

Детекторы ядерных излучений

**Счетчики,
спектрометры,
трековые регистраторы**

Устройства, предназначенные для обнаружения
и измерения параметров микроскопических
частиц высокой энергии:

*рождающихся в ядерных реакциях,
полученных на ускорителях,
составляющих космические лучи.*

Ионизационный метод

Электрически заряженные частицы высокой энергии при прохождении через вещество (твердое, жидкое, газообразное) создают большое количество **электронно-ионных пар**.

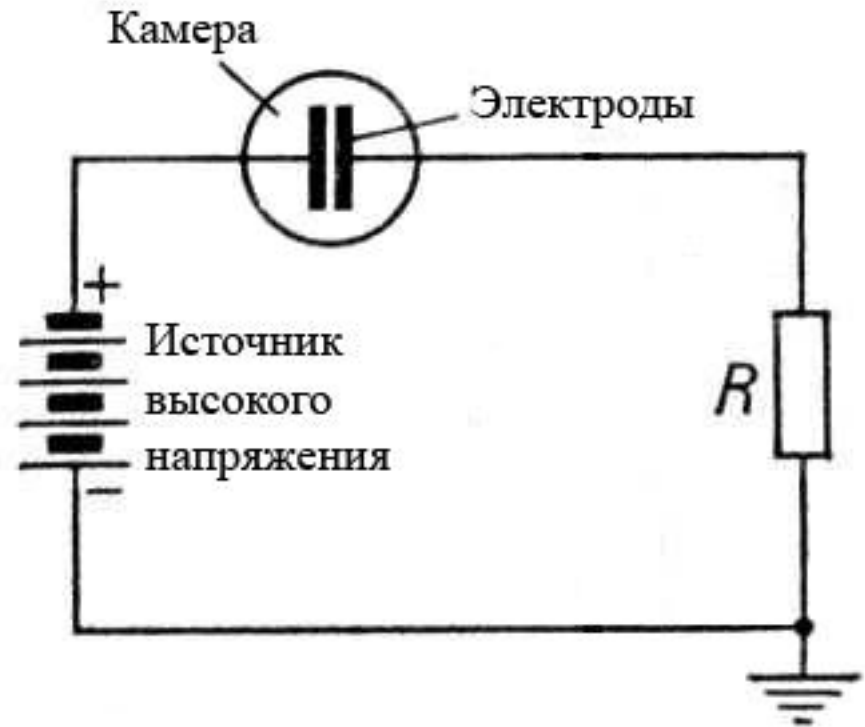
Нейтральные частицы высокой энергии также **ионизуют** атомы вещества за счет *вторичных* процессов.

Ионизационный метод базируется на регистрации явления **ионизации** вещества, что позволяет **обнаруживать** частицы высокой энергии и измерять их **энергию**.

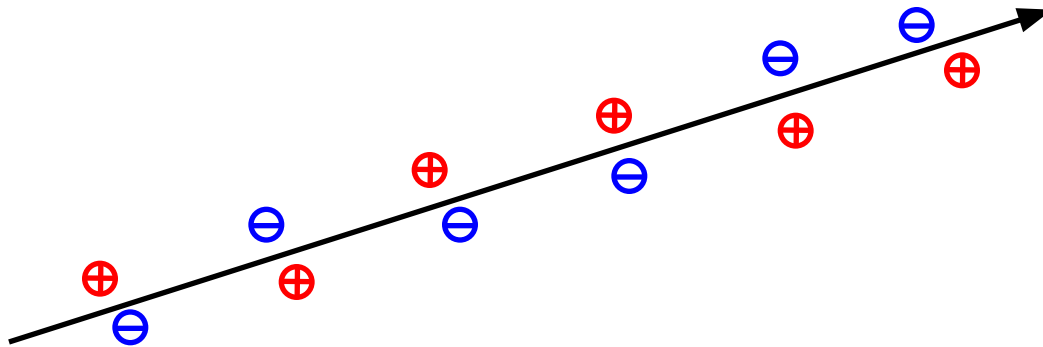
Ионизационная камера

Камера заполнена газом при определенном давлении. Газ инертный с примесью углеводородов (например, **аргон** с добавкой **метана**).

В рабочем объеме камере с помощью двух электродов создана **высокая разность потенциалов**.



При прохождении частицы высокой энергии через объем камеры образуются электронно-ионные пары.



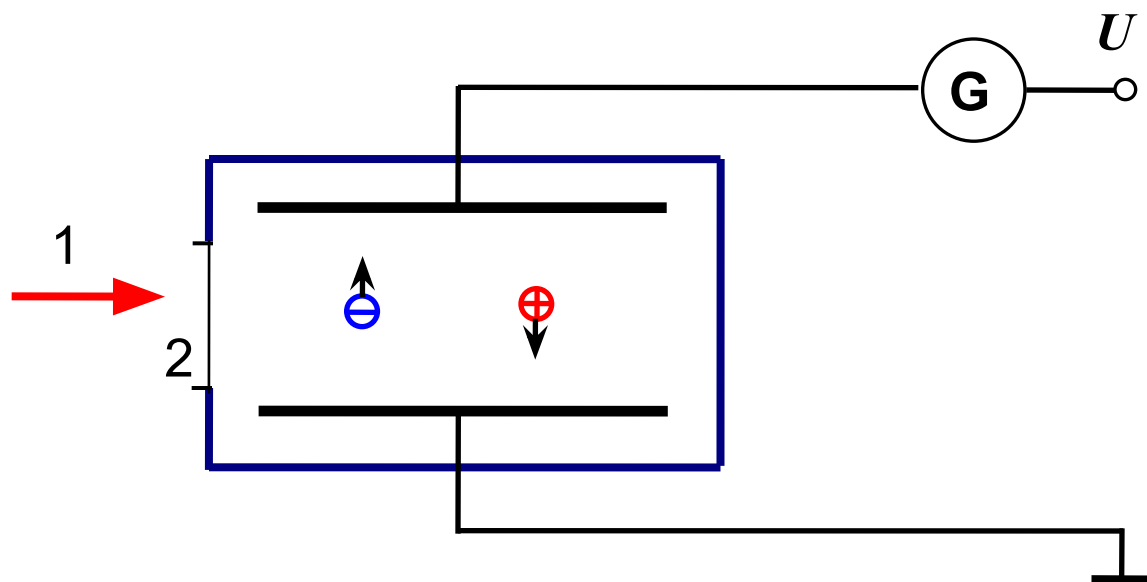
Количество образованных пар $\frac{E_0}{\overline{E_i}}$ (7.1)

где E_0 – энергия частицы,

$\overline{E_i}$ – средняя энергия ионизации атомов газа

Под действием **электрического поля** заряженные частицы движутся к соответствующему электроду.

Возникает импульс электрического тока, который регистрируется гальванометром.

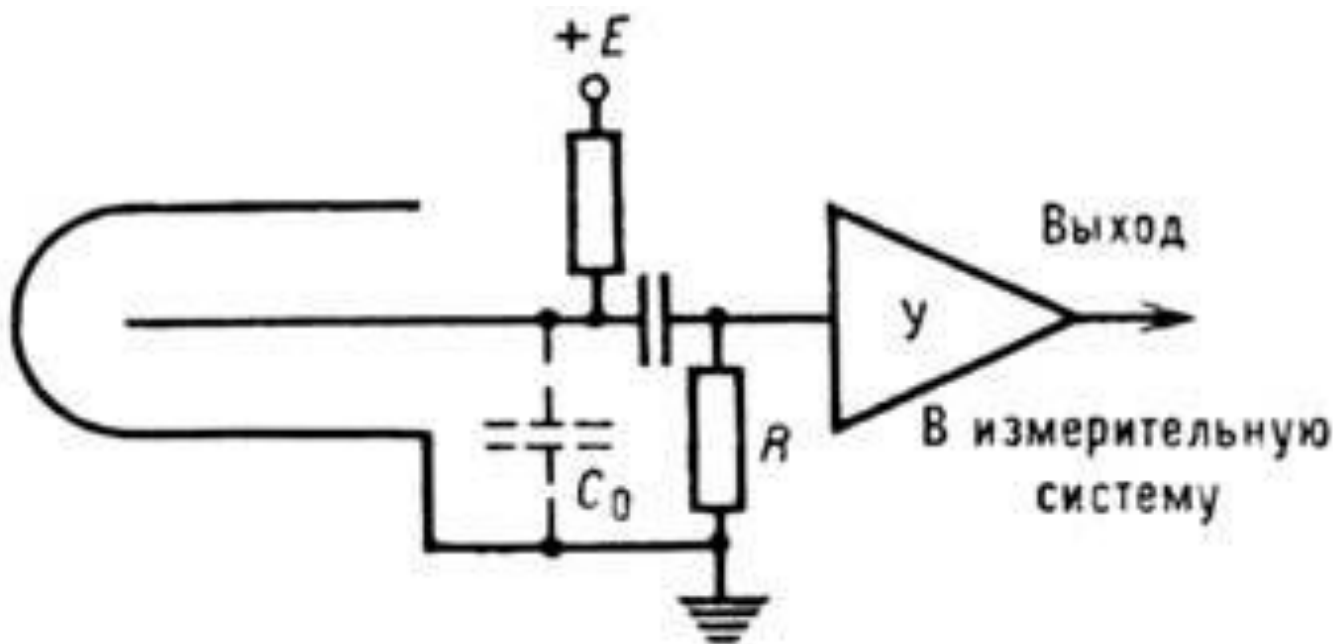


1 – регистрируемая частица,
2 – входное окно,
G – гальванометр,
U – разность потенциалов.

Зарегистрированный **суммарный заряд** пропорционален **энергии частицы**

$$e \frac{E_0}{E_i} \quad (7.2)$$

RC-цепь на выходе ионизационной камеры формирует **импульс** тока, который затем усиливается и подается на пересчетный прибор или на амплитудный анализатор.



Ионизационные камеры используются для **регистрации** и **спектрометрии** **тяжелых заряженных частиц**.

Газовый пропорциональный детектор

Катод цилиндрической формы. **Анод** – нить, натянутая по оси цилиндра.

Детектор представляет собой **цилиндрический конденсатор**.

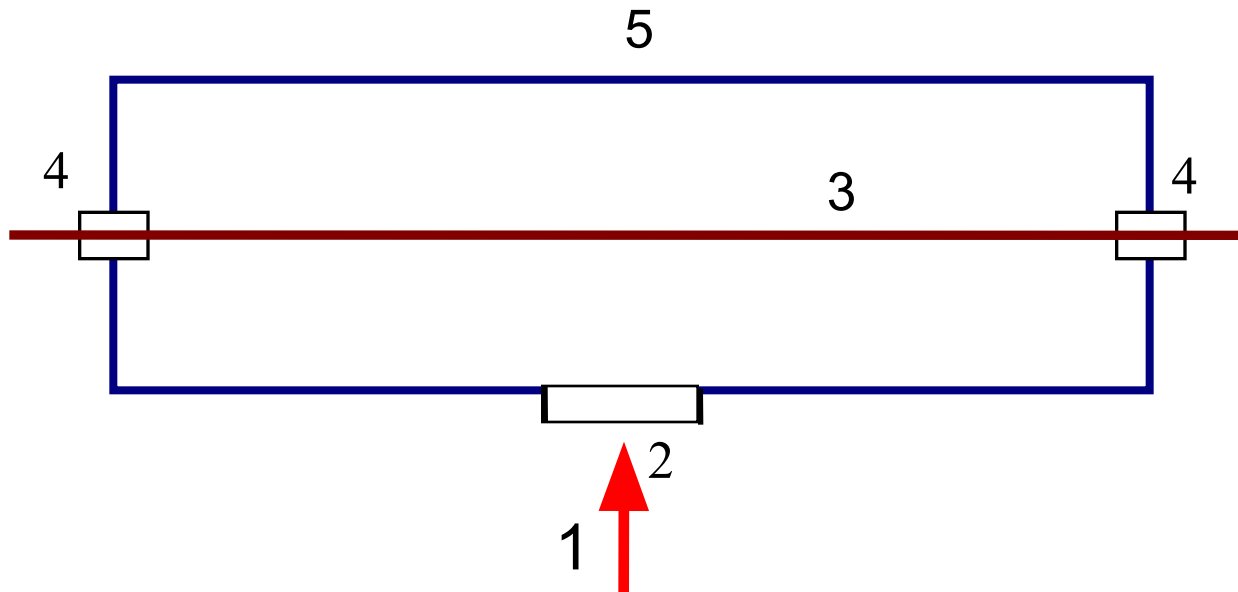


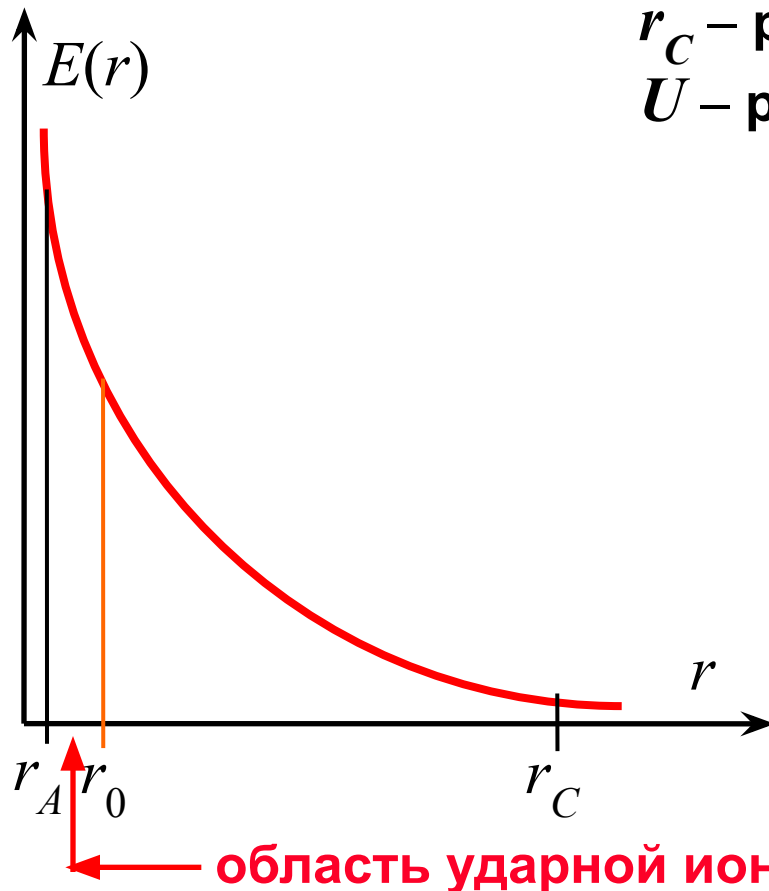
Схема газового пропорционального детектора

1 – регистрируемая частица, 2 – входное окно, 3 – анодная нить, 4 – изоляторы, 5 – катод.

Электрическое поле цилиндрического конденсатора

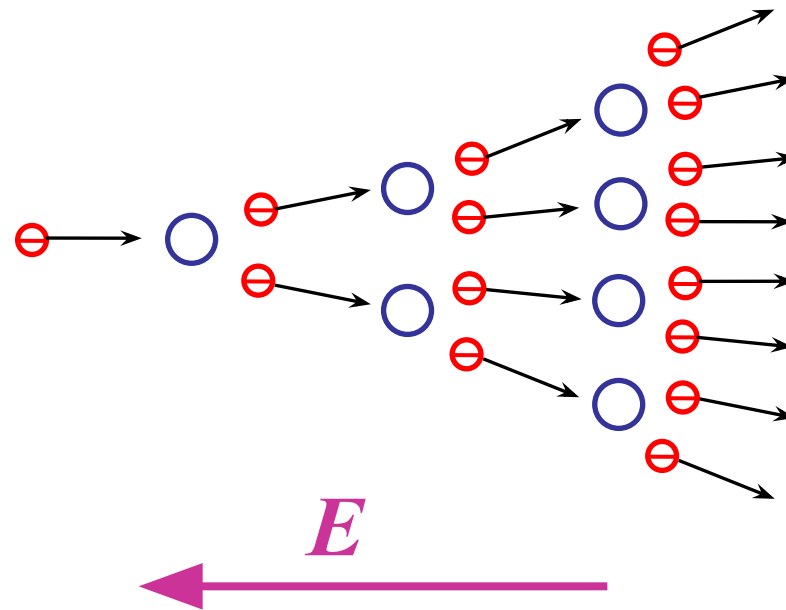
$$E(r) = \frac{U}{\ln(r_C / r_A)} \frac{1}{r} \quad (7.3)$$

r_C – радиус катода, r_A – радиус анода,
 U – разность потенциалов



В области $r < r_0$ поле
столь велико, что на
длине свободного
пробега электрон
ионизует атомы газа.

Развитие электронной лавины



Подвижность ионов на 3 порядка ниже, чем электронов

Коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации: отношение числа достигших анода электронов N_e к числу первичных электронов N_{0e} .

$$C_{ip} = \exp \left[\int_{r_A}^{r_0} \alpha_e(r) dr \right] \quad (7.4)$$

α_e – **коэффициент ударной ионизации** равен количеству актов ионизации на единице пути электрона.

В пропорциональных газонаполненных детекторах коэффициент C_{ip} составляет **несколько сотен**.

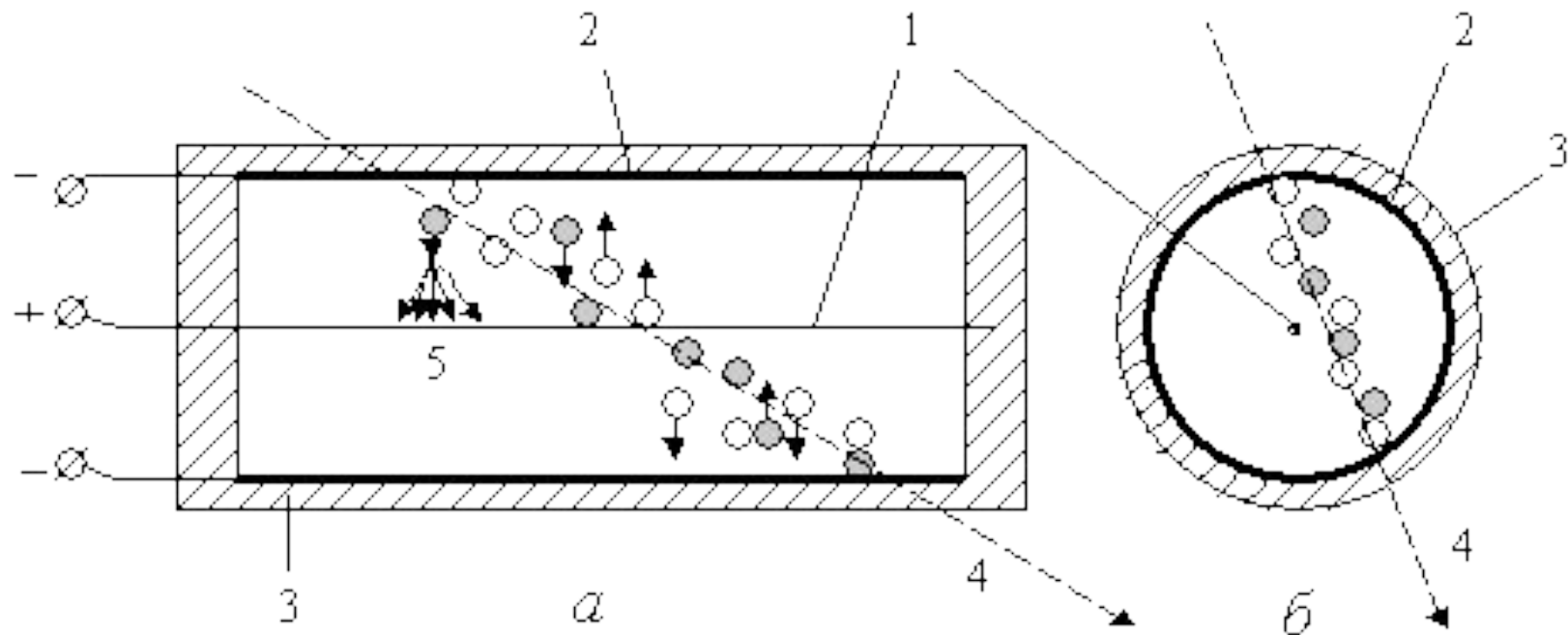


Схема пропорционального счётчика в продольном (а) и поперечном (б) разрезах.

1 - нить-анод, 2 - цилиндрический катод, 3 - изолятор, 4 - траектория заряженной частицы, 5 - электронная лавина.

Схема подключения газового пропорционального счетчика



Газовые пропорциональные счетчики служат для регистрации и спектрометрии **гамма-излучения**

Счетчик Гейгера-Мюллера



Схема стеклянного счётчика Гейгера — Мюллера:

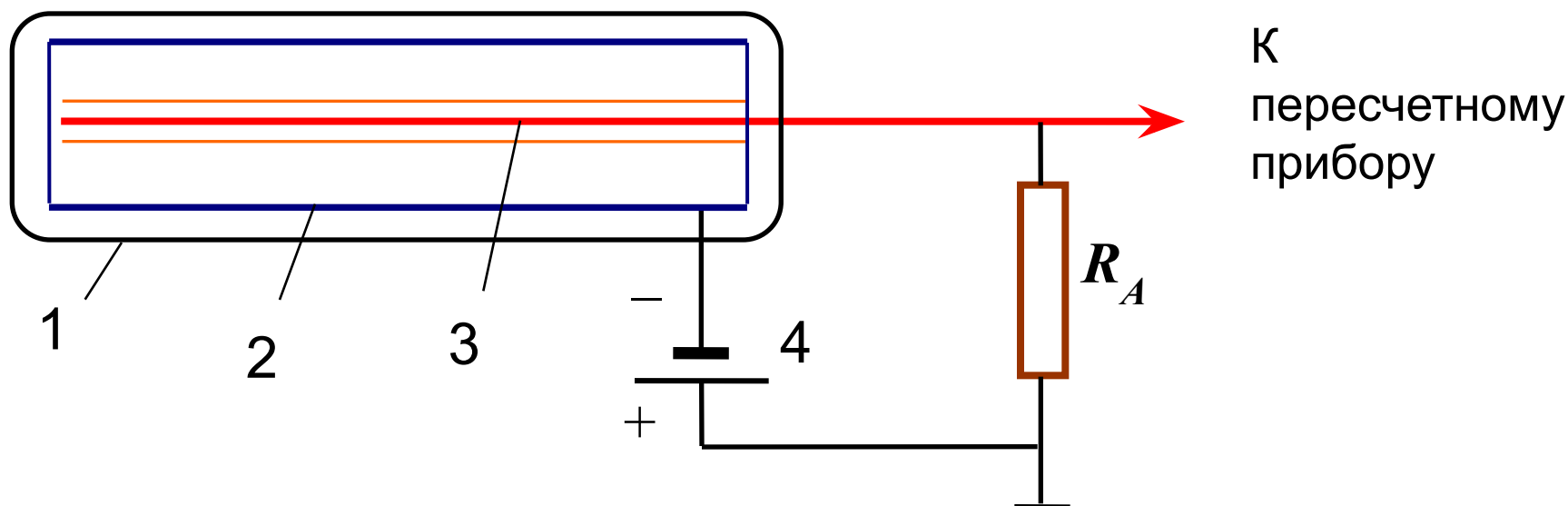
1 — герметически запаянная стеклянная трубка;

2 — катод (тонкий слой металла на внутренней поверхности трубки);

3 — вывод катода; 4 — анод (тонкая нить).

Предназначен для регистрации гамма-излучения

Принципиальное устройство счетчика Гейгера-Мюллера



1 – герметичный кожух, заполненный рабочим газом,

2 – цилиндрический катод, 3 – анодная нить,

4 – источник высокого напряжения,

R_A – анодное сопротивление.

Штрих-пунктирной линией выделена область ударной ионизации.

Регистрируемая частица создает в газе N_{0e} электронно-ионных пар. Они дрейфуют под действием электрического поля. В области ударной ионизации развиваются электронные лавины, каждая из которых создает S_{ip} электронно-ионных пар.

При развитии лавин образуется множество возбужденных атомов, которые через некоторое время испускают фотоны, вызывающие на катоде фотоэффект. Фотоэлектроны создают вторичные электронные лавины.

Кроме того, положительные ионы дрейфуют к катоду со скоростью много меньше дрейфовой скорости электронов. Достигнув катода, ионы рекомбинируют с электронами проводимости. Высвобождающаяся при этом энергия может пойти на вырывание еще одного электрона из поверхности металла катода. Такие электроны также порождают вторичные электронные лавины.

C_{SI} – коэффициент поверхностной ионизации, равный отношению числа вырванных из катода электронов к числу достигнувших катода положительных ионов.

Для металлов катода детектора $C_{SI} \sim 10^{-4}$.

Полное пар частиц, образованных в объеме детектора, выразится суммой геометрической прогрессии:

$$N_e = C_{ip} N_{0e} + C_{SI} C_{ip}^2 N_{0e} + C_{SI}^2 C_{ip}^3 N_{0e} + \dots$$

Так как произведение $C_{SI} C_{ip} < 1$, сумма равна

$$N_e = N_{0e} \frac{C_{ip}}{1 - C_{SI} C_{ip}} \quad (7.5)$$

Коэффициент полного газового усиления

$$C_{amp} = \frac{C_{ip}}{1 - C_{SI} C_{ip}} \quad (7.6)$$

Высокое анодное напряжение увеличивает коэффициент C_{ip} так, что **произведение $C_{SI} C_{ip}$ становится близким к единице.**

В газе детектора начинается **самоподдерживающийся электрический разряд.**

На анодном сопротивлении формируется столь сильный сигнал, что он может быть зарегистрирован без предварительного усиления.

При этом нарушается пропорциональность амплитуды сигнала и энергии регистрируемой частицы.

Обрыв электрического разряда происходит из-за наличия в объеме счетчика **гасящего газа** (например, паров **этанола**).

При высвечивании возбужденных атомов основного газа образующиеся фотоны поглощаются молекулами **гасящего газа**, что вызывает их **диссоциацию**. Фотоэффект на катоде не происходит, вторичные лавины не образуются.

Накопление **положительных ионов** вблизи анода приводит к уменьшению **напряженности электрического поля** в прианодном объеме, что нарушает условия **ударной ионизации**. В результате самостоятельный разряд в счетчике *прекращается*.

После рассасывания облака **положительных ионов** в прианодном объеме счетчик вновь готов к регистрации частиц высокой энергии.

Торцевой счетчик Гейгера-Мюллера

Предназначен для регистрации бета-частиц. Входное окно закрыто тонкой пластиковой пленкой.



МСТ-17

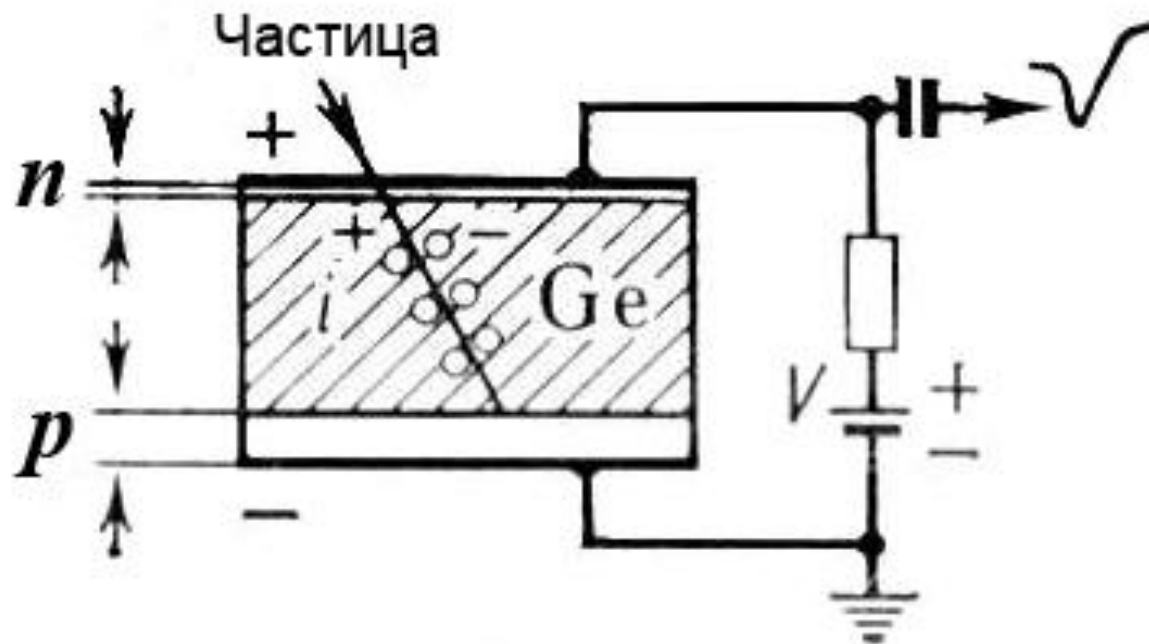
Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение ($\sim 10^2$ В).

Слой вблизи границы **p-n-перехода** обеднён носителями тока и обладает высоким удельным электросопротивлением.

Заряженная частица, проникая в него, создаёт дополнительные электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля дрейфуют к соответствующим электродам.

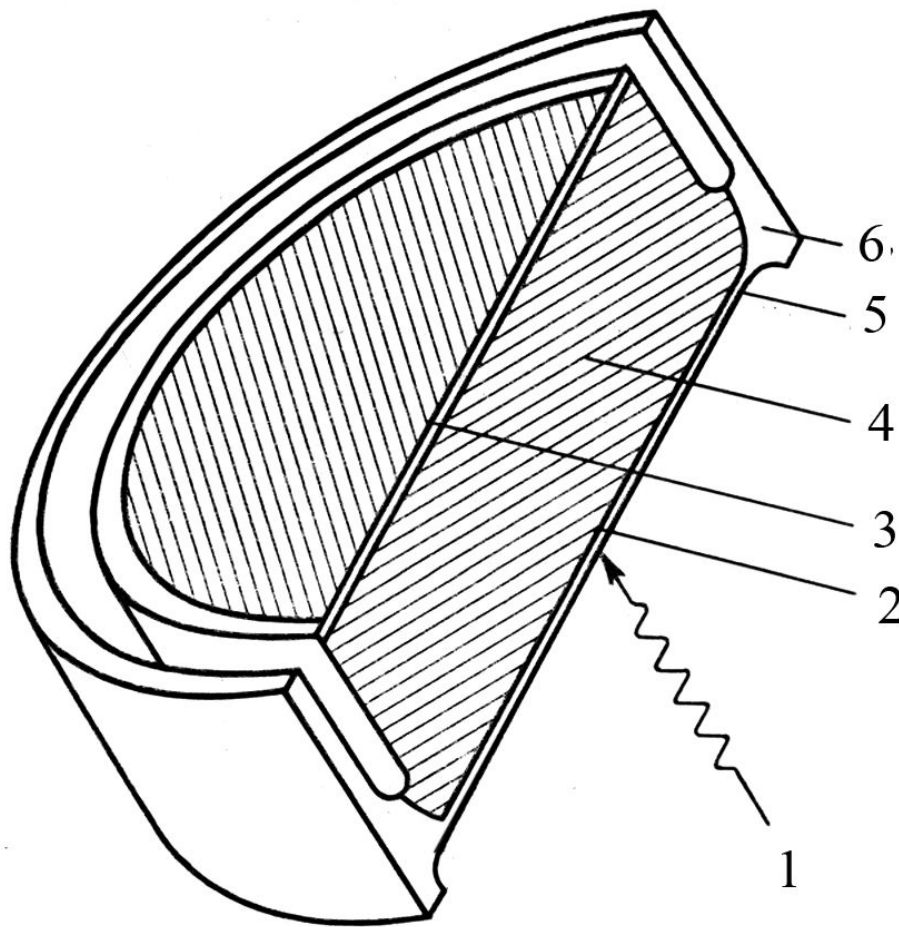
Во внешней цепи возникает электрический **импульс**, который далее **усиливается** и **регистрируется**.



Средняя энергия, необходимая для образования электронно-дырочной пары равна 3,8 эВ (Si), 2,9 эВ (Ge).

Заряд, собранный на электродах, пропорционален **энергии**, отданный частицей при прохождении через область **p-n-перехода**.

Схема конструкции Si(Li) детектора



1 – поток гамма-лучей,
2 – область p -типа,
3 – область n -типа,
4 – область,
скомпенсированная
литием,
5 – золотой
поверхностный барьер,
6 – исходный кристалл
кремния p -типа.

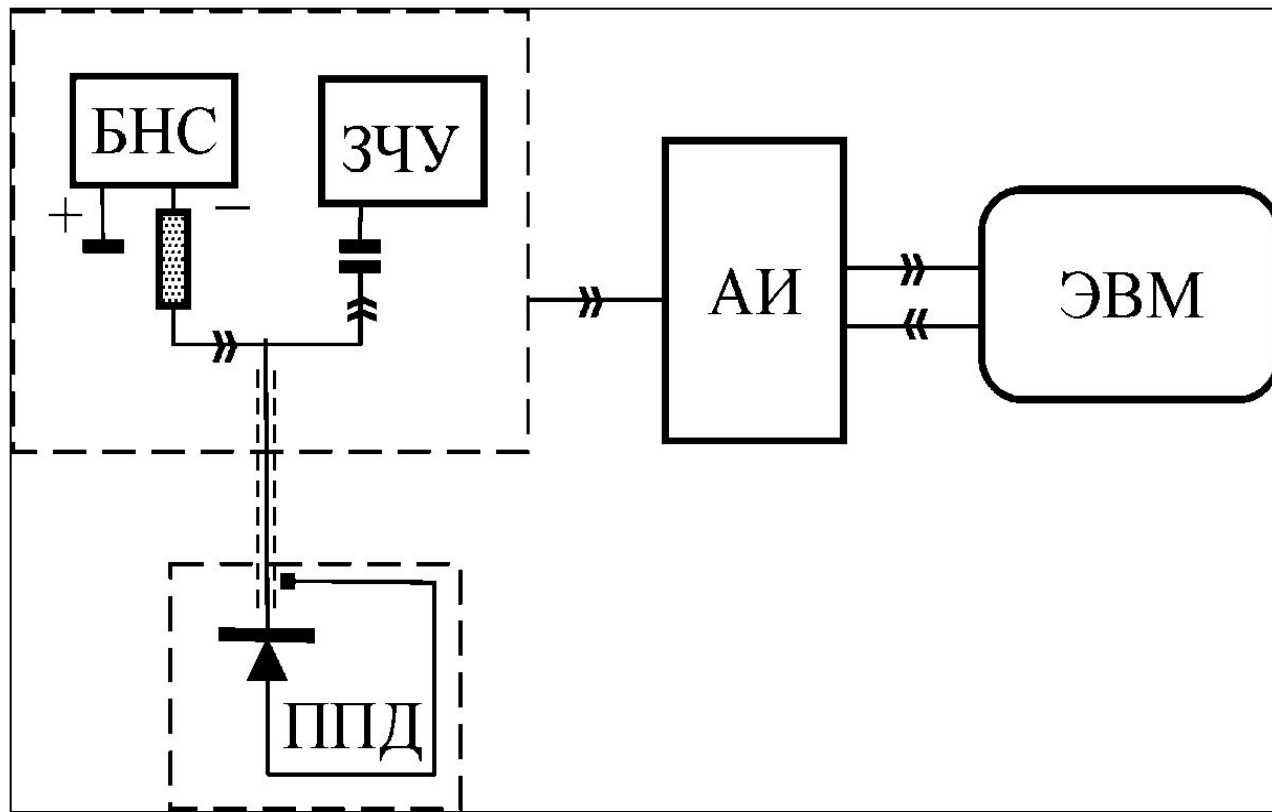
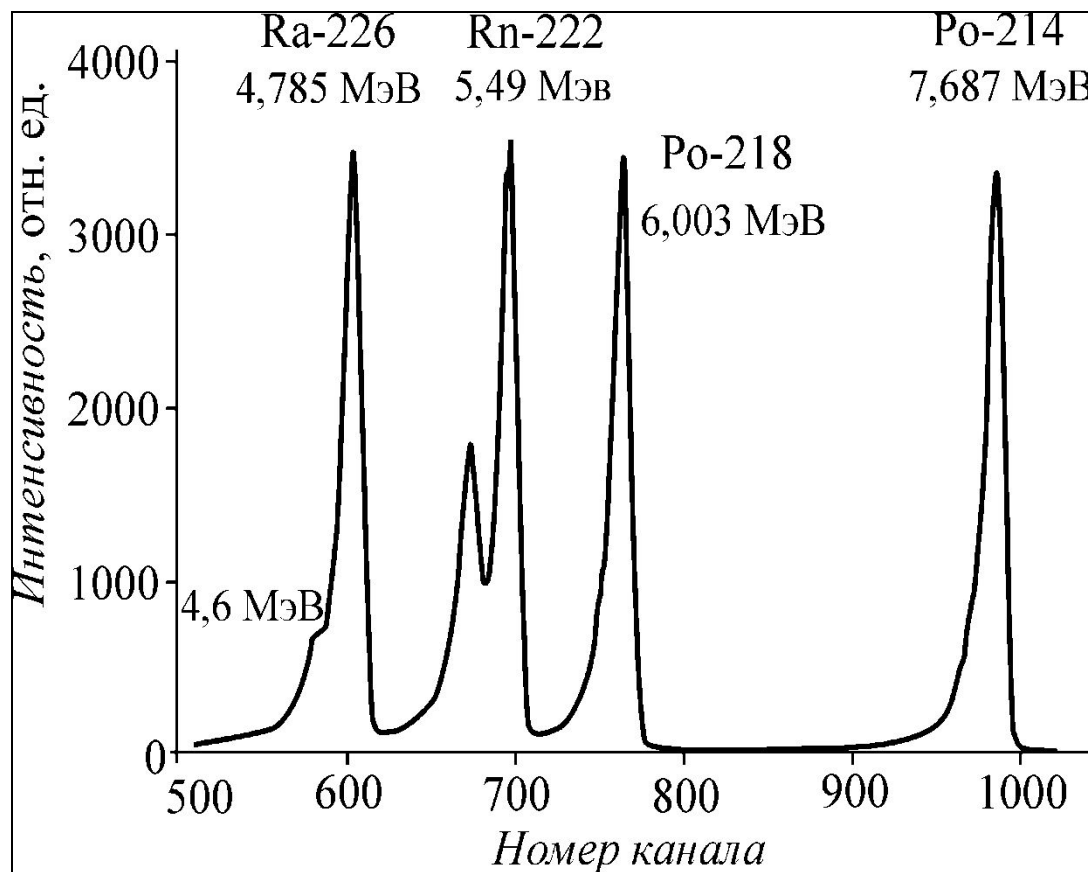


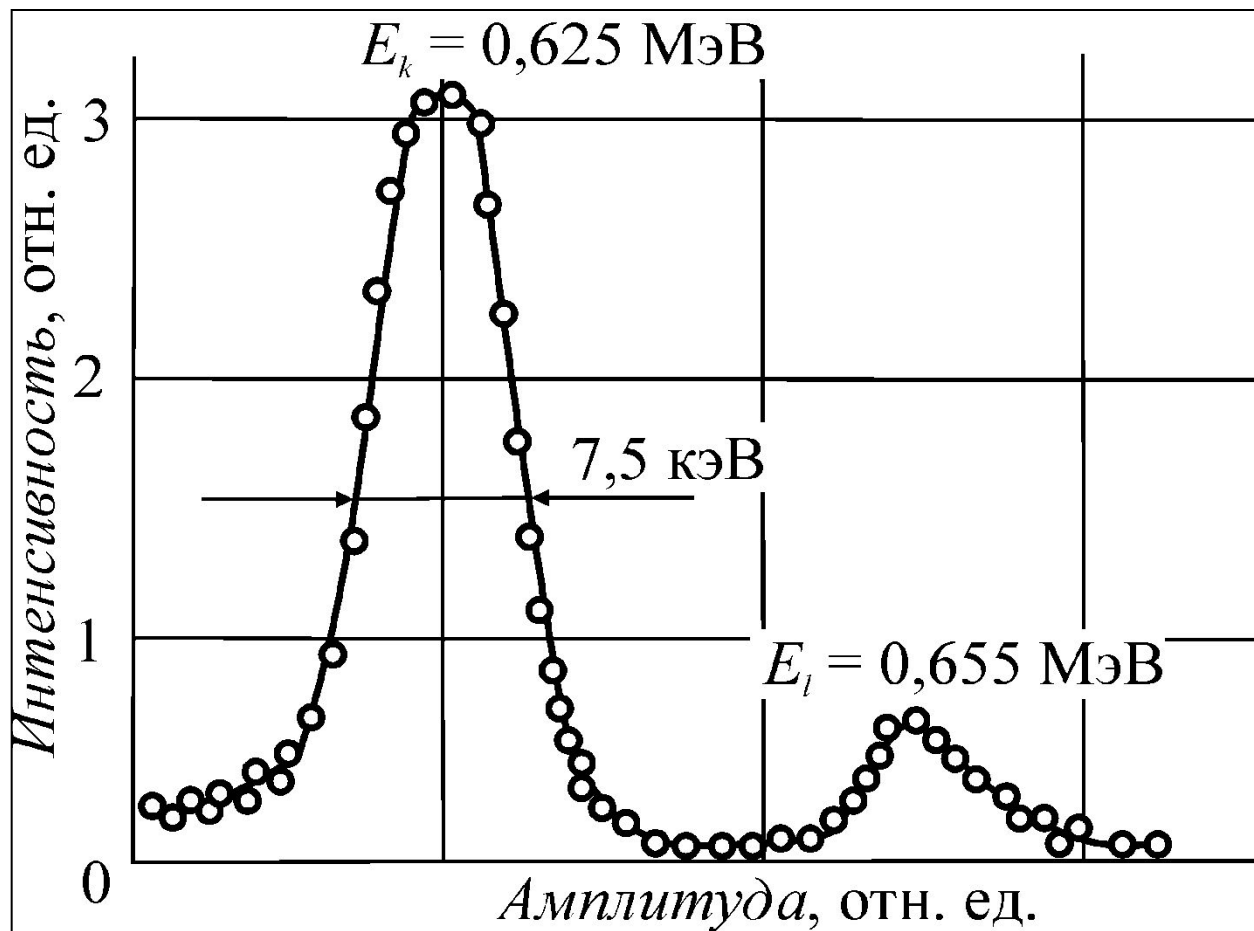
Схема полупроводникового спектрометра.

ППД — блок полупроводникового детектора;
БНС — блок питания детектора ;
ЗЧУ — зарядочувствительный усилитель;
АИ — амплитудный анализатор импульсов.

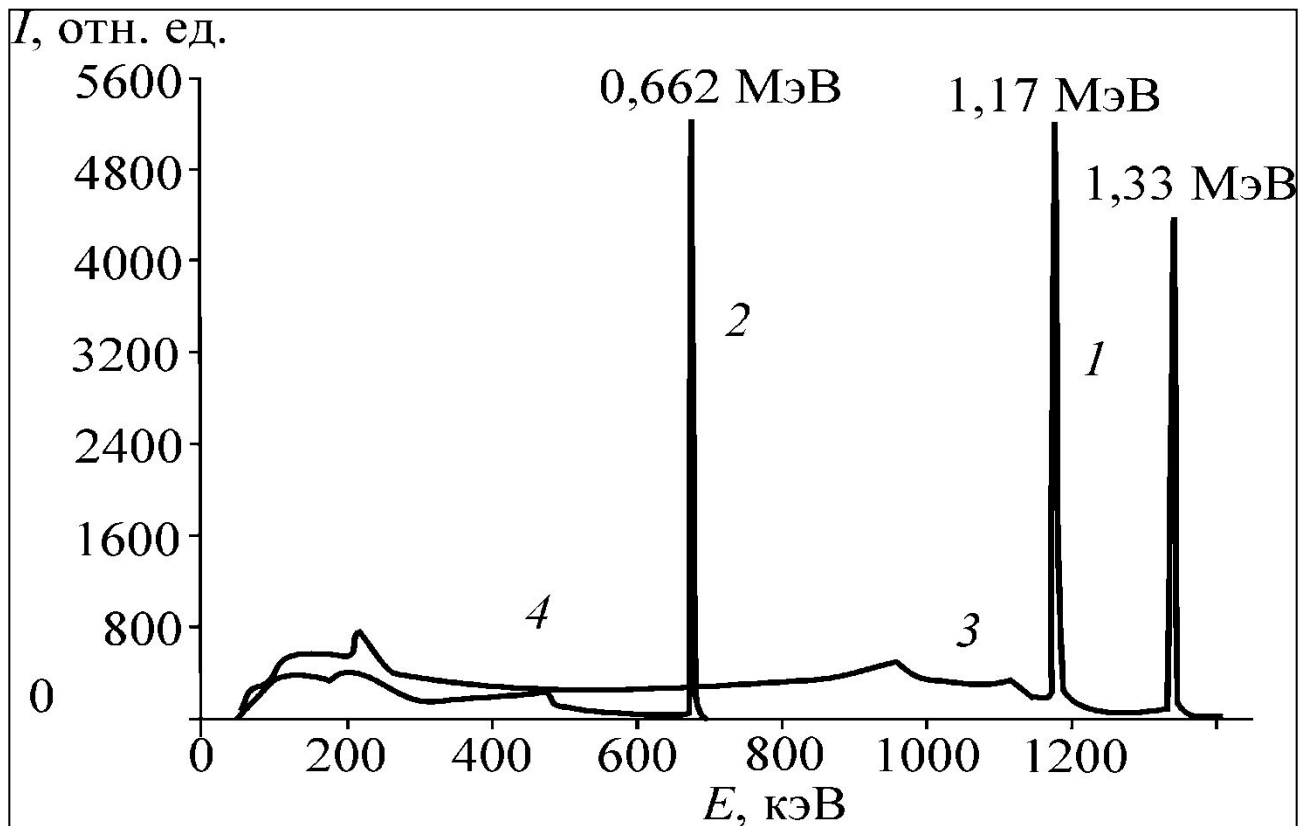


Аппаратурный α -спектр изотопа ^{226}Ra и его α -активных дочерних продуктов.

Энергетическое разрешение 48 кэВ



Спектр электронов внутренней конверсии источника ^{137}Cs



Спектр гамма-фотонов изотопов ^{60}Co и ^{137}Cs

1 — пики полного поглощения ^{60}Co ;

2 — пик полного поглощения ^{137}Cs ;

3 — границы распределения комптоновских электронов ^{60}Co ;

4 — граница распределения комптоновских электронов ^{137}Cs .

Сцинтилляционный метод

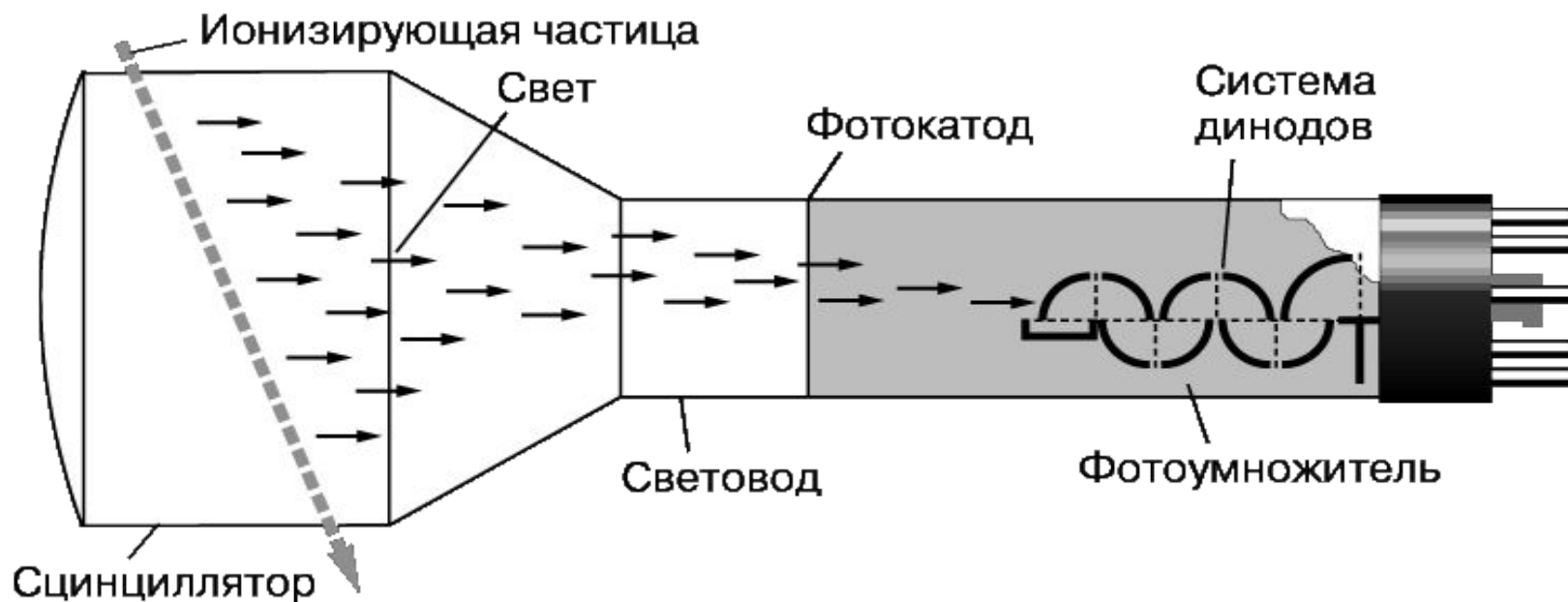
При прохождении частицы высокой энергии через вещество приблизительно половина её энергии тратится на возбуждение атомов. Через характерное время **T** атомы испускают фотоны, которые регистрируются.

Материал, в котором частица высокой энергии формирует световую вспышку, называется **сцинтиллятор**.

Фотоны, выйдя из сцинтиллятора, попадают на **фотокатод**, где поглощаются и вызывают фотоэффект.

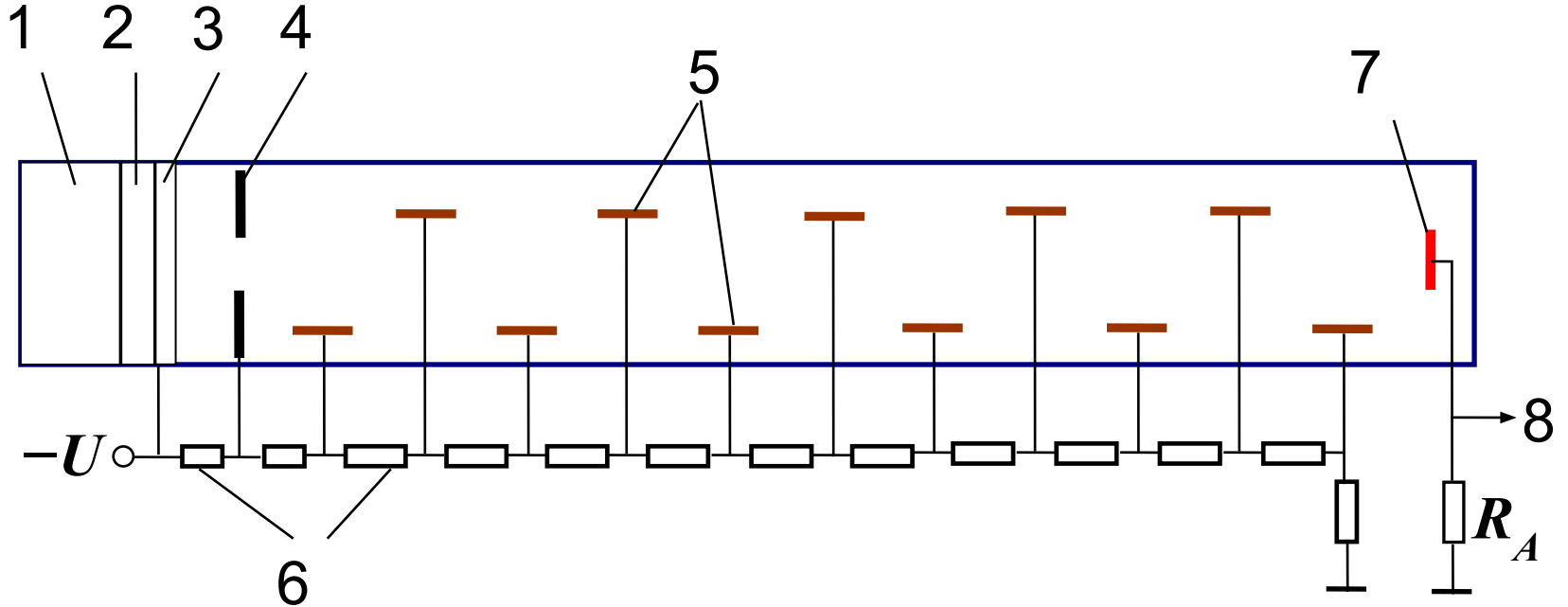
Образовавшиеся **фотоэлектроны** с помощью электрического поля направляются в **фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)**.

Схема соединения сцинтиллятора с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ)



Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) содержит систему электродов: **фотокатод, диноды, анод.**

Схема сцинтилляционного детектора



1 – кристалл-сцинтиллятор, 2 – световод, 3 – фотокатод, 4 – фокусирующий электрод, 5 – диноды, 6 – делители напряжения, 7 – анод, 8 – выходной сигнал.

Элементы 3 – 7 составляют **фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)**.

Световыход – количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определённого количества энергии.

Световыход может равняться 50 – 70 тыс. фотонов на МэВ.

Квенчинг-фактор – отношение световыхода данного типа частиц к световыходу гамма-квантов с равной энергией.

Квенчинг-фактор электронов близок к единице.

Квенчинг-фактор альфа-частиц для многих сцинтилляторов близок к **0,1**.

Неорганические сцинтилляторы

Вещество	Время высвечивания, мкс	Максимум спектра, нм	Относительный световыход
NaI(Tl)	0,25	410	2,0
CsI(Tl)	0,5	560	0,6
LiI(Sn)	1,2	450	0,2
ZnS(Ag)	1,0	450	2,0
CdS(Ag)	1,0	760	2,0



**Кристалл NaI(Tl) размером 40×40 мм
в алюминиевом кожухе со
стеклянным окном**

Органические сцинтилляторы

Вещество	Время высвечивания, нс	Максимум спектра, нм	Относительный световыход
Нафталин	96	348	0,12
Антрацен	30	440	0,5
Р-терфенил	5	440	0,25

Вещество растворяется в ксилоле, толуоле, полистироле, ...

В раствор добавляется сместитель спектра для сдвига максимума из УФ-диапазона в видимый.

Газовые сцинтилляторы

Вещество: инертные газы и их смеси.

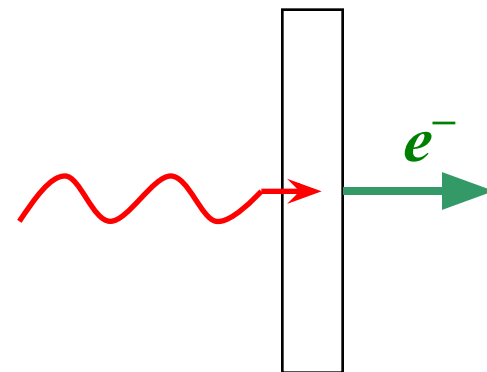
Время высвечивания: $\sim 10^{-8}$ сек.

Применение: регистрация короткопробежных тяжелых заряженных частиц.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

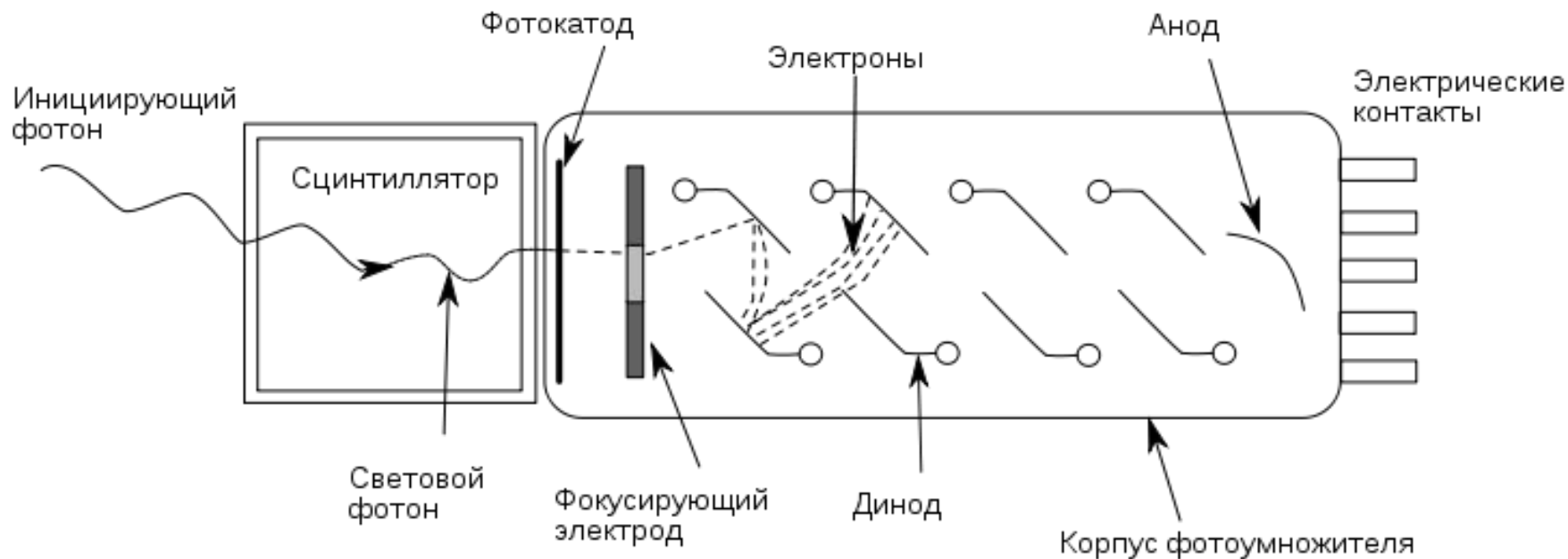
ФЭУ – вакуумный прибор, на входе которого находится прозрачный фотокатод.

Фотоны из сцинтиллятора попадают на **фотокатод** и вызывают **фотоэффект**.



Материал фотокатода: **интерметаллические соединения щелочного металла с сурьмой** (например, **SbCs₃**).

Квантовый выход: число фотоэлектронов, испущенных фотокатодом при поглощении одного фотона (может достигать 25%).

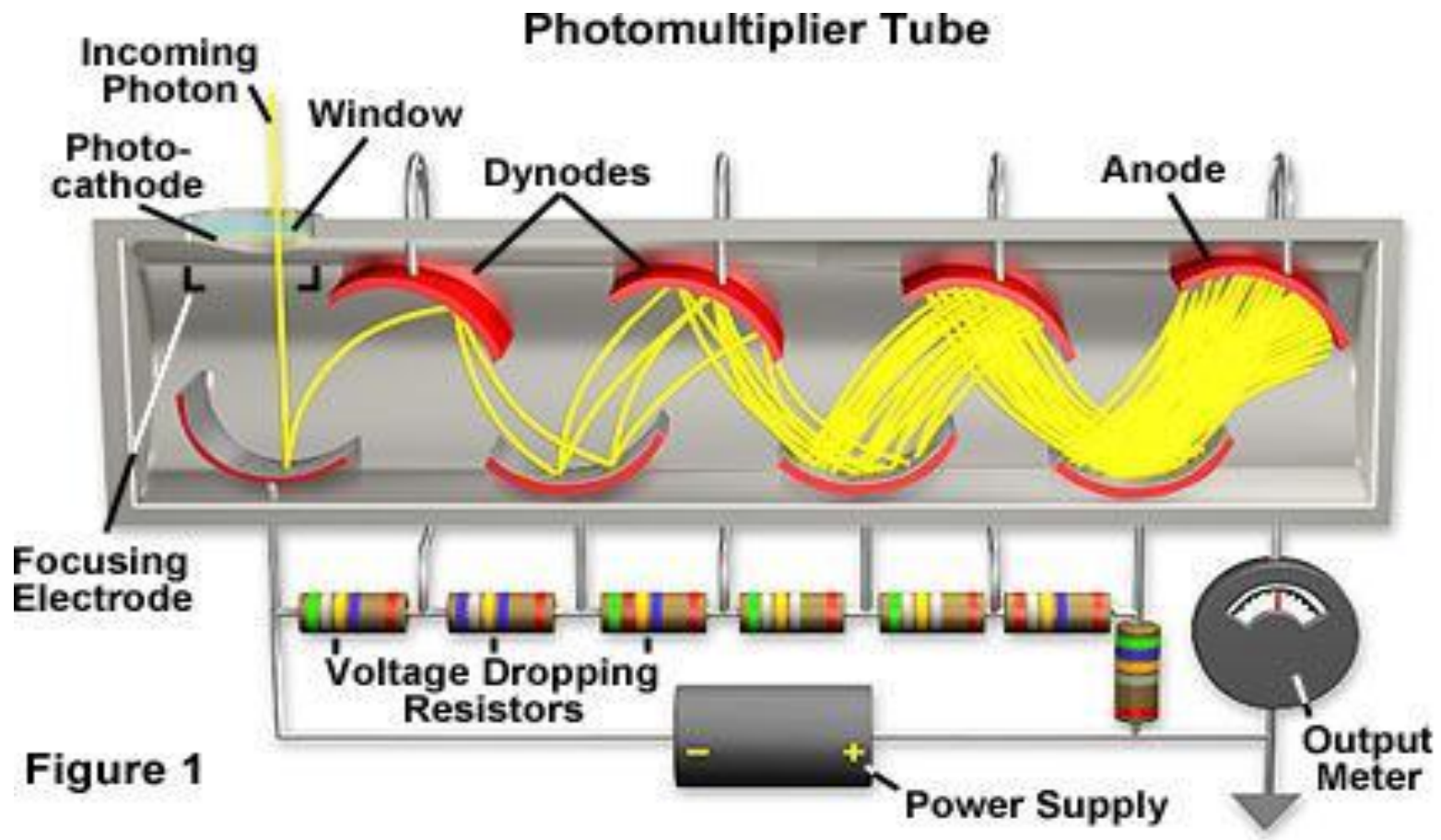


В ФЭУ электроны под действием электрического поля фокусируются и направляются на 1-й динод.

Поверхность динода покрыта металлическим сплавом с большим коэффициентом **вторичной эмиссии** $\sigma = 2 \div 4$.

Затем поток электронов направляется на следующий динод и т.д.

Коэффициент усиления ФЭУ равен σ^n , где n – число динодов.



Сигнал снимается с анода или последнего динода

Черенковские детекторы

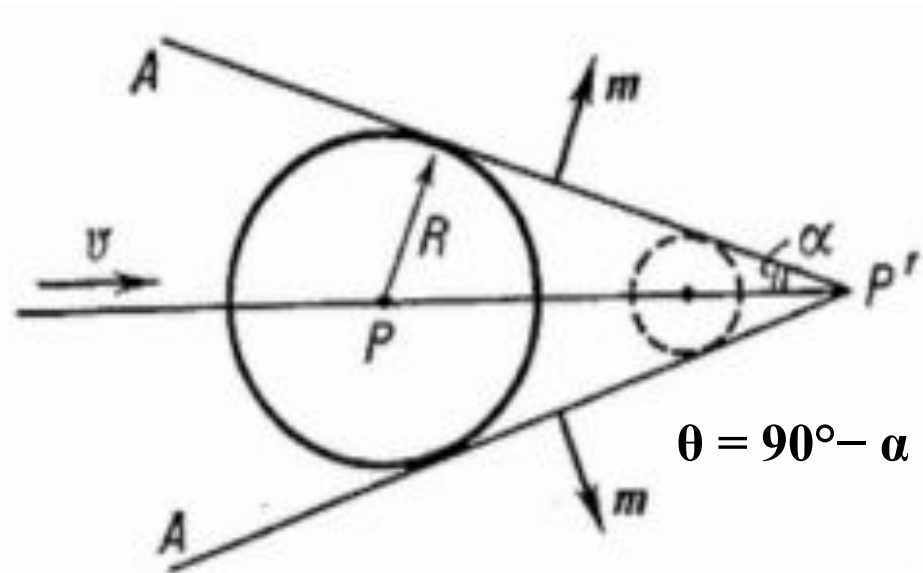
Работа основана на регистрации **излучения Черенкова - Вавилова**, возникающего при движении частицы в среде со скоростью v превышающей скорость распространения света в этой среде

$$v > c/n$$

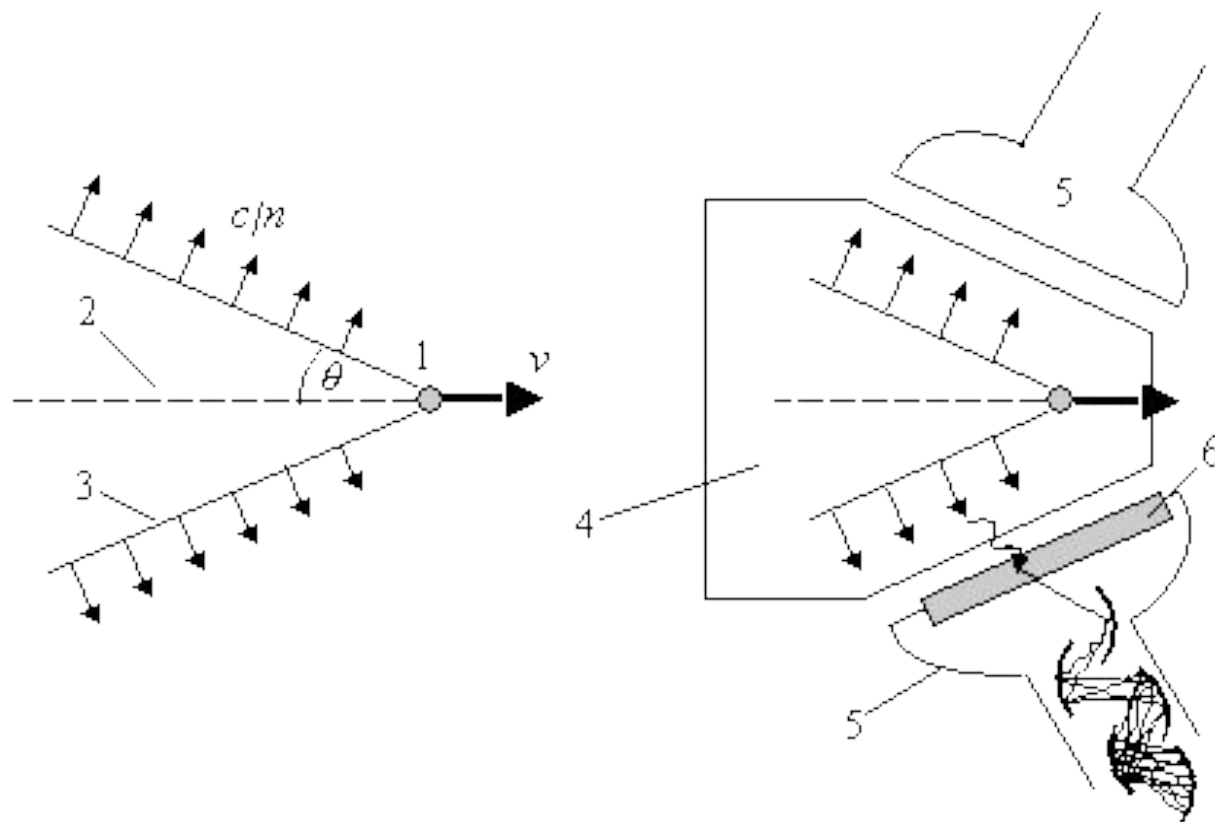
где n – показатель преломления среды.

Излучение направлено вперёд под углом θ относительно скорости частицы

$$\cos(\theta) = c/v/n$$



Световое излучение регистрируется с помощью фотоумножителя.



Слева – конус черенковского излучения, справа – устройство счётчика.

1 - частица, 2 - траектория частицы, 3 - фронт волны,
4 - радиатор, 5 - ФЭУ, 6 - фотокатод.

Число фотонов, излучаемых на 1 см пути, в зависимости от среды варьирует от нескольких единиц до нескольких сотен.

Измерение угла θ позволяет вычислить найти скорость и энергию частицы.

Черенковский счетчик позволяет эффективно выделять релятивистские частицы на уровне большого фона частиц меньшей энергии.

Разрешающее время черенковских счетчиков не превосходит 10^{-9} с.

Регистрация частиц с энергиями вплоть до 100 ГэВ.

Трековые детекторы

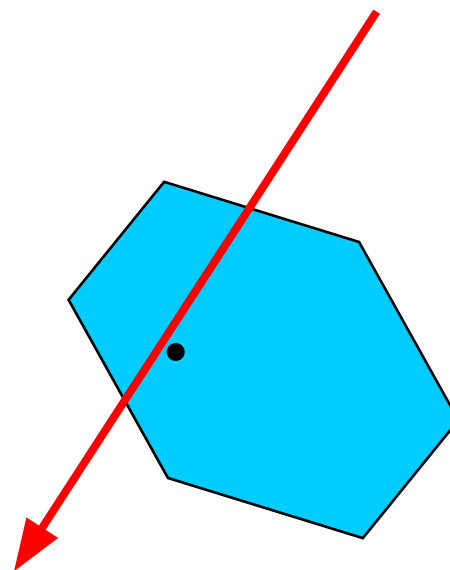
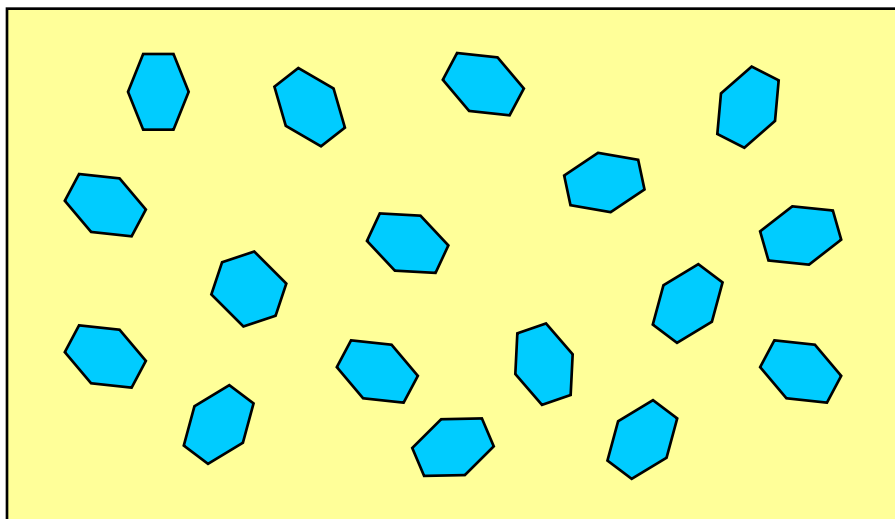
Детекторы, позволяющие визуализировать траекторию частицы высокой энергии, тормозящейся в веществе.

Работа трековых детекторов базируется на ионизации и возбуждении атомов и молекул вещества.

Ядерные фотоэмульсии

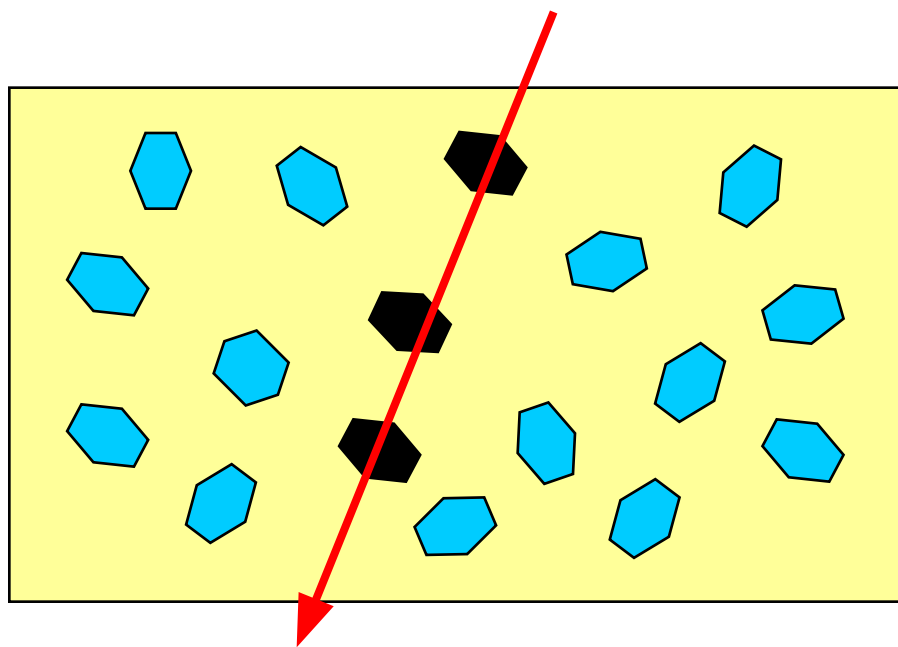
Твердая эмульсия содержит микрокристаллы **галогенида серебра** (например, **AgBr**).

При прохождении частицы через кристалл галогенида разрушаются химические связи и образуются нейтральные атомы **серебра**.

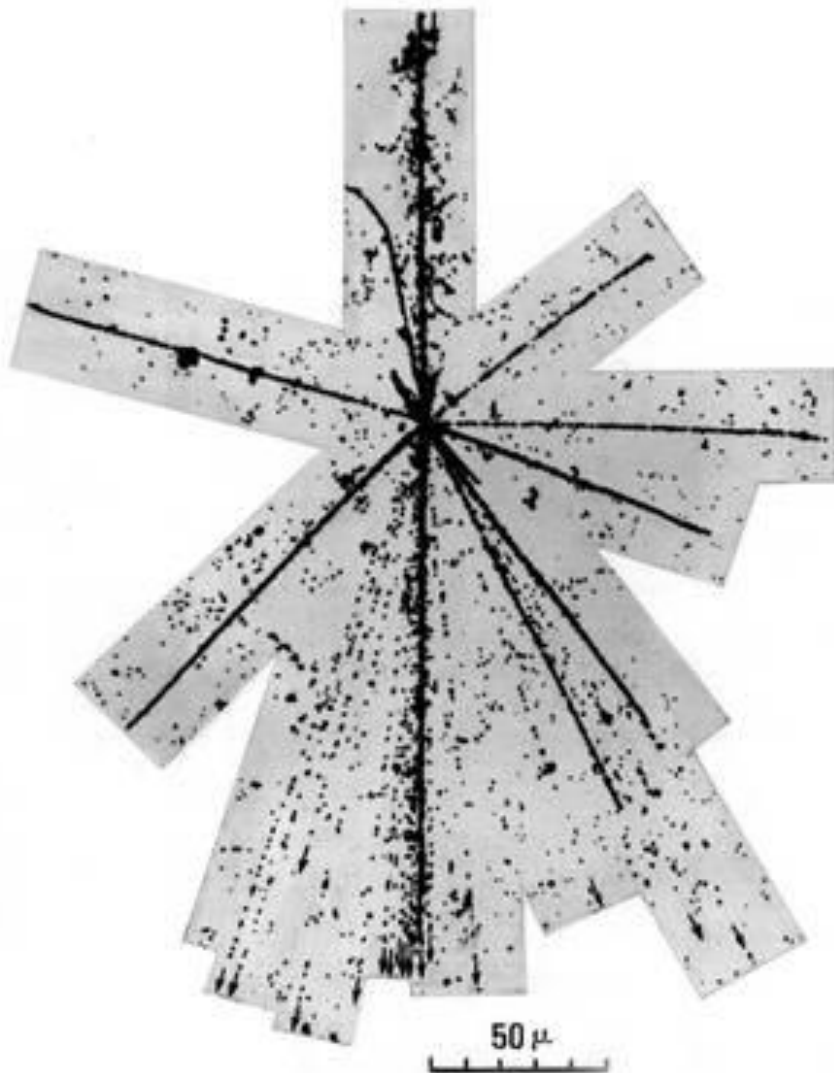


Последующая обработка эмульсии **проявителем** происходит восстановление **серебра** во всем объеме микрокристалла. В прозрачной эмульсии появляется **черное пятнышко**, видимое глазом.

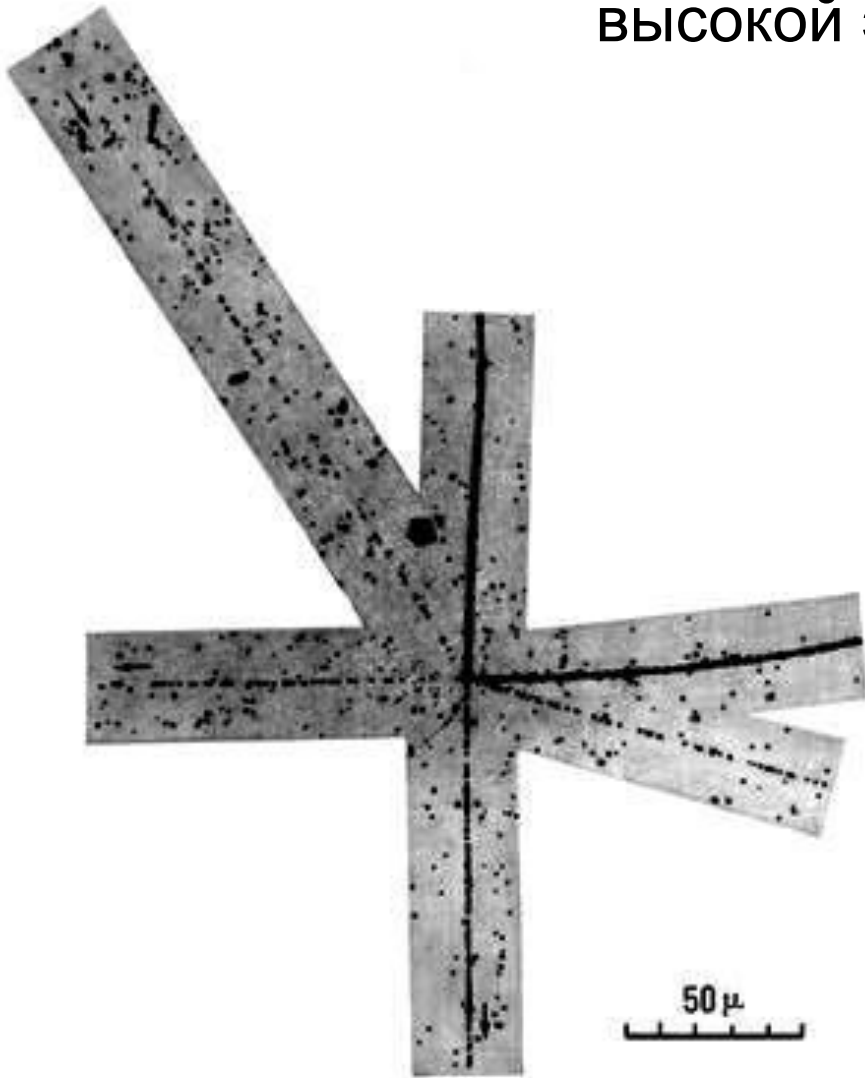
Тот же процесс происходит во всех микрокристаллах, через которые прошла регистрируемая частица. На её пути образуется видимый трек



Треки вторичных
частиц, образованных
протоном высокой
энергии из космических
лучей.



Реакции, образованные пи-мезоном высокой энергии



Камера Вильсона

Регистрируемая частица проходит через камеру, наполненную **пересыщенным паром**.

На пути частицы образуются **ионы**, которые становятся **центрами конденсации**.

Возникают мелкие **капельки** жидкости, которые достигают видимых размеров и могут быть сфотографированы.

Энергия вычисляется по **длине пробега**, **импульс** — по **кривизне** следа частиц во внешнем магнитном поле, **знак заряда** определяется по **направлению** отклонения частицы.



Следы в камере Вильсона **электронно-позитронной пары**, образованной **гамма-фотоном** в свинцовой пластине.

Внешнее магнитное поле отклонило частицы, с разным **знаком заряда** в противоположные стороны.

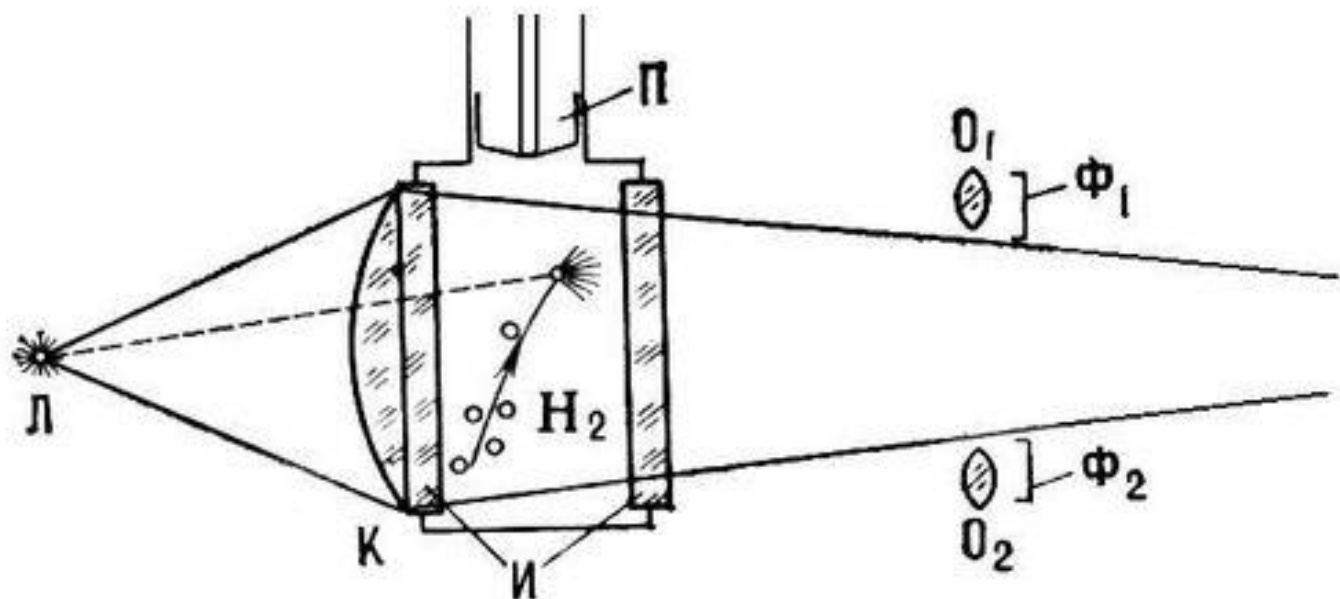
Пузырьковая камера

Регистрируемая частица проходит через камеру, наполненную **перегретой жидкостью**.

Перегрев жидкости достигается быстрым понижением давления.

При прохождении частицы на пути её следования нарушается неустойчивое состояние перегретой жидкости. При этом образуются микроскопические пузырьки газа. Если жидкость получает достаточную энергию (порядка нескольких сотен эВ в объёме радиусом $\sim 10^{-6}$ см за время $\sim 10^{-6}$ сек), то возникают пузырьки сверхкритического радиуса, которые не схлопываются.

Образуются видимые треки частиц, состоящие из пузырьков газа малого радиуса.

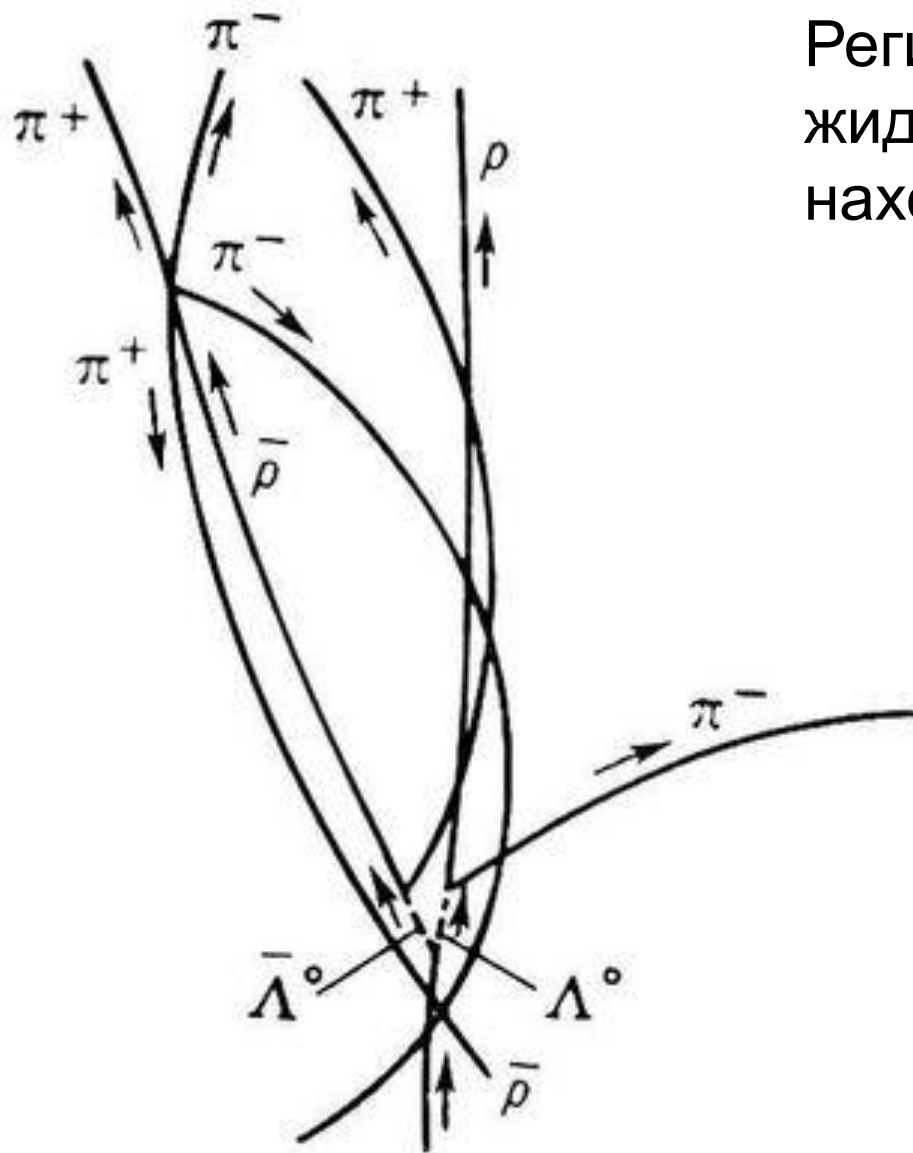


Камера заполнена жидким водородом H_2 ;

Расширение производится с помощью поршня Π ;

Освещение камеры на просвет осуществляется импульсным источником света Л через стеклянные иллюминаторы И и конденсор К ;

Свет, рассеянный пузырьками, фиксируется с помощью фотографических объективов O_1 и O_2 на фотопленках Φ_1 и Φ_2 .



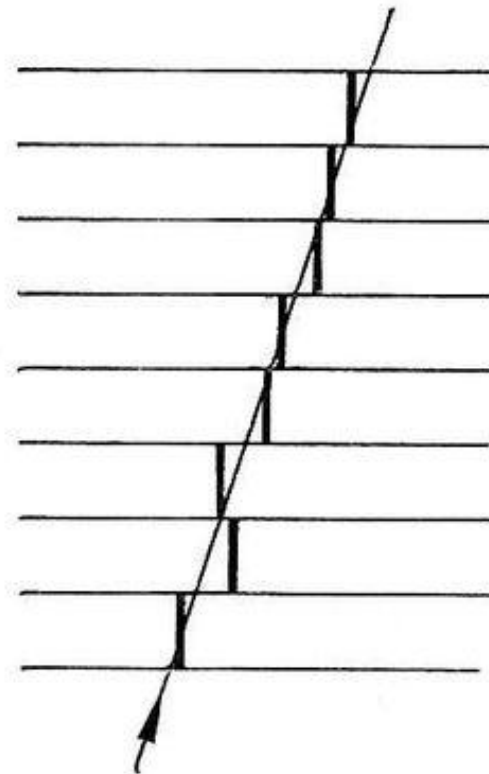
Регистрация ядерной реакции в жидководородной камере, находящейся в магнитном поле.

Антипротон, рожденный при распаде **анти-лямбда-гиперона**, сталкивается с **протоном** и аннигилирует с образованием **пи-мезонов**.

Искровая камера

Искровая камера состоит из множества параллельных электродов (пластин или нитей).

Между электродами создается **большая разность потенциалов**. При прохождении заряженной частицы воздух **ионизуется** и по пути прохождения частицы формируются **электронные лавины**, которые сопровождаются образованием **искровых разрядов**.



Искровые разряды распространяются перпендикулярно электродам.



Цепочка искр формирует изображение траектории регистрируемой частицы.