

## 1. Характеристики детекторів: ефективність, просторовий та часовий розділ, мертвий час та час відновлення.

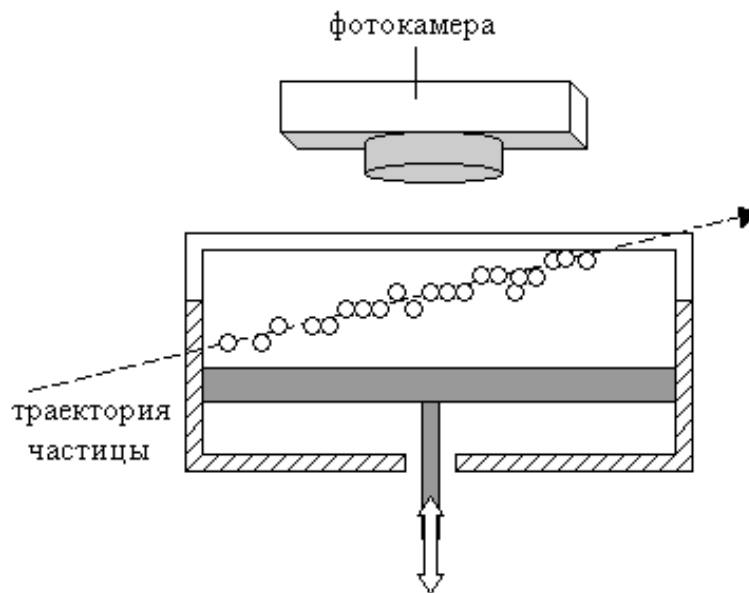
1) Ефективність — отношение числа частиц, зарегистрированных детектором, к общему числу прошедших через него частиц (в долях от единицы или в процентах).

2) Пространственное разрешение — погрешность, с которой детектор может фиксировать положение частицы в пространстве.

3) Временное разрешение (разрешающее время) — минимальный промежуток времени между прохождением двух частиц через детектор, когда сигналы от них еще не накладываются друг на друга. При меньших временах получится наложение сигналов, и две частицы будут регистрироваться детектором как одна частица.

4) Время восстановления (мертвое время) — время, за которое детектор, зарегистрировавший одну частицу, успевает вернуться в исходное состояние, чтобы быть готовым для регистрации следующей частицы. Частицы, прошедшие через детектор за это время, не регистрируются. Время восстановления является мерой инерционности детектора. Оно ограничивает максимальную интенсивность пучка частиц, при которой частицы еще могут регистрироваться детектором.

## 2. Фізичні засади роботи камери Вільсона, дифузійної та бульбашкової камери.



Принцип действия **камеры Вильсона** основан на конденсации пересыщенных паров воды или спирта на ионах, образованных при движении вдоль траектории заряженной частицы. Камера в нужный момент освещается импульсным источником света и фотографируется несколькими фотоаппаратами для получения стереоскопических изображений треков. Природа и свойства частицы устанавливаются по длине ее пробега, толщине трека и его искривлению в магнитном поле. Измеряя кривизну трека в сильном магнитном поле, можно определить импульс частицы и знак ее заряда.

Родственной с камерой Вильсона по принципу действия является **диффузионная** камера. В камере Вильсона пересыщение создается адиабатическим расширением газа (содержащего пары воды или спирта), а в диффузионной камере оно достигается за счет непрерывного потока пара от горячей поверхности у крышки камеры к более холодной поверхности у ее дна. В отличие от камеры Вильсона, в диффузионной камере пересыщение существует постоянно в некотором горизонтальном слое пара, в котором и получают треки ионизирующих частиц. Поэтому диффузионная камера чувствительна к ионизирующим частицам непрерывно.

Важнейшим трековым детектором заряженных частиц является **пузырьковая камера**, изобретенная Глезером в 1954 г. Принцип действия основан на том, что можно получать жидкость с температурой выше точки кипения. Такая перегретая жидкость нестабильна и через короткое время вскипает. Наиболее употребляемыми рабочими жидкостями служат жидкие водород, дейтерий, смесь неона с водородом — в криогенных камерах, а также пропан ( $C_3H_8$ ), фреон и Хе (обычно в смеси с пропаном) — в тяжеложидкостных камерах. Перегревание жидкости производится быстрым понижением давления от начального значения  $P > P_0$  до  $P < P_0$  ( $P_0$  — равновесное давление при температуре  $T$ ). Понижение (снятие) давления достигается либо быстрым перемещением поршня в жидководородных камерах, либо посредством использования упругой мембраны (в пропановой и фреоновой камерах). Давление в камере снимается за 5-15 мс, после чего жидкость оказывается перегретой, т. е. чувствительной к регистрации заряженных частиц. В момент максимальной чувствительности частицы впрыскиваются в камеру. Заряженная частица при прохождении

через перегретую жидкость приводит к образованию центров кипения вдоль своей траектории. Причиной образования таких центров являются вторичные электроны, испускаемые атомами среды при соударении с ними ионизирующей частицы. Эти электроны поглощаются небольшими объемами жидкости, что приводит к нагреванию последних, возникновению зародышей кипения, а в дальнейшем — к образованию и росту пузырьков. За время порядка 0,5-3 мс пузырьки достигают размера 50-300 мкм и при освещении их импульсным источником света могут быть сфотографированы несколькими фотоаппаратами.

### 3. Фізичні засади роботи іонізаційної камери, пропорційного лічильника, та лічильника Гейгера-Мюллера.

**Ионизационная камера** представляет собой электрический конденсатор (плоский, цилиндрический или сферический), заполненный газом, между электродами которого приложена разность потенциалов.

На рисунке приведена схема ионизационной камеры с цилиндрическим конденсатором.

Ионизирующая частица, попадая в пространство между электродами, образует на своем пути электроны и ионы, которые перемещаются в электрическом поле и собираются на электродах.

В цепи камеры появляется электрический ток, регистрируемый гальванометром  $G$ . Напряжение в камере подбирается таким (100-1000 В), чтобы все образовавшиеся ионы доходили до электродов, не успев рекомбинировать, но при этом не разгонялись бы настолько сильно, чтобы производить вторичную ионизацию. Поэтому в камере измеряется полная ионизация, производимая частицей, если только ее пробег целиком уместится в камере.

Полная же ионизация определяет и энергию частицы.

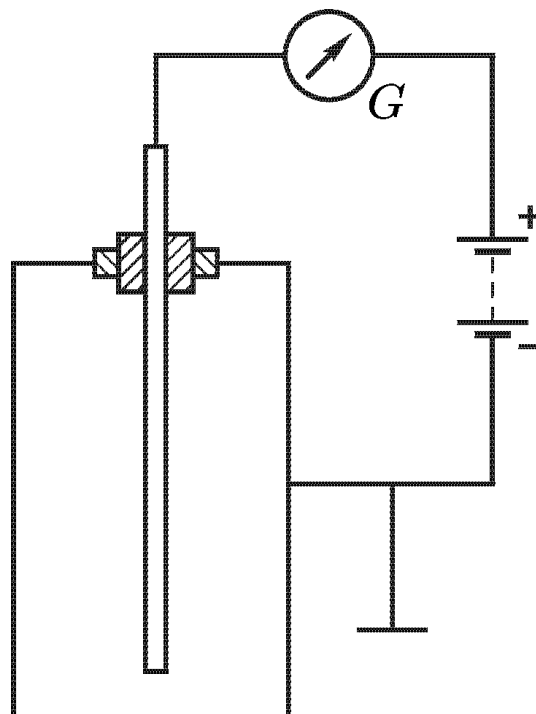
Ионизационные камеры обычных типов пригодны лишь для регистрации короткопробежных частиц, т. е. тяжелых нерелятивистских частиц, так как пробеги электронов и релятивистских частиц в камере не уместаются.

Ионизационные камеры применяются до сих пор, в частности в дозиметрии. Они просты, характеризуются высокой эффективностью регистрации, позволяют оценивать энергию частицы и т. д. Однако амплитуда электрического сигнала в ионизационной камере мала, требует усиления и поэтому делает аппаратуру чувствительной к помехам и шумам.

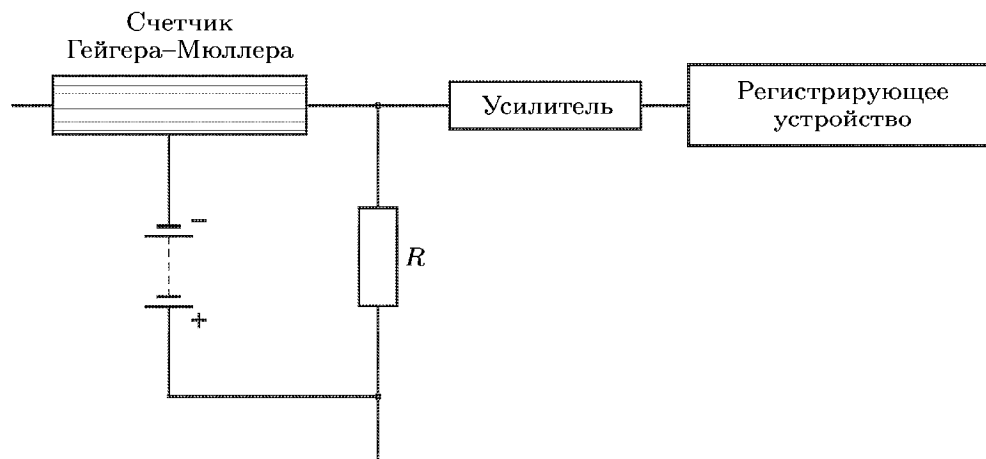
Недостатки ионизационной камеры в значительной степени устранены в **пропорциональном счетчике**. Это разновидность газонаполненного счетчика, в котором обычно используются коаксиальные электроды: катодом служит цилиндр, а анодом тонкая нить (толщиной 10-100 мкм), натянутая по оси цилиндра. Пропорциональный счетчик, как правило, наполняют инертным газом с небольшой примесью многоатомных газов. При попадании в счетчик ионизирующей частицы большая часть образовавшихся электронов дрейфует в электрическом поле к аноду без размножения. Но вблизи анода, на расстояниях, сравнимых с диаметром нити, электрическое поле  $E$  настолько велико, что электроны вызывают вторичную ударную ионизацию — возникает самостоятельный электрический разряд. В результате на анод приходит электронная лавина и в ряде случаев сигнал, порождаемый первичной частицей, получается достаточно сильным, так что для его регистрации не требуется усиления. В этом отношении пропорциональный счетчик отличается от ионизационной камеры. Пропорциональные счетчики обладают практически стопроцентной эффективностью по отношению к заряженным частицам. Эти счетчики дешевы и просты в обращении. Пропорциональные счетчики используются для регистрации всех видов частиц:  $\alpha$ -частиц, электронов, осколков деления, атомных ядер и пр., а также всех сильно взаимодействующих нейтральных частиц (по порождаемым ими заряженным частицам).

Главным недостатком пропорциональных счетчиков является сильная зависимость амплитуды импульса от состава газовой смеси и приложенного напряжения, а также недостаточно высокое временное разрешение (порядка  $10^{-7}$  с).

Если повышать напряжение на электродах пропорционального счетчика, то, начиная с некоторого напряжения, импульс становится не зависящим от энергии первичной частицы, так как прибор начинает работать в режиме самостоятельного разряда, но этот импульс возрастает с повышением напряжения. Такая область напряжений называется областью Гейгера. Прибор, работающий в указанном режиме, носит общее



название счетчика Гейгера. В сущности, он представляет собой газоразрядный промежуток с сильно неоднородным полем. В первоначальных вариантах счетчика, разработанных самим Гейгером, сильно неоднородное электрическое поле возникало вблизи металлического острия, служившего анодом. В более поздних вариантах, предложенных совместно с Мюллером, анод был заменен тонкой проволокой, натянутой вдоль оси цилиндрического конденсатора. В этой конструкции прибор называют счетчиком Гейгера-Мюллера. В счетчике **Гейгера—Мюллера** электроды заключены в герметический резервуар, наполненный газом при давлении 100—200 мм рт. ст. К электродам прикладывается напряжение в несколько сотен вольт.



При попадании в счетчик ионизирующей частицы в газе возникают свободные электроны, которые начинают двигаться к нити-аноду. Так зарождается электронная лавина. Около анода, где напряженность электрического поля очень велика, электроны, образовавшиеся в результате первичной ионизации, ускоряются настолько, что сами начинают ионизовать газ, усиливая ранее образовавшуюся лавину. Вновь возникшие электроны сами могут набрать достаточную скорость, чтобы в свою очередь вызвать новую ионизацию и еще больше усилить лавину электронов. В результате возникает самостоятельный — коронный — разряд, распространяющийся вдоль нити. Разряд обрывается включением большого сопротивления  $R$  либо использованием в счетчике газовой смеси, состоящей из инертного газа с примесью небольшого количества паров спирта (или другого многоатомного газа) и галоидов (самогасящийся счетчик).

Электрические импульсы во внешней цепи, возникающие при вспышках разряда в счетчике Гейгера—Мюллера, усиливаются и регистрируются. Гамма-кванты регистрируются по вторичным заряженным частицам — фотоэлектронам, комптоновским электронам, электрон—позитронным парам; нейтроны — по ядрам отдачи и продуктам ядерных реакций, возникающих в газе счетчика.

Счетчики Гейгера-Мюллера характеризуются высокой эффективностью и большой амплитудой сигнала ( $V=40$  В). Эффективность регистрации заряженных частиц счетчиками Гейгера-Мюллера близка к 100%. Недостатки счетчиков Гейгера-Мюллера: невозможность измерять энергию частицы, невысокое временное разрешение ( $10^{-6}$  с), большое время восстановления их чувствительности ( $10^{-4}$ — $10^{-3}$  с). Последнее определяется временем дрейфа к катоду положительных ионов, возникающих при ионизации частиц газа.

#### 4. Фізичні засади роботи сцинтиляційного та Черенковського лічильника.

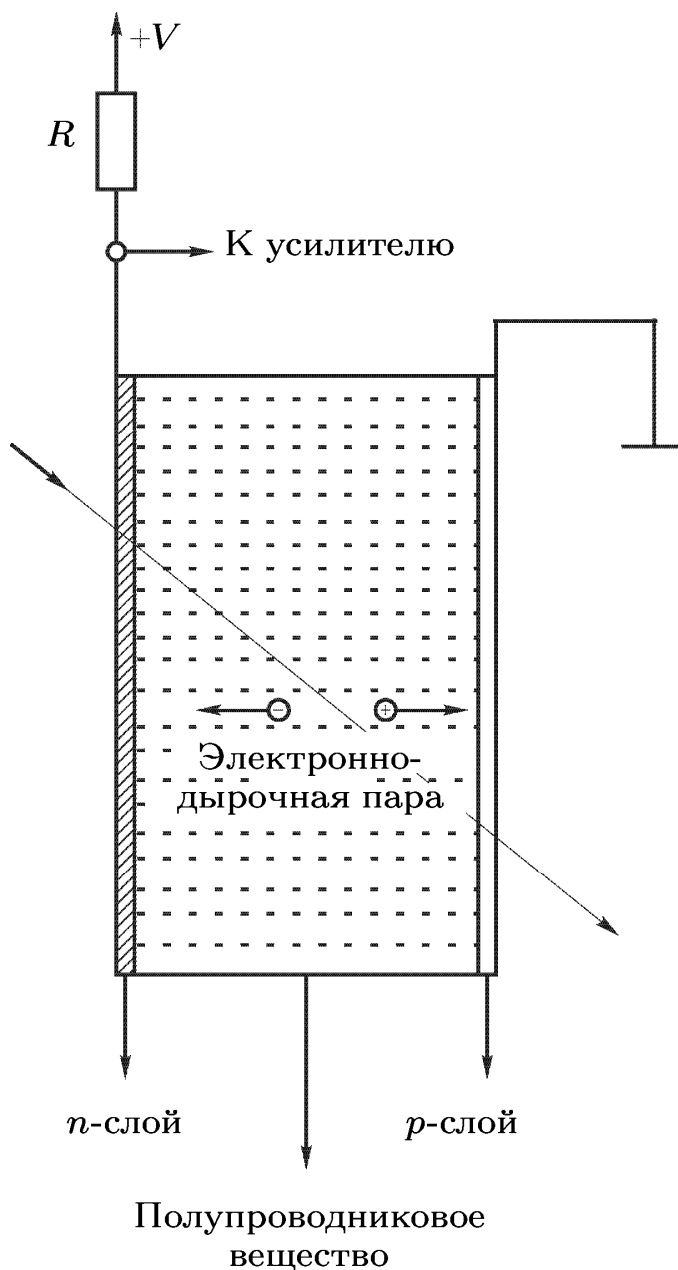
**Сцинтиляционный счетчик** состоит из вещества, способного люминесцировать под действием заряженных частиц (сцинтиллятора), и фотоумножителя (ФЭУ) — прибора в высшей степени чувствительного и быстродействующего. Заряженная частица, попадая в сцинтиллятор, возбуждает атомы или молекулы. Возвращаясь в основное состояние, они испускают фотоны. Последние, попадая на катод ФЭУ, выбивают электроны, в результате чего на катоде возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется. Благодаря высокой чувствительности и скорости действия сцинтилляционный метод детектирования получил широкое распространение. Высокая чувствительность достигается тем, что в ФЭУ устанавливается до 10—20 эмитторов (динодов) из специально обработанного материала. В среднем каждый электрон, попадая на динод, выбивает из него от 3 до 10 новых электронов. С последнего динода усиленный поток электронов попадает на анод, создавая электрический импульс, регистрируемый радиотехническими методами. В результате достигается большой коэффициент усиления, малое время восстановления (около  $10^{-8}$  с) при высокой его стабильности, высокое временное разрешение (около  $10^{-9}$  с). Замечательной особенностью ФЭУ является хорошо соблюдаемая линейность усиления. Вторая, не менее важная причина распространенности метода состоит в том, что в качестве сцинтилляторов стали использовать вещества, прозрачные по отношению к собственному излучению сцинтиллятора. Благодаря этому эффективным в детекторе становится весь объем сцинтиллятора, а не только его поверхностный слой.

**Черенковские счетчики** используют явление излучения Вавилова-Черенкова. Такое излучение возникает, когда заряженная частица движется в среде со скоростью  $v$ , превышающей фазовую скорость света в этой среде  $c/n$  ( $n$  — показатель преломления). В черенковском счетчике эта среда называется радиатором. Радиатор должен быть прозрачен для черенковского излучения и иметь низкий уровень сцинтилляций, создающих фоновые сигналы. В качестве радиаторов для регистрации частиц со сравнительно небольшими скоростями применяют органическое стекло ( $n = 1,5$ ), свинцовое стекло ( $n = 1,5$ ) и воду ( $n = 1,33$ ). Оптическая система счетчика фокусирует свет от частицы на катоде ФЭУ, превращающего световой сигнал в электрический. Общее количество света, попадающее на фотокатод черенковского счетчика, как правило, в несколько раз меньше, чем в сцинтилляционном счетчике. Но оно все же достаточно для регистрации после преобразования в ФЭУ в электрический сигнал и последующего усиления последнего. Именно фотоумножитель сделал возможным в черенковском счетчике уверенно регистрировать отдельные частицы. Так как излучение света в черенковских счетчиках происходит мгновенно, то их разрешающее время достигает  $10^{-9}$  с.

Черенковский счетчик полного поглощения предназначен для регистрации и спектрометрии электронов и гамма-квантов. Он содержит блок радиаторов большой толщины, в котором электрон или гамма-квант образует электрон-фотонную лавину и теряет всю (или почти всю) свою энергию. Как правило, радиатор изготовляют из стекла с большим содержанием свинца. При толщине радиатора 40 см в нем практически полностью тормозятся электроны с энергией до 10 ГэВ. Количество света, излученного в черенковских счетчиках такого типа, пропорционально энергии первичного электрона или гамма-кванта.

### 5. Фізичні засади роботи напівпровідникових детекторів та ядерних фотоемулсій.

К концу 50-х годов после преодоления различных технических трудностей появились **полупроводниковые счетчики**. Они используют переходное излучение в рентгеновской области и имеют большое будущее в физике ТэВ-области для идентификации частиц. Схема такого счетчика показана на рисунке. Принцип работы полупроводникового счетчика тот же, что и ионизационной камеры, только вместо газа применяется полупроводник. Это имеет то преимущество, что в твердом теле на одном и том же отрезке пути заряженная частица отдает в сотни раз больше энергии, чем в газе. Проходя через полупроводник, частица вызывает переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, порождая пару электрон-дырка. Энергия  $W$ , необходимая для рождения такой пары, составляет 2,9 эВ в германии и 3,5 эВ в кремнии. Если энергия частицы равна  $E$ , то на своем пути в полупроводнике она создает  $E/W$  электронно-дырочных пар. Приложенное электрическое поле оттягивает отрицательные заряды к поверхности, заряженной положительно, а положительные заряды — к поверхности, заряженной отрицательно. В результате во внешней цепи появляется электрический сигнал, который усиливается и регистрируется. Чтобы в отсутствие регистрируемой частицы через полупроводник не проходил ток, поверхности полупроводника обрабатывают сильно легированными донорными и акцепторными примесями. При этом отрицательный  $n$ -слой



присоединяют к положительному, а положительный p-слой — к отрицательному полюсу внешнего источника. При комнатной температуре тепловое возбуждение может приводить к нежелательным импульсам тока в приборе, и поэтому полупроводниковые детекторы нередко охлаждаются до температуры жидкого азота. Размеры полупроводниковых счетчиков невелики — несколько кубических сантиметров. Большими считаются полупроводниковые счетчики, объем которых достигает до 100 см<sup>3</sup>. Малые размеры рабочей области позволяют довести разрешающее время до 10<sup>-7</sup> с. В области низких энергий (электроны до 2 МэВ, протоны до 20 МэВ) полупроводниковые счетчики обладают практически 100 %-ной эффективностью, малым разрешающим временем и превосходят счетчики других типов по компактности и точности измерения энергии.

Самым дешевым трековым детектором заряженных частиц являются **толстослойные ядерные фотоэмульсии**. Они отличаются от обычных фотоэмульсий более высокой чувствительностью и большей толщиной (сотни микрометров, тогда как толщина обычных фотоэмульсий порядка 10 мкм). Пластины, покрытые слоем чувствительной фотоэмульсии, ставятся на пути ионизирующих частиц, после чего проявляются. В результате частица оставляет след, образованный зернами металлического серебра (размер зерна около 0,3 мкм). Этот след рассматривается в микроскоп с увеличением в 500-1000 раз. Измерение длины пробега при известной массе частицы дает ее энергию, а измерение плотности зерен — потери энергии на единицу пути, по которым можно судить о скорости частицы. Пластинку можно помещать в магнитное поле для измерения импульса частицы. Однако из-за короткой длины треков магнитное поле должно быть очень сильным. Главный недостаток метода — очень большая трудоемкость обработки пластинок, так как каждую пластинку приходится подолгу просматривать под сильным микроскопом. В последние годы в связи с изучением частиц с тяжелыми кварками техника фотоэмульсий вновь возродилась (изучение частиц со временем жизни 10<sup>-12</sup>-10<sup>-13</sup> с). Используются гибридные установки с электронными детекторами для идентификации и определения вершин) в эмульсии. В гибридных установках используются также в качестве вершинных детекторов небольшие быстродействующие пузырьковые камеры высокого разрешения с лазерным и голографическим съемом информации. Разрешение — десятки микрометров.