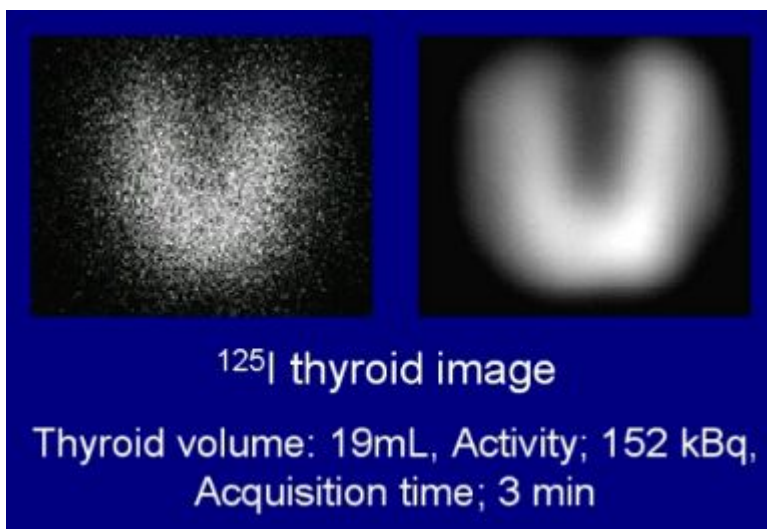
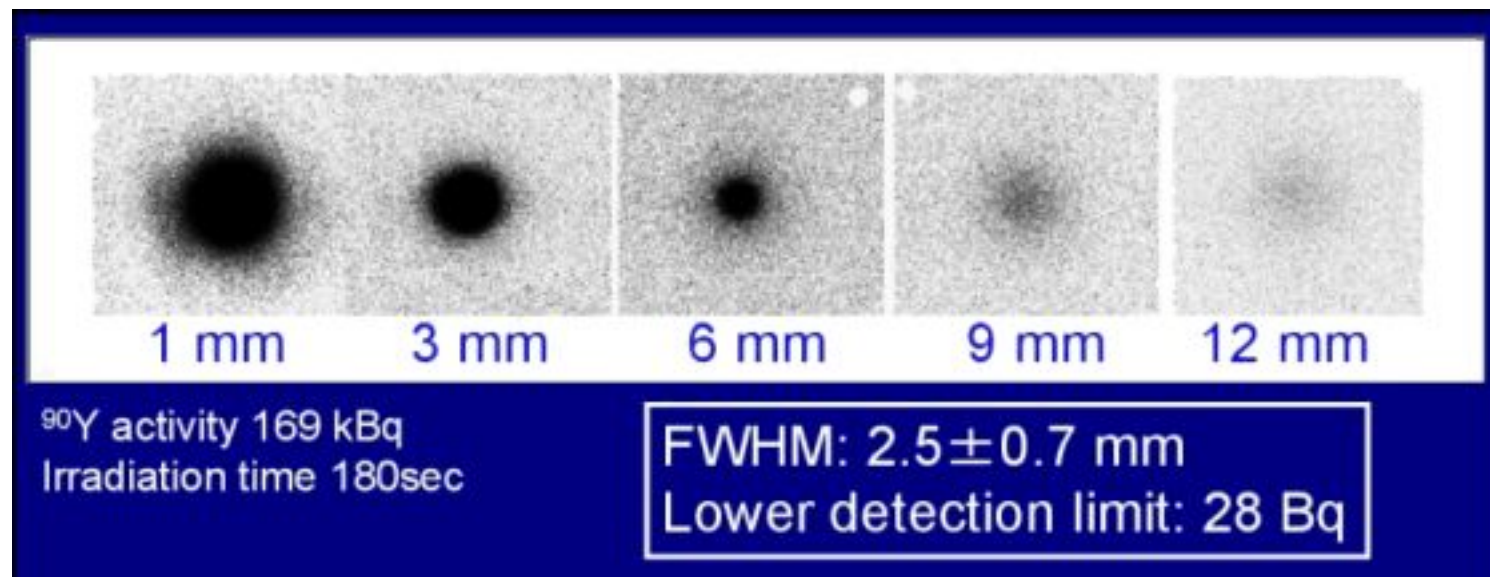
Компьютерная радиография - это технология получения цифровых изображений с применением Фосфорных Запоминающих Пластин вместо обычной радиографической пленки.

**Основные преимущества Компьютерной Радиографии:**

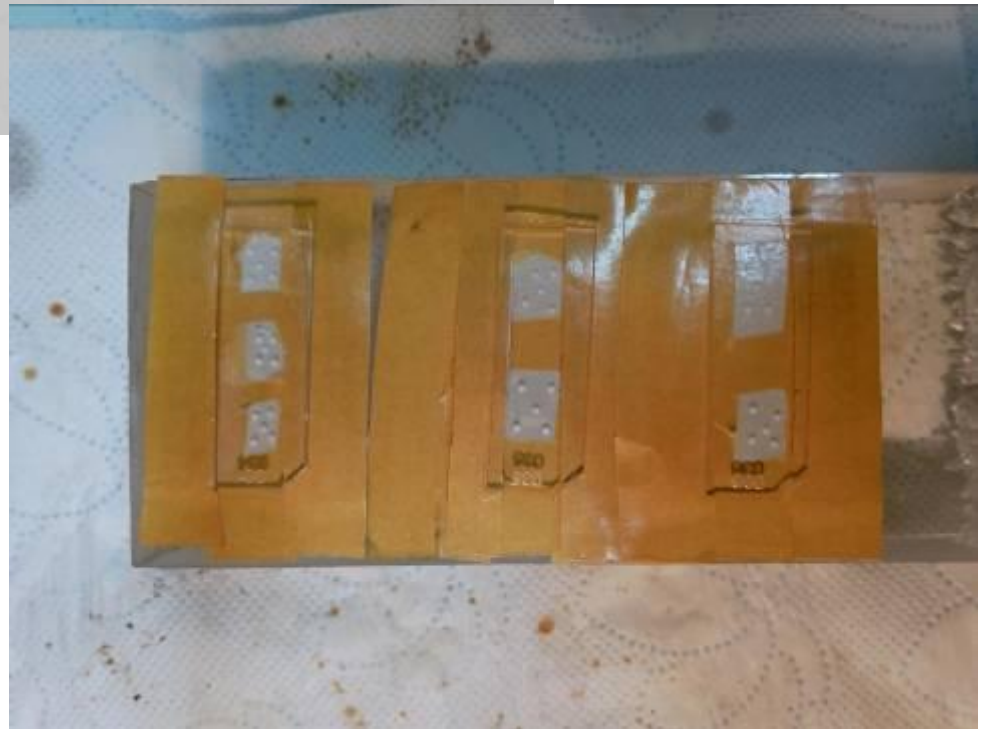
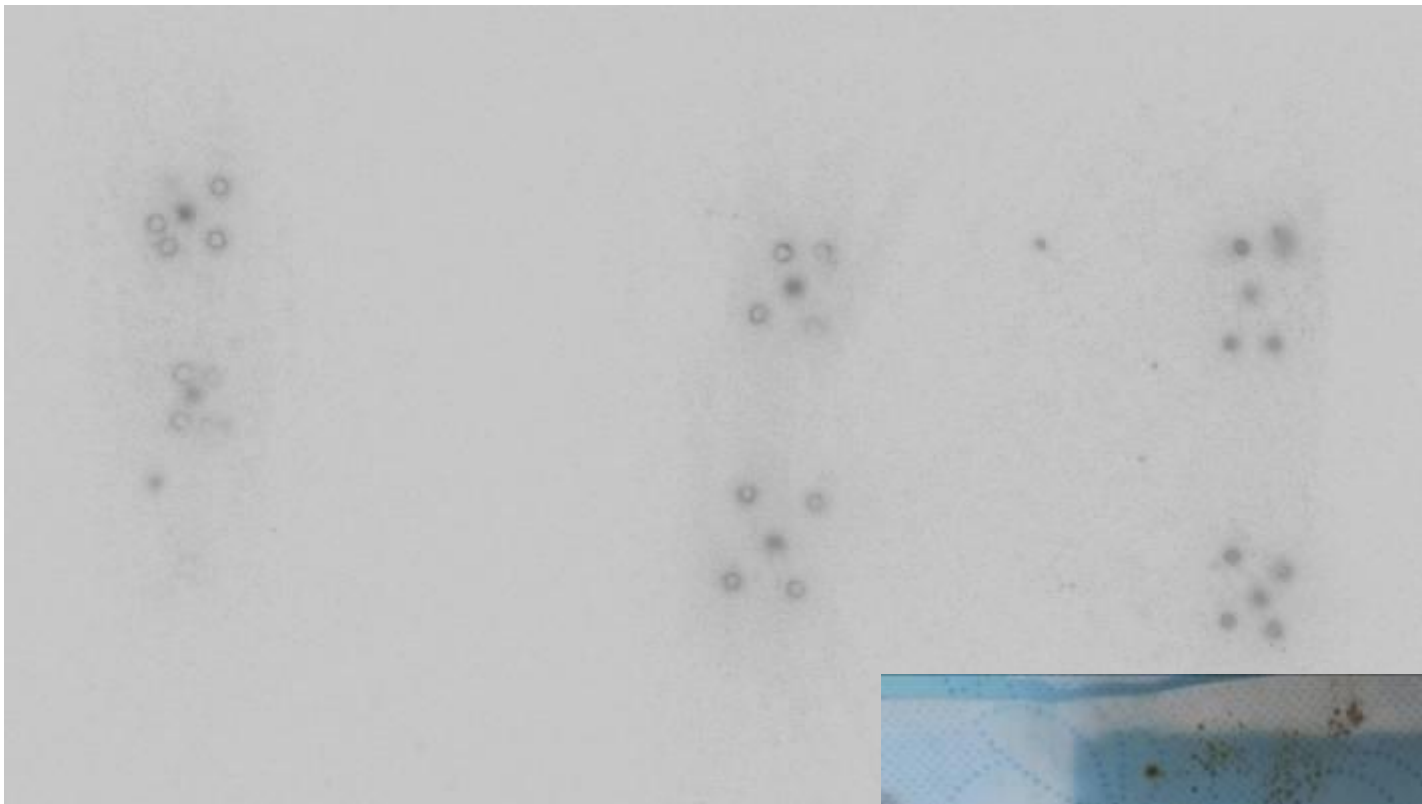
- ЗП используются многократно
- Не нужны темная комната и расходные материалы
- Время экспонирования и получения изображения сокращено
- Упрощенный процесс контроля и оптимизации изображения с применением ПО D-Test
- Простота обращения цифровых снимков и доступа к архиву

Стирание информации, -- Пластина готова для следующего использования (несколько тысяч раз)

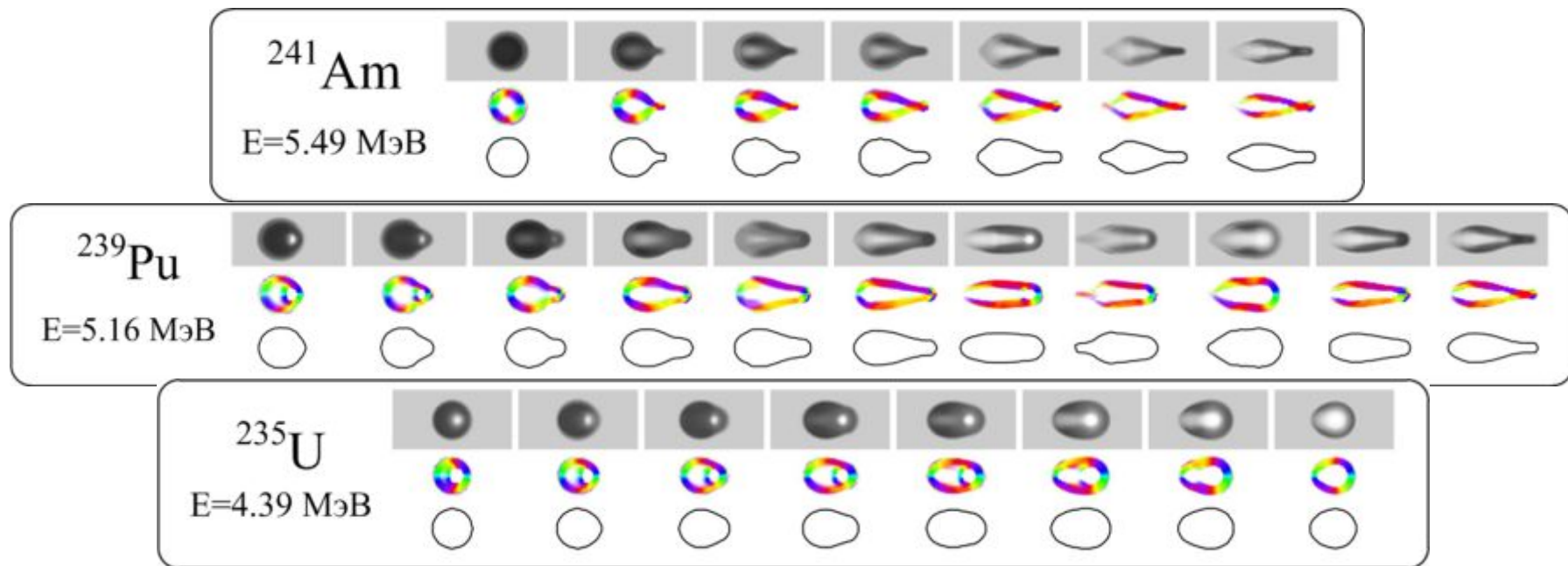
# Компьютерная радиография: бета-излучатели для решения медицинских задач



*Анализ проб с  
известным  
радионуклидным  
составом:  $^{90}\text{Y}$  и  $^{125}\text{I}$*



# Твердотельная трековая радиография для идентификации $\alpha$ -излучающих радионуклидов



Набор эталонов альфа-трековых изображений для заданной энергии  $\alpha$ -частицы при разных углах входа в детектор (условия травления одинаковые)

