КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Радиологические измерения»

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

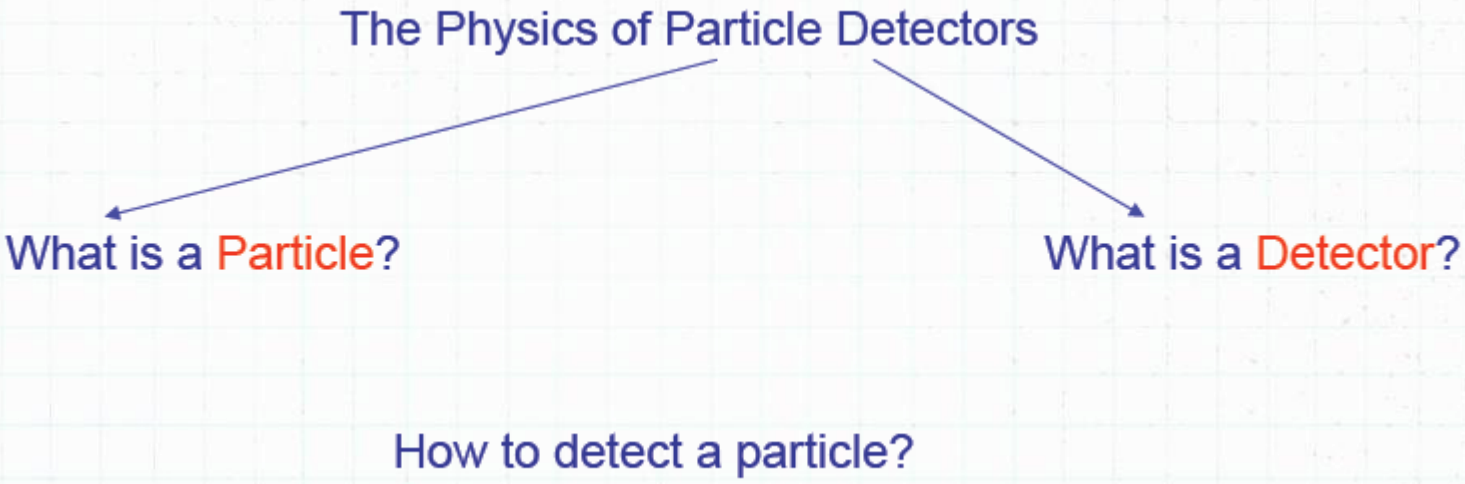
и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.

Цель лекции: сформировать у обучающихся представление об основных методах измерения и регистрации ионизирующих излучений, физических принципах работы детекторов различных типов и их применении для контроля внешнего облучения и обеспечения радиационной безопасности.

Результаты обучения:

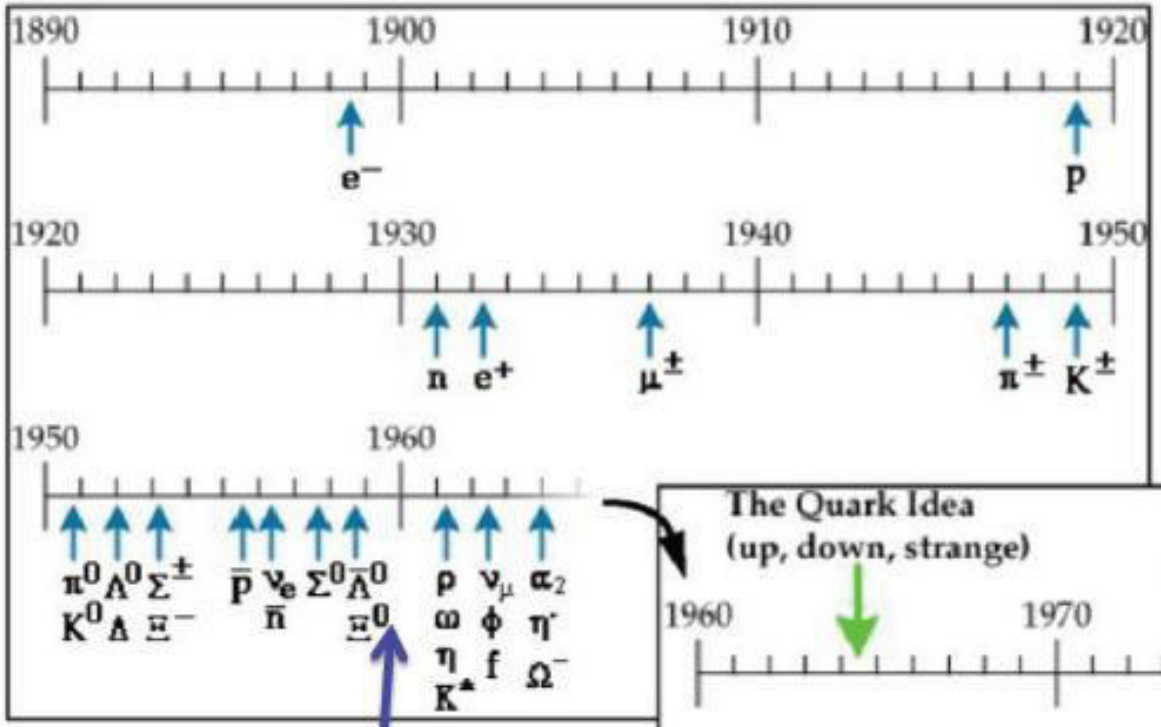
По завершении лекции обучающийся будет способен:

1. Объяснять назначение и основные задачи измерения ионизирующих излучений при контроле внешнего облучения.
2. Классифицировать детекторы ионизирующих излучений по принципу действия и характеризовать области их применения.
3. Описывать принципы работы газоразрядных детекторов, включая ионизационные камеры, пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера-Мюллера.
4. Объяснять физические основы регистрации излучения сцинтилляционными и полупроводниковыми детекторами.
5. Сравнивать основные характеристики различных типов детекторов и обосновывать их выбор для решения задач радиационного контроля.

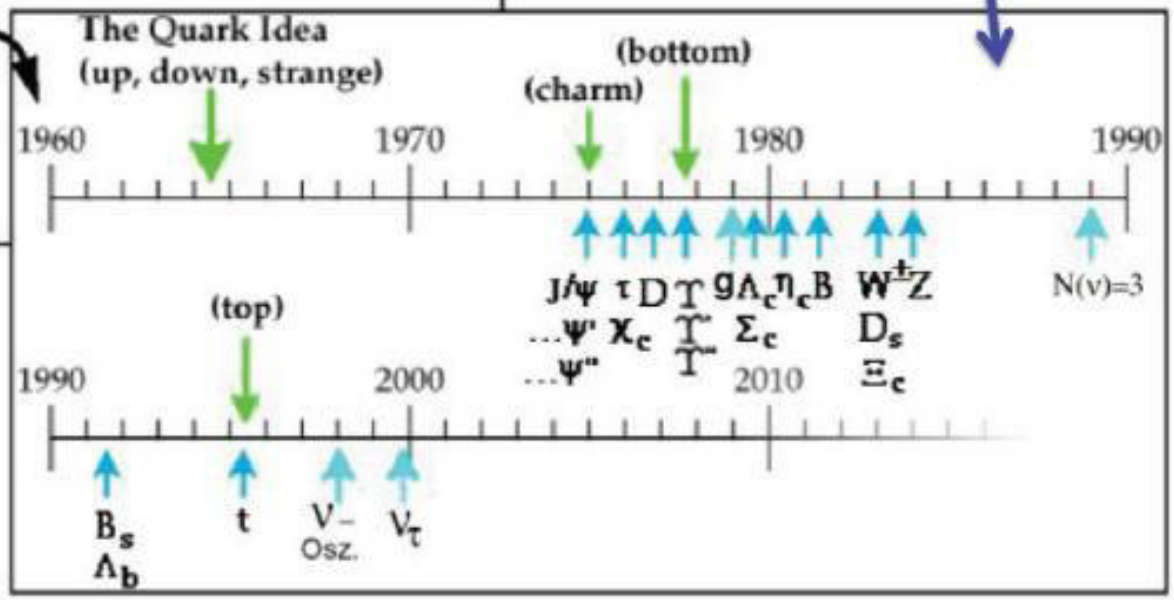


Детекторы частиц (счётчики частиц) – приборы для регистрации частиц или отдельных атомных ядер и определения их характеристик.

История открытия частиц



Already 20 particles discovered



Today > 200 particles listed in PDG

But only 27 have $c\tau > 1\mu m$ and only 13 have $c\tau > 500\mu m$

Для чего необходимо измерение радиоактивного излучения?

- Безопасность

Уровень радиации не превышает порог?
Доза, мощность дозы в медицине, реакторах и т. д.



- Медицина

Визуализация: рентген, ОФЭКТ, ПЭТ, КТ;
Лучевая терапия рака.



- Промышленность

Ослабление излучения используется для измерения толщины;
Рентгеновские спектры, используемые в анализе материалов.
Стерилизация





- Исследования

Детектирование частиц

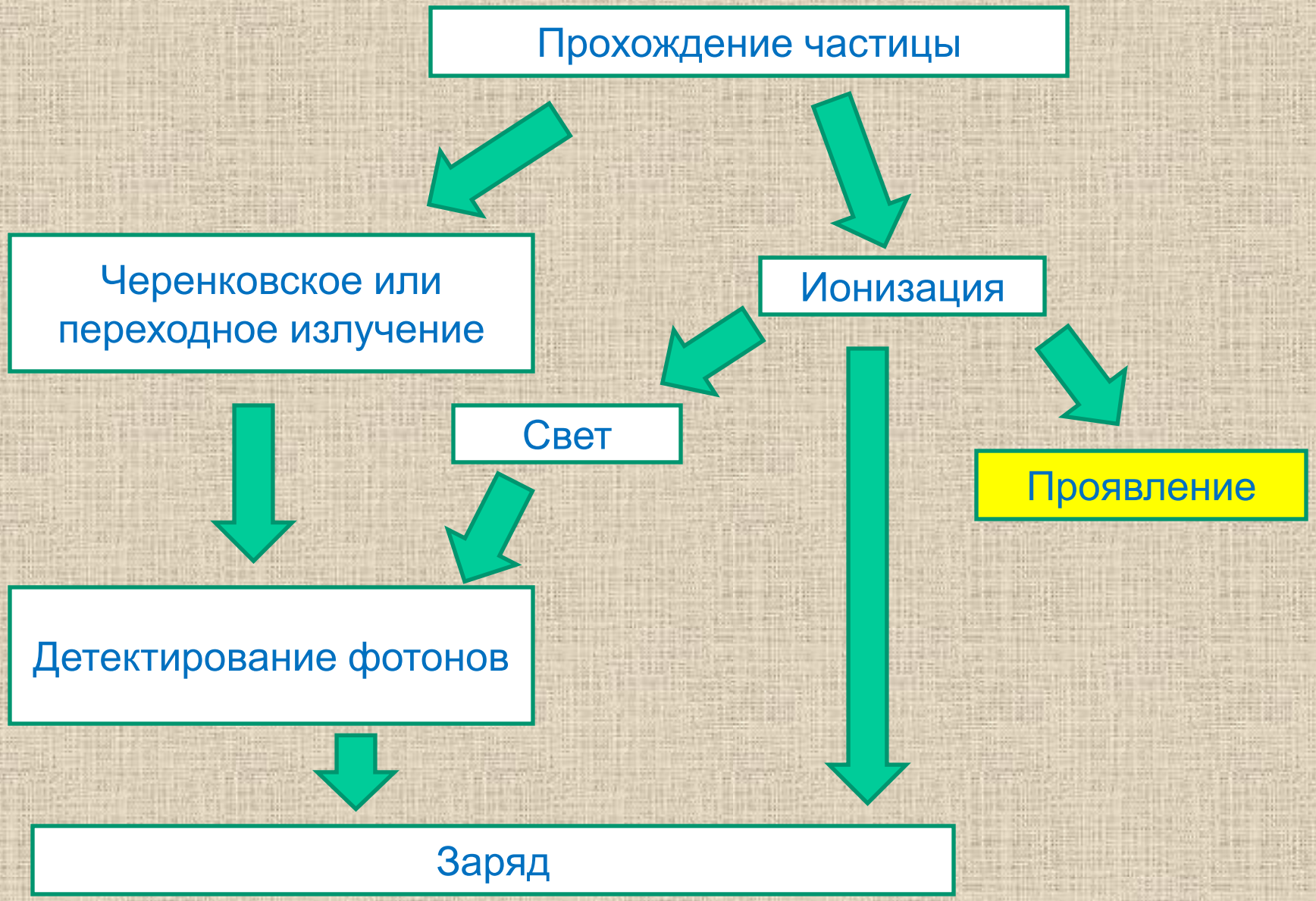
- ✓ Детектор видит только «стабильные» частицы (c_τ > 500 μм)
- ✓ 8 наиболее часто производимых: – $e^{\pm}, \mu^{\pm}, \gamma, \pi^{\pm}, K^{\pm}, K^0, p^{\pm}, n$
- ✓ Чтобы обнаружить частицу, она должна провзаимодействовать и передать энергию
- ✓ В конечном итоге сигналы в детекторах получаются в результате взаимодействия заряженных частиц
- ✓ Нейтральные частицы (фотоны, нейтроны) должны передать свою энергию заряженным частицам, чтобы их можно было измерить.

Какие частицы мы непосредственно регистрируем? – Те, которые могут долететь до детектора, т.е. относительно долгоживущие

Протон (p) – масса ~ 1 ГэВ, заряд +1, стабилен
Нейтрон (n) - масса ~ 1 ГэВ, заряд 0, время жизни ~ 900 с
Электрон (e) - масса ~ 0.5 МэВ, заряд -1, стабилен
Мюон (μ) - масса ~ 0.1 ГэВ, заряд -1, период полураспада ~ 2 мкс
Фотон (γ) - масса = 0 МэВ, заряд 0, стабилен
Нейтрино (ν) - масса = 0 МэВ, заряд 0, стабилен
Пи-мезон (π^+) - масса ~ 0.14 ГэВ, заряд +1, время жизни ~ 26 нс
К-мезон (K^+) - масса ~ 0.5 ГэВ, заряд +1, время жизни ~ 13 нс
K^0_L-мезон – масса ~ 0.5 ГэВ, заряд 0, время жизни ~ 51 нс
Гипероны (Λ,Σ,Ξ,Ω)– масса ~ 1.1-1.3 ГэВ, время жизни ~ 0.1-0.3 нс
+ Античастицы
+ ядра

Все ! - Это полный список !

Регистрация частиц



The Physics of Particle Detectors

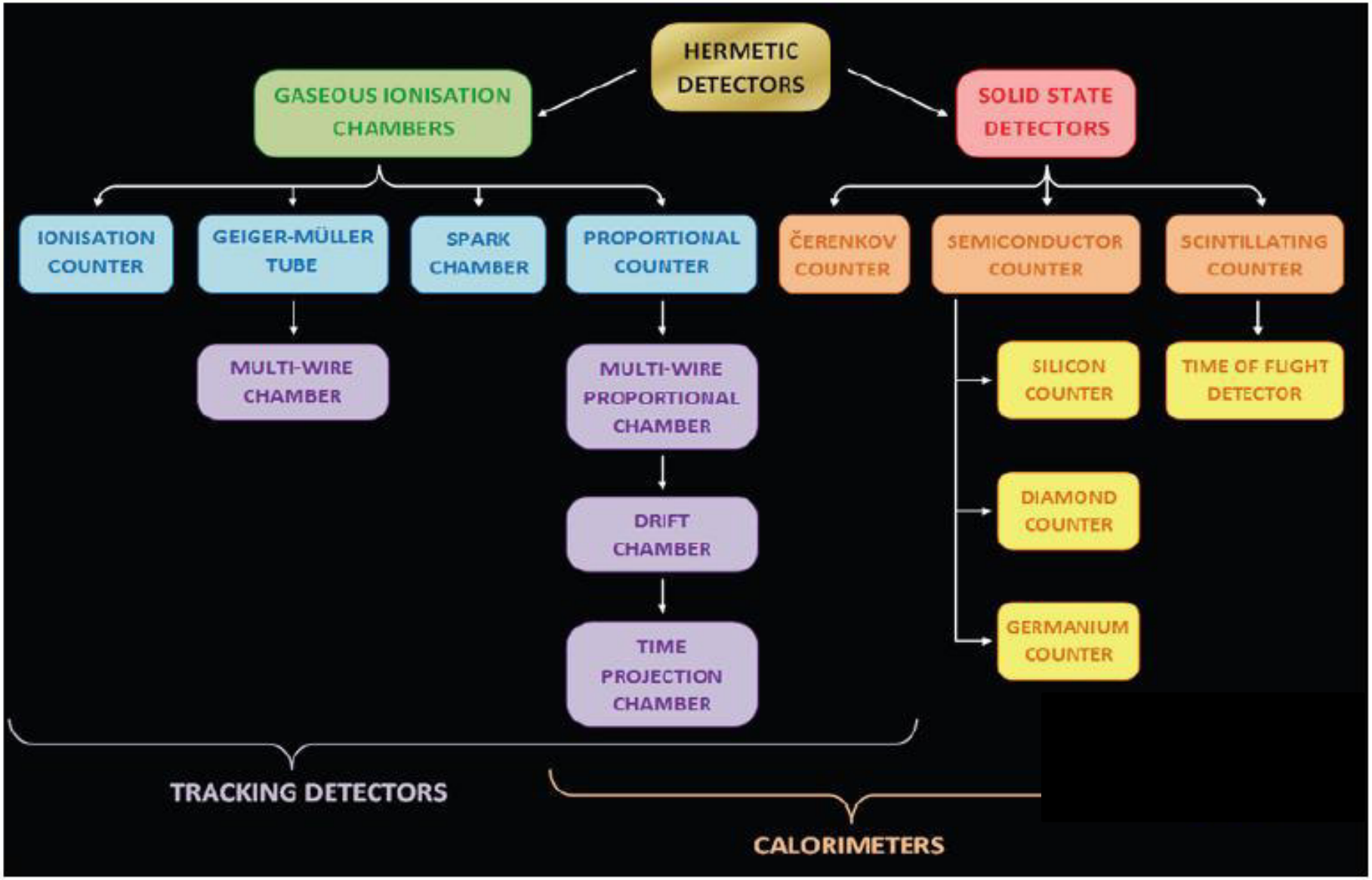
What is a Particle?

What is a Detector?

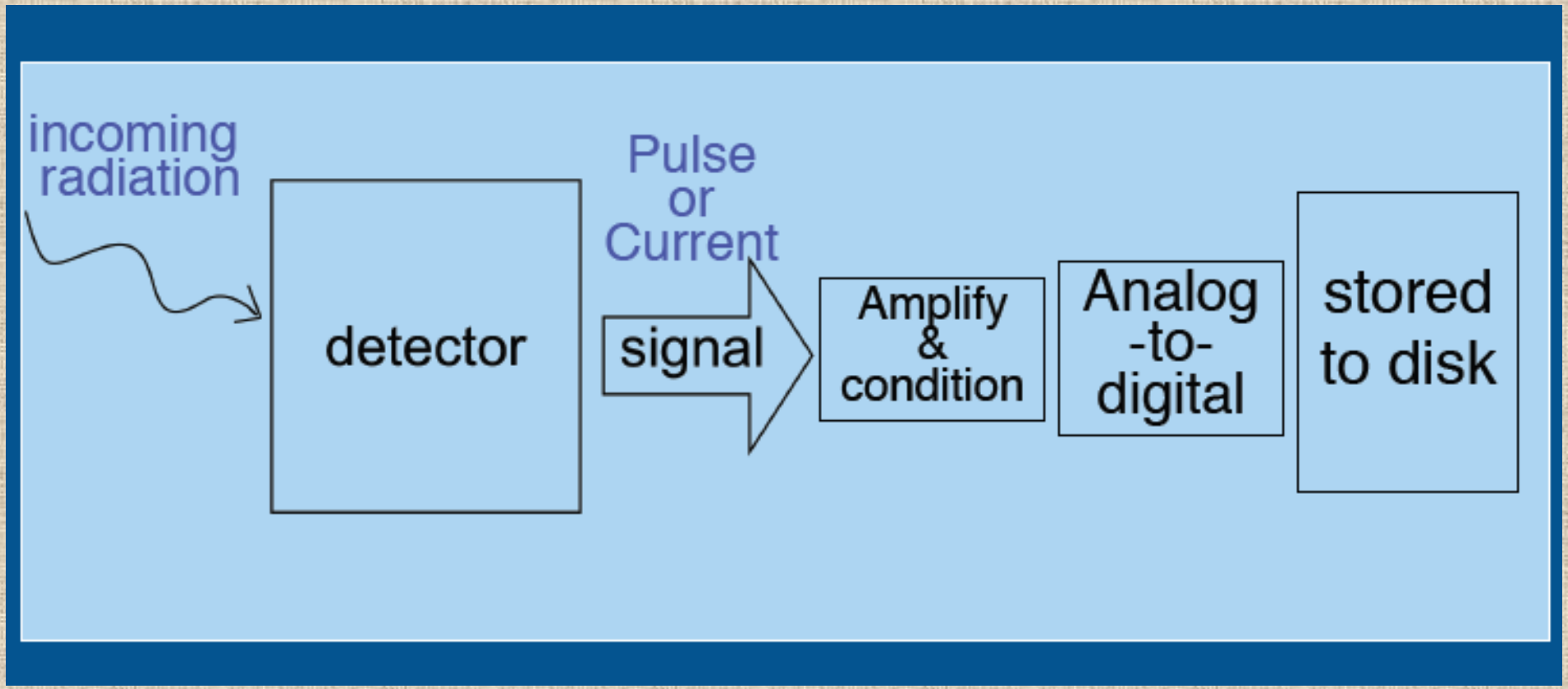
A particle detector is an instrument to measure one or more properties of a particle …

Properties of a particle:		Type of detection principle:
- position and direction	$x, \vec{x}$	position and tracking
- momentum	$\lvert\vec{p}\rvert$	tracking in a magnetic field
- energy	E	calorimetry
- mass	m	Spectroscopy and PID
- velocity	β	Cherenkov radiation or time of flight
- transition radiation	γ	TRD
- spin, lifetime		

«Зоопарк Детекторов»



Базовая система детектирования



Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Ионизация среды (газ, жидкость, твердое тело), возникновение электронов и ионов (первичных или вторичных). Возникновение импульса электрического тока если среда находится в электрическом поле.

Возбуждение атомов среды с последующей релаксацией системы с испусканием квантов фотонного излучения - сцинтилляции

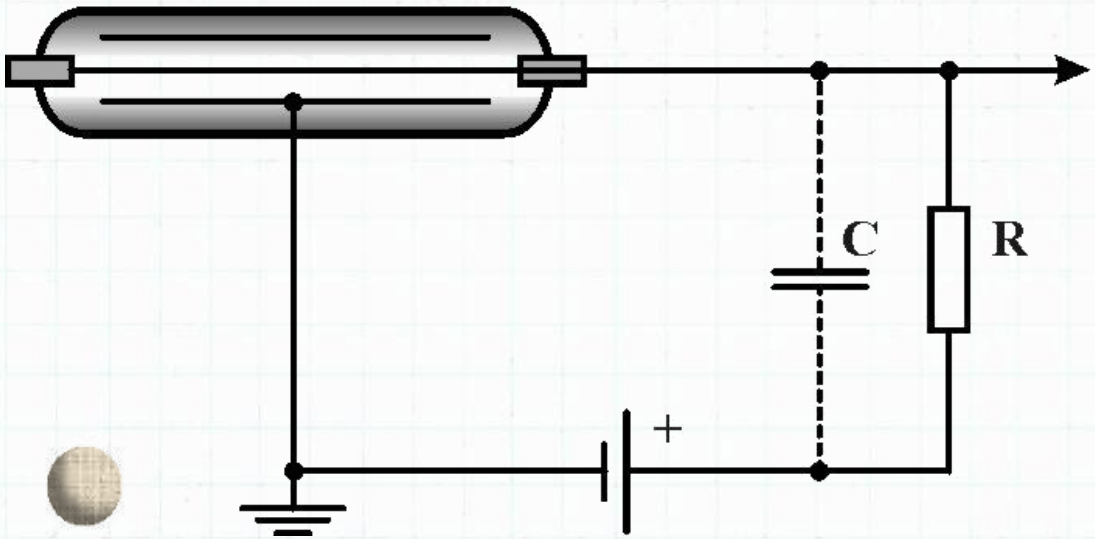
Первичные или вторичные химические реакции, приводящие к визуализации частицы или ее трека

Ионизационные детекторы: ионизационные камеры, газоразрядные, полупроводниковые, pin-диодные, камера Вильсона, пузырьковые камеры и тд.

Сцинтилляционные детекторы: жидкие, твердые, газовые, детекторы Черенковского излучения и тд.

Разнообразные трековые детекторы, компьютерная и авто-радиография

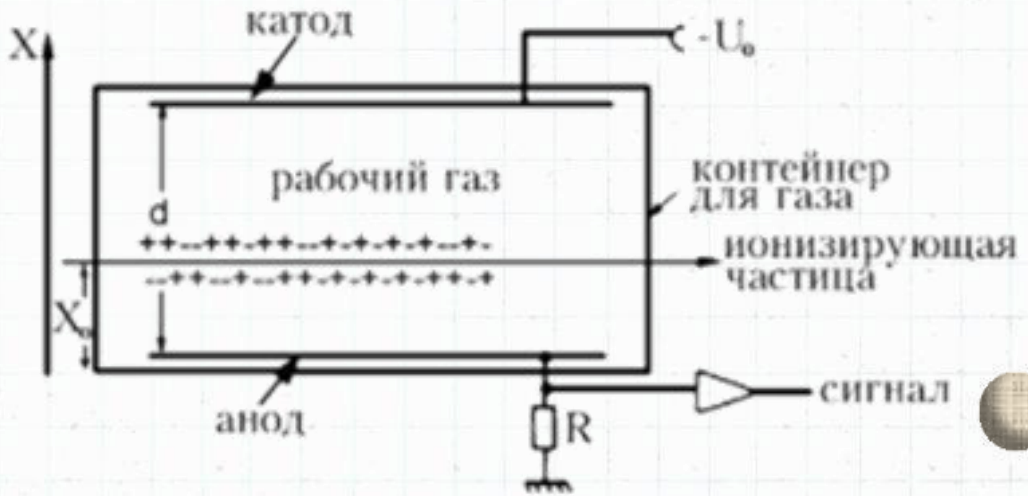
При поглощении ионизирующего излучения также возможно изменение температуры объекта – **основа калориметрических детекторов**

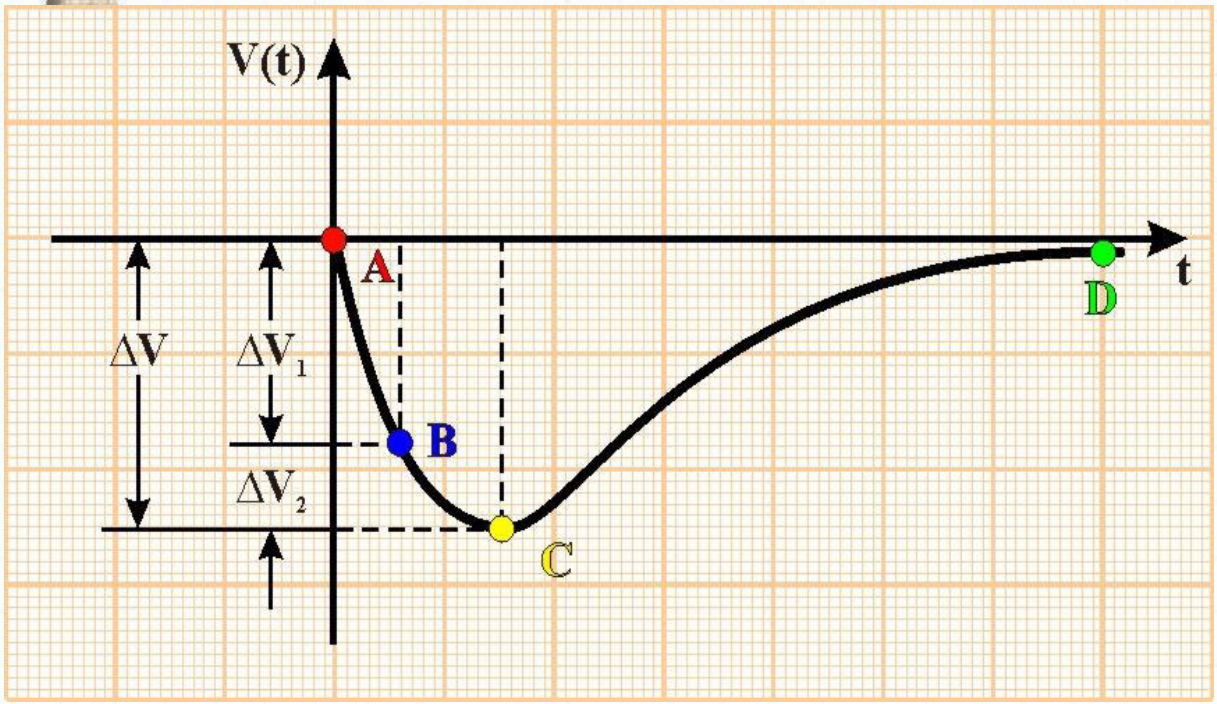


Ионизационная камера, *прибор для исследования и регистрации ядерных частиц и излучении, действие которого основано на способности быстрых заряженных частиц вызывать ионизацию газа.*

$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_k}{r_a}\right)}$$

где r_a – диаметр нити, r_k – диаметр цилиндра, V – потенциал анода.





$$\Delta V_1 = \frac{\Delta q}{C} = \frac{eN}{C}\frac{V_0 - V_x}{V_0}$$

$$\Delta V_2 = \frac{eN}{C}\frac{V_x}{V_0}$$

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{q}{C} = \frac{eN}{C}$$

где e – элементарный заряд, N – число пар ионов, образованных ионизирующей частицей на длине ее трека, V_x – потенциал электрического поля в месте прохождения заряженной частицы, V_0 – разность потенциалов между электродами.

$$V(t) = \Delta V e^{-\frac{t}{RC}}$$

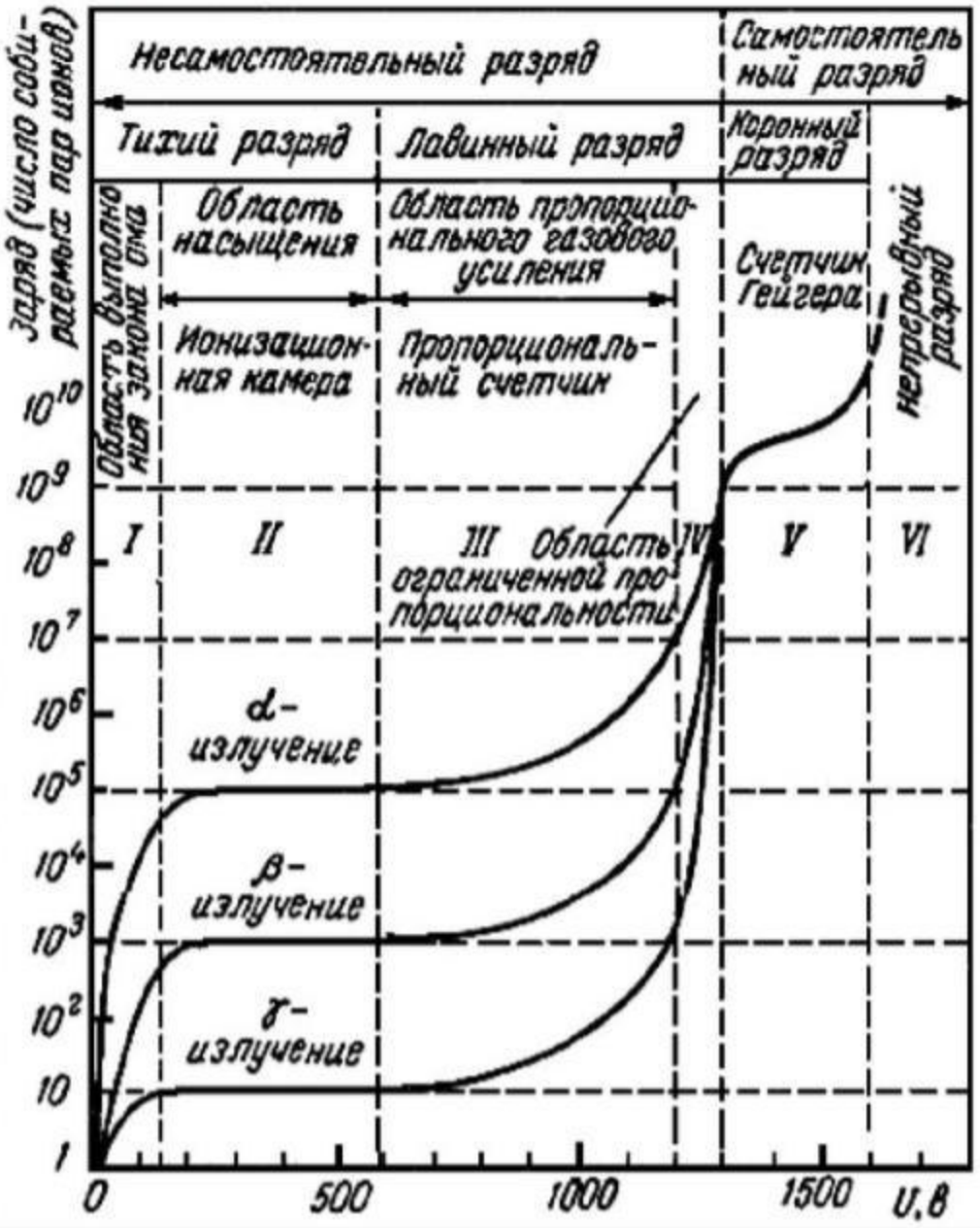


Рис. 1. Схема пропорционального счётчика в продольном (*а*) и поперечном (*б*) разрезах (аналогично устроен счетчик Гейгера и цилиндрическая ионизационная камера): 1 - нить-анод, 2 - цилиндрический катод, 3 - изолятор, 4 - траектория заряженной частицы, 5 - электронная лавина. Электроны и ионы, созданные частицей в результате первичной ионизации атомов инертного газа, показаны соответственно темными и белыми кружочками.

Область напряжений пропорционального счетчика

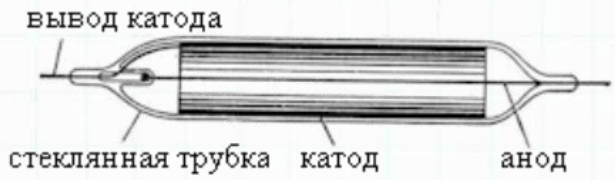
$$\Delta V = \frac{eN}{C} M$$

где M – коэффициент газового усиления, который определяется как отношение числа пар ионов, достигающих анода, к числу пар ионов, образованных непосредственно регистрируемой частицей.



ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Область (I) - область рекомбинации.
Область (II) - область насыщения.
Область (III) - область работы пропорциональных счетчиков (камер).
Область (IV) - область ограниченной пропорциональности.
Область Гейгера – Мюллера (V). Область непрерывного разряда (VI)



Стеклянный счетчик Гейгера-Мюллера

$$M_\gamma = \frac{M}{1 - \gamma M}$$

Счётчики Гейгера–Мюллера – применяются для обнаружения присутствия ионизирующего излучения, обладают высокой чувствительностью, но не дают информации о его энергии. Данное устройство предназначено для регистрации количества частиц, проходящих через его объем. Его работа основана на явлении ионизации газа, происходящей под воздействием различных типов ионизирующего излучения. Конструктивно счётчик представляет собой герметичную стеклянную трубку, внутри которой расположен катод в виде тонкого металлического цилиндра. Вдоль оси трубки натянута анодная проволока. Для нормальной работы прибора подается электрическое напряжение величиной порядка нескольких сотен вольт.

Газоразрядные счетчики разделяют на **несамогасящиеся** и **самогасящиеся**.



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 (огрстекло)

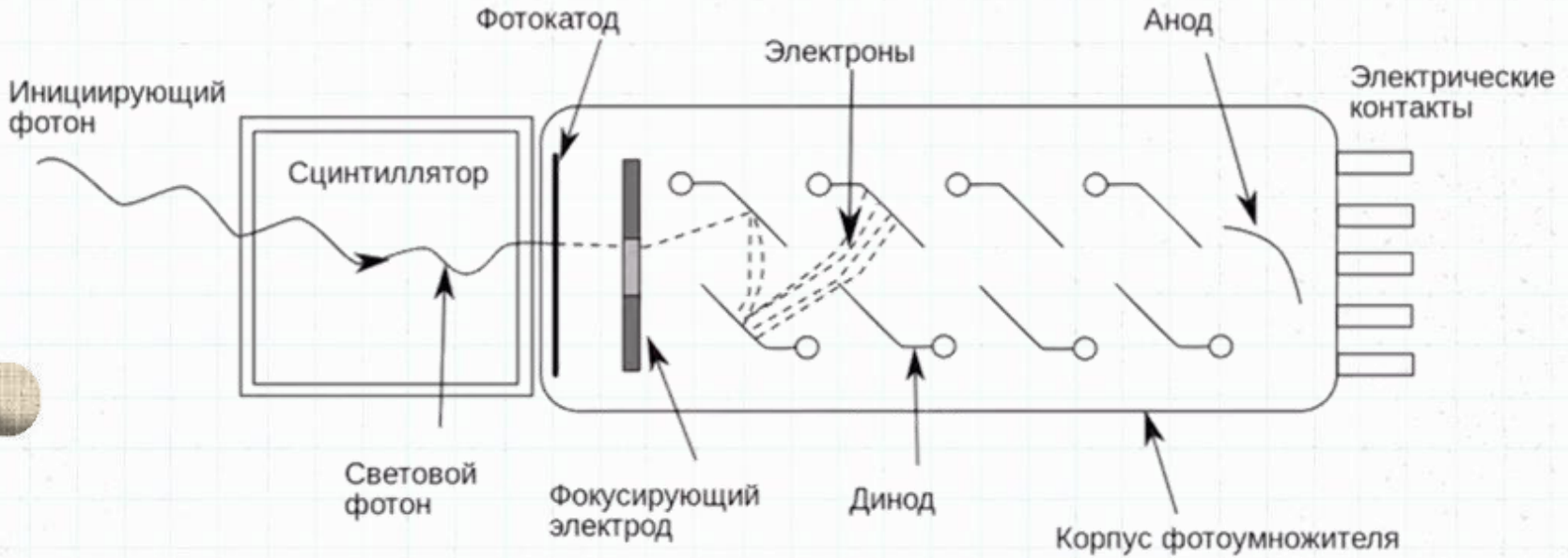
ГАЗОВЫЕ

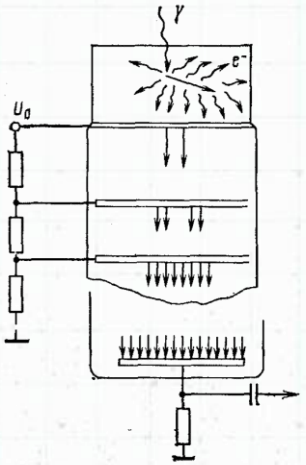
Благородные газы: **криптон, ксенон, аргон и гелий.** Газовые сцинтилляторы обладают линейной зависимостью величины сигнала от энергии частицы в широком диапазоне энергий. Источник может быть введён в объём газового сцинтиллятора. Требуют высокой чистоты газа и специального ФЭУ с кварцевыми окнами

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

Фотоэлектронный умножитель



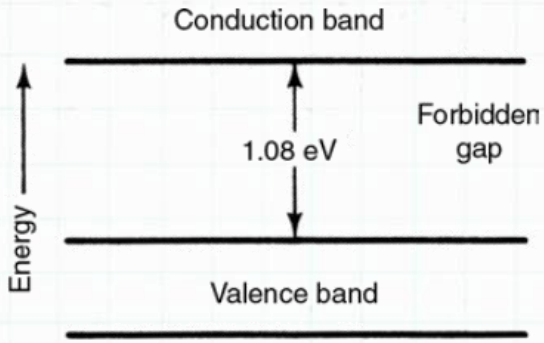


$$N_0 = C_{ef} f E/(h\nu).$$

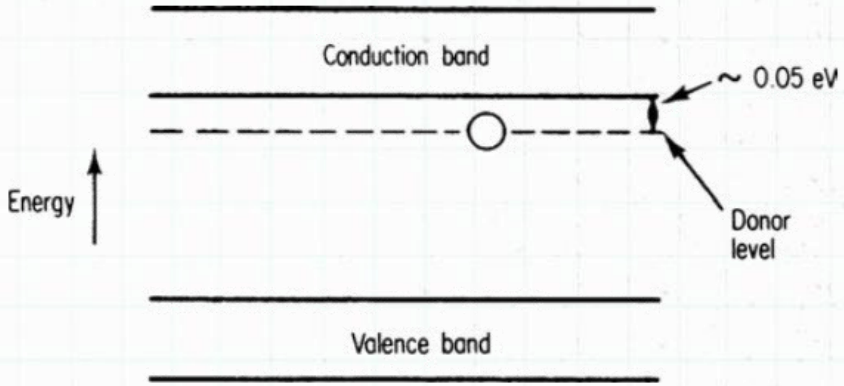
$$\varkappa_E \cdot dE/dx = \varkappa_x, \quad C_{ef} = (h\nu/E) \int_0^E \varkappa_E dE.$$

$$C_{ef} = \varkappa_E h\nu$$

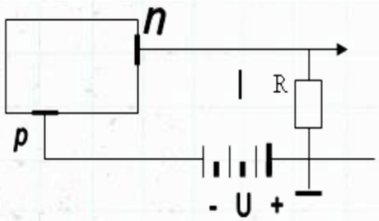
Принцип работы полупроводникового детектора

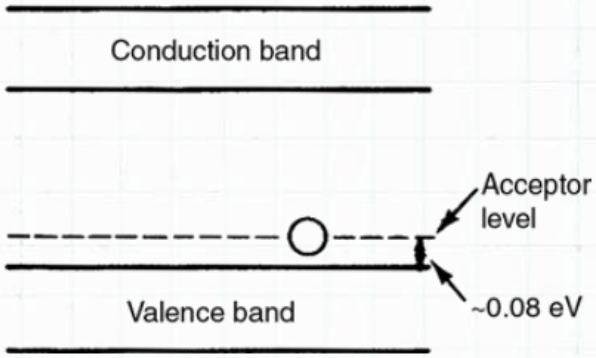


Schematic diagram of the energy levels of crystalline silicon

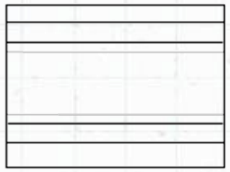


Schematic diagram of the energy levels of crystalline silicon with a donor impurity





Schematic diagram of the energy levels of silicon with a p-type impurity



Зона проводимости
Донорные уровни

Акцепторные уровни
Валентная зона

Выводы:

1. Измерение ионизирующих излучений является основой контроля внешнего облучения, оценки радиационной обстановки и обеспечения радиационной безопасности.
2. Газоразрядные детекторы основаны на ионизации газа и включают ионизационные камеры, пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера-Мюллера.
3. Сцинтилляционные детекторы преобразуют энергию ионизирующего излучения в световые вспышки, которые регистрируются и преобразуются в электрические сигналы.
4. Полупроводниковые детекторы обеспечивают высокое энергетическое разрешение благодаря образованию и регистрации электронно-дырочных пар в чувствительном объёме.
5. Выбор типа детектора определяется характеристиками излучения, условиями измерений и требованиями к точности, чувствительности и энергетическому разрешению.

Вопросы для самопроверки:

1) Чем отличаются счётчики пропорционального типа от счётчиков Гейгера–Мюллера?
2) Объясните процесс возникновения ионной лавины в газоразрядных детекторах.
3) На каком физическом явлении основана работа сцинтилляционного детектора?
4) Почему полупроводниковые детекторы обладают более высоким энергетическим разрешением по сравнению с газоразрядными?
5) Какова роль калибровки измерительных приборов в обеспечении достоверности радиационного контроля?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

