

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- МОДУЛЬ 1. СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ АТТЕСТАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
- МОДУЛЬ 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
- МОДУЛЬ 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
- МОДУЛЬ 4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
- МОДУЛЬ 5. ФИЗИКА ЖИДКОСТЕЙ

**Лекция 1.**

**Связь структуры твердых тел с их эксплуатационными характеристиками.**

**Элементарные частицы и физические принципы их детектирования.**

**Методы исследования взаимодействия элементарных частиц.  
Адронный коллайдер.**

**Экспериментальные методы исследования фононных и электронных спектров кристаллов.**

## История обнаружения элементарных частиц

Древняя Греция: Мир состоит из атомов.

Резерфорд (1871-1937) – атом имеет ядро (размер которого в 1000 раз меньше атома) и электрон

Гейзенберг (1901-1976) – ядро атома состоит из нейтрона и протона

### Эпоха квантовой механики

Нейтрон распадается на протон, электрон и еще что-то очень маленькое и не имеющее заряда) – нейтрино

Хидзюки Юкава (1907-1981) – протоны и нейтроны удерживают внутри ядра благодаря обмену элементарными частицами - пи- мезонами

### Космические лучи и ускорители

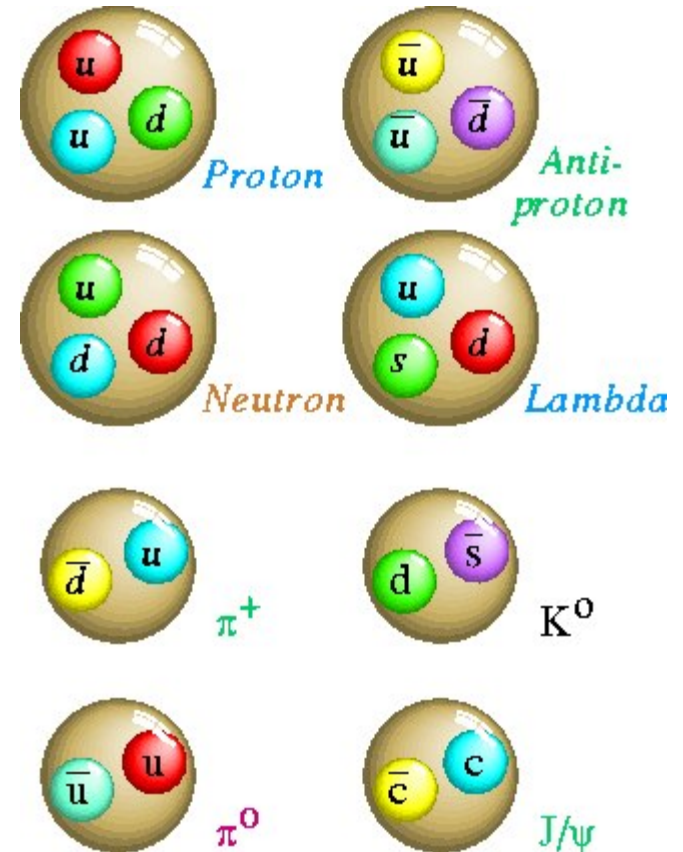
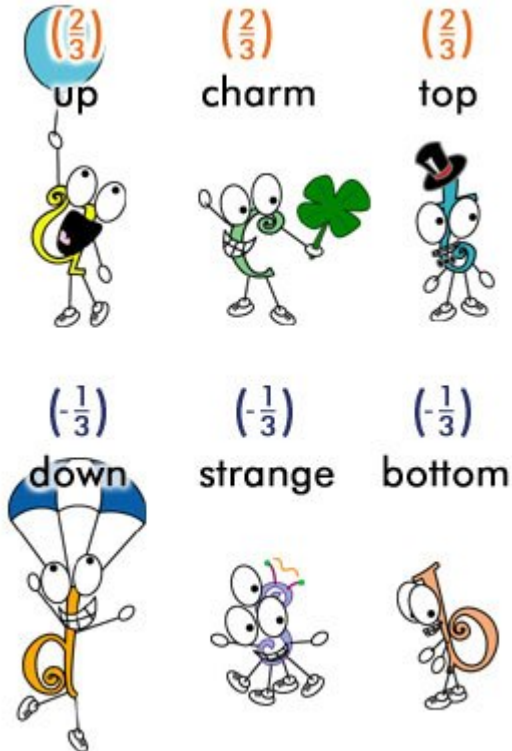
мюоны (1936), пи-мезоны (1947), странные частицы ( 50-е годы XX в.), резонансные частицы (то есть нестабильные, 60-е годы XX в)

K-мезоны, пи-мезоны ( $\pi$ ), ро-мезоны ( $\rho$ ), омега-мезоны ( $\omega$ ), эта-мезоны ( $\eta$ ), кси-мезоны ( $\xi$ ), сигма-мезоны ( $\Sigma$ ) другие частицы, обладающие «странными» свойствами. Элементарные частицы вращаются как волчки, но с очень большим угловым моментом.

В настоящее время самыми элементарными, точечными частями вещества сейчас считаются лептоны и кварки!

**Кварк** — воображаемая фундаментальная частица обладающая электрическим зарядом, кратным  $e/3$ , и не наблюдающаяся в свободном состоянии, но входящая в состав адронов.

Предполагается существование 6 разных видов кварков, для различия которых вводится такое понятие как «аромат». Для краткости кваркам присвоены следующие имена: u-кварк, d-кварк, s-кварк, c-кварк, t-кварк, b-кварк



# Классификация элементарных частиц

## По времени жизни

1. **Стабильные элементарные частицы** - частицы, имеющие бесконечно большое время жизни в свободном состоянии (протон, электрон, фотон, гравитон и их античастицы).
2. **Нестабильные элементарные частицы** - частицы, распадающиеся на другие частицы в свободном состоянии за конечное время (все остальные частицы).

## По массе

1. **Безмассовые частицы** - частицы с нулевой массой (фотон, глюон, гравитон и их античастицы).
2. **Частицы с ненулевой массой** (все остальные частицы).

## По величине спина

1. **Бозоны** — частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса).
2. **Фермионы** - частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино);

Частицы, имеющие целый угловой момент, подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна и называются **бозоны**

Частицы, имеющие полуцелый угловой момент, подчиняются статистике Ферми-Дирака и называются **фермионы**

## По видам взаимодействий

На сегодня достоверно известно существование четырёх фундаментальных взаимодействий:  
гравитационного; электромагнитного; сильного; слабого.

1. Частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии – тяжелые частицы – **адроны**
2. Частицы, которые участвуют в слабом взаимодействии – легкие частицы – **лептоны**

## По видам взаимодействий

**Лептоны** (от греческого *leptos*, «маленький».) – **бесструктурные** частицы,, не участвующие в во внутриядерных взаимодействиях -нейтрино, электрон, Мю-мезон

**Адроны** (от греческого *hadros* «большой») – **составные** частицы, участвующие во всех видах взаимодействия -

Мезоны (частицы с целым спином):  
К-мезоны, пи-мезоны, ро-мезоны, омега-мезоны, эта-мезоны, кси-мезоны, сигма-мезоны

барионы (частицы с полуцелым спином):  
протон, нейтрон,  
люмбда-, сигма-, кси-, омега - гипертоны

все тяжелые частицы – адроны – состоят из более фундаментальных частиц - **кварков**

**ФОТОНЫ** (от греческого *fotos*, «свет») – частицы, являющиеся носителем электромагнитного взаимодействия

## Принцип обнаружения элементарных частиц

**Элементарными частицами** называют большую группу мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или атомными ядрами:

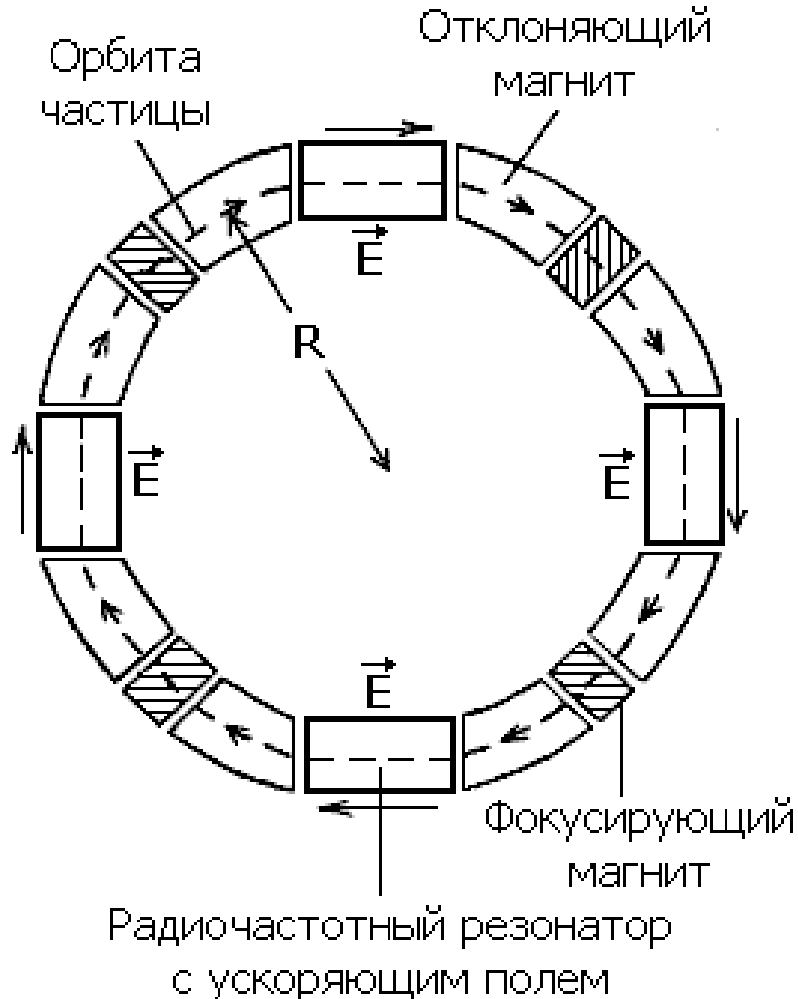
электроны, протоны, нейтроны, нейтрино, фононы, мюоны, мезоны, резонансы, «странные» частицы, «очарованные» частицы, «красивые» частицы

подавляющее число элементарных частиц не встречаются в природе, так как они не устойчивы, их получают в лабораторных условиях. Основной способ их получения – **столкновение** быстрых стабильных частиц, в процессе которого часть кинетической энергии превращается в энергию образующихся частиц.

**Колла́йдер** (англ. *collider* от *collide* – сталкиваться) — ускоритель частиц на встречных пучках, предназначенный для изучения продуктов их соударений.

**Синхротрон** (от др.-греч. σύγχρονος — одновременный).

В процессе ускорения частиц орбита пучка остаётся постоянного радиуса, а ведущее магнитное поле поворотных магнитов, определяющее этот радиус, возрастает во времени.



**Синхротрон** представляет собой электровакуумную установку с приблизительно кольцевой вакуумной камерой, в которой частицы ускоряются до скорости, близкой к скорости света, а стоящие на их пути мощные электромагниты задают траекторию их движения.

В вакуумной камере постоянно поддерживается сверхвысокий вакуум, чтобы избежать рассеяния частиц пучка на атомах остаточного газа.

Ускорение частиц происходит за счёт многократного пролёта ( $\sim 10^6$  раз в секунду) через ускоряющую секцию.

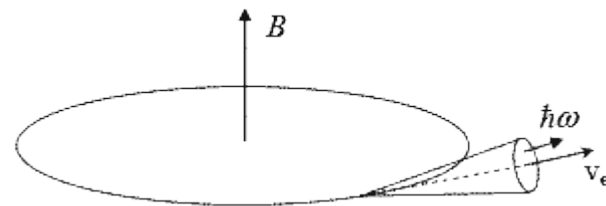


**Синхротроны** используют как для ускорения **тяжелых заряженных частиц** (протонов, ионов), так и для ускорения **электронов**.

Однако в случае **электронов** при высоких энергиях становятся существенными потери энергии на **излучение** (называемое синхротронным) при криволинейном движении по орбите.

**синхротронное излучение** — тормозное излучение, испускаемое релятивистскими заряженными частицами в однородном магнитном поле.

Излучение обусловлено ускорением частиц, появляющемся при искривлении их траекторий в магнитном поле.

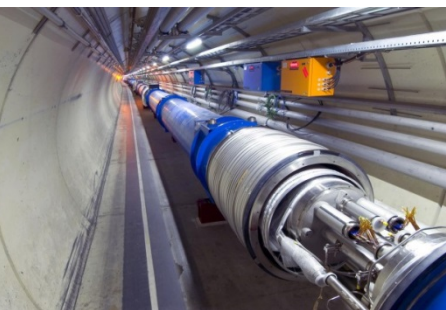


Мощность синхротронного излучения  $P$  для релятивистской частицы следующим образом зависит от её массы  $m$  энергии  $E$  и радиуса траектории  $R$ :

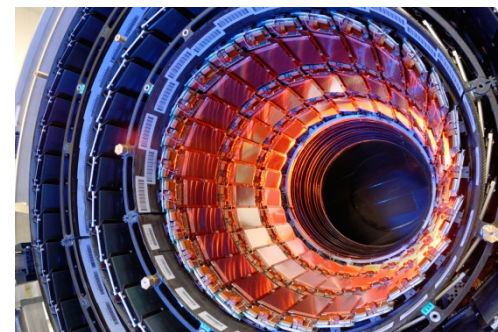
$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \sim \frac{1}{R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4$$

Таким образом, если электроны и протоны одинаковых энергий, двигаются по орбитам одного радиуса, то потери энергии на синхротронное излучение у электронов будут в  $(m_p/m_e)^4 \sim 10^{13}$  раз больше. Поэтому на синхротронах пока не удалось ускорить электроны до энергий больших 100 ГэВ.

По достижении максимального магнитного поля ускоренные частицы либо **направляются** на неподвижную мишень, либо (в коллайдерах) **сталкиваются** со встречным пучком.



# Большой адронный коллайдер



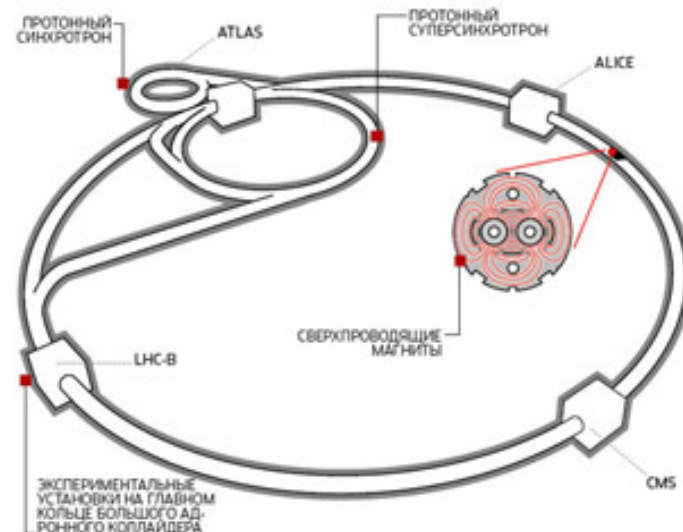
Сначала молекулы водорода прогоняют через два линейных ускорителя, где они ионизируются, достигают 400 МэВ, отдают электроны и превращаются в протоны.

Протоны направляют в бустерный синхротрон.

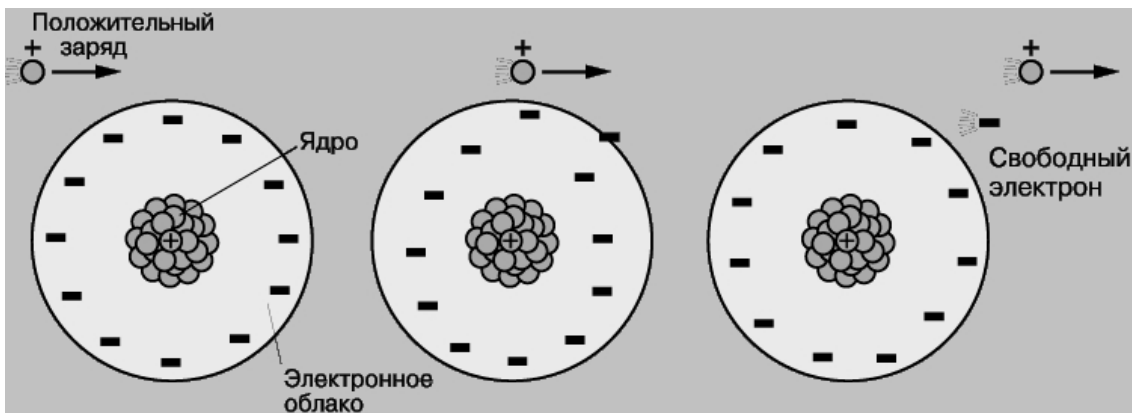
Там они приобретают энергию в 8 ГэВ, после чего попадают в еще один вспомогательный ускоритель (так называемый главный инжектор), который доводит их энергию до 150 ГэВ.

Затем сгустки протонов инжектируют в главный синхротрон (кольцо километровой радиуса, окруженное как обычными, так и сверхпроводящими магнитами). Там они разгоняются до 980 ГэВ и приобретают скорость в 99,89% световой.

Встречные протонные пучки пересекаются в выделенных зонах камеры ускорителя, где располагаются системы магнитов, которые сводят протоны с круговых путей и направляют их навстречу друг другу.



# Взаимодействие частиц с веществом



Проходя сквозь вещество, частица сталкивается с атомами этого вещества. При каждом столкновении существует вероятность того, что атом потеряет электрон и превратится в положительно заряженный ион.

Частица, движущаяся в веществе, оставляет за собой след из электронов и положительных ионов.

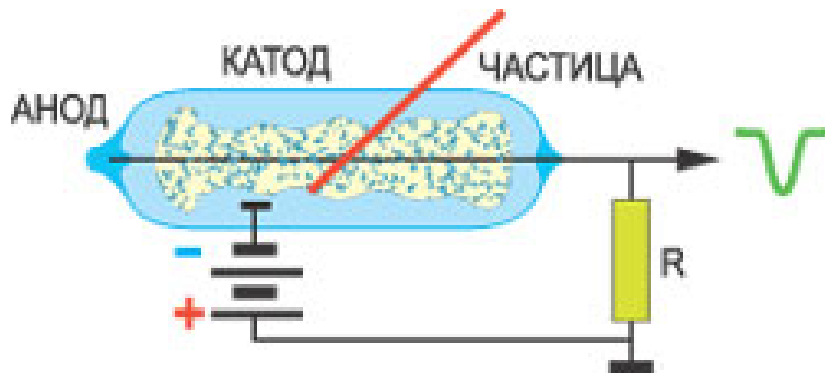
## Детекторы элементарных частиц

**Счетчики** - фиксируют факт прохождения частицы, определяя момент времени и величину теряемой энергии

**Камеры или трековые детекторы** - позволяют проследить траектории заряженной частицы

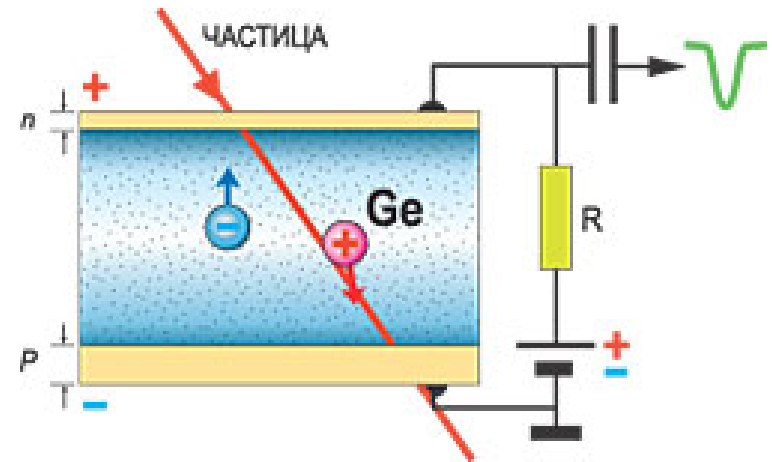
# Ионизационный счетчик элементарных частиц

## Газоразрядный детектор



На электродах собираются ионы, образующиеся при прохождении ионизирующего излучения сквозь газовую среду. По величине ионизационного тока можно оценить количество зарегистрированных частиц и определить интенсивность излучения

## Полупроводниковый детектор



При прохождении ионизирующей частицы полупроводник возникает свободные носители заряда. Под действием приложенного напряжения они перемещаются к электродам и создают электрический ток

# Основные характеристики детекторов

**Пространственное разрешение** — погрешность, с которой детектор может фиксировать положение частицы в пространстве

**Временное разрешение** — минимальный интервал времени между прохождением двух частиц, когда сигналы от них еще не накладываются друг на друга

**Время восстановления (мёртвое время)** — интервал времени после регистрации частицы, в течение которого детектор остается нечувствительным к регистрации следующей частицы.

**Эффективность регистрации** — отношение числа частиц, зарегистрированных детектором, к общему числу прошедших через него частиц

# Трековый детектор элементарных заряженных частиц

## Камера Вильсона

треки заряженных частиц становятся видимыми благодаря конденсации перенасыщенного пара на ионах газа, образованных заряженной частицей. На ионах образуются капли жидкости, которые вырастают до размеров достаточных для наблюдения ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  см) и фотографирования при хорошем освещении.

Пространственное разрешение камеры Вильсона обычно  $\approx 0.3$  мм.

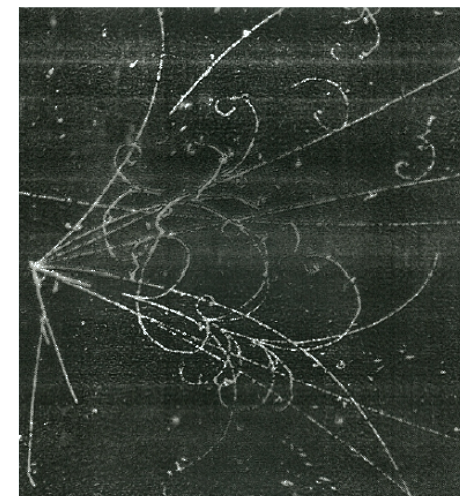
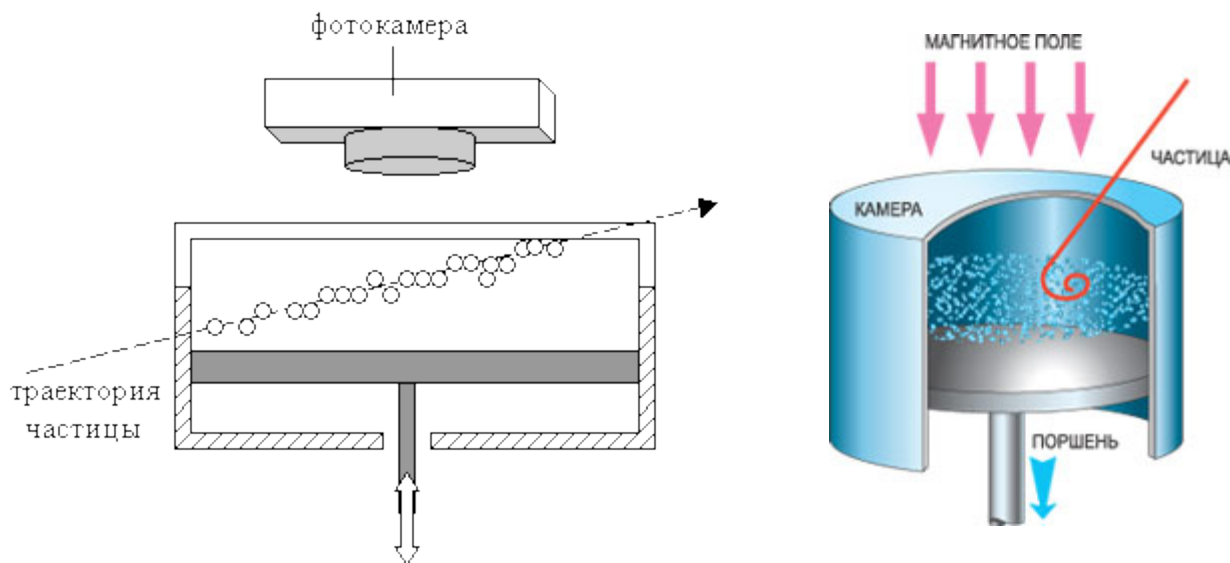
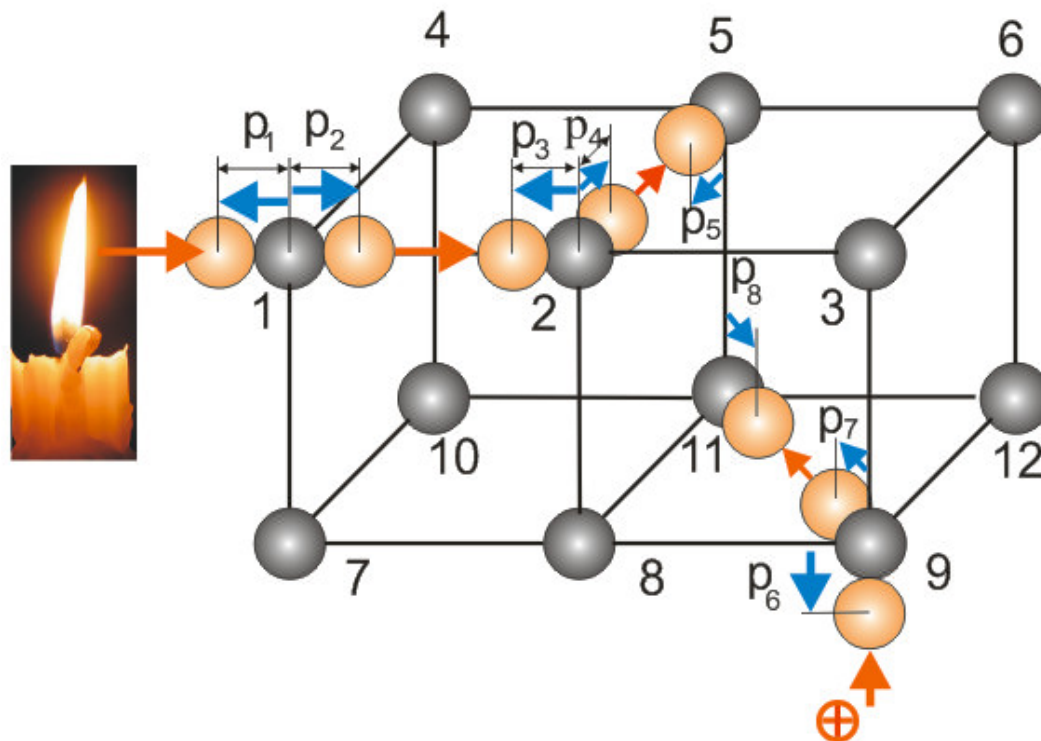


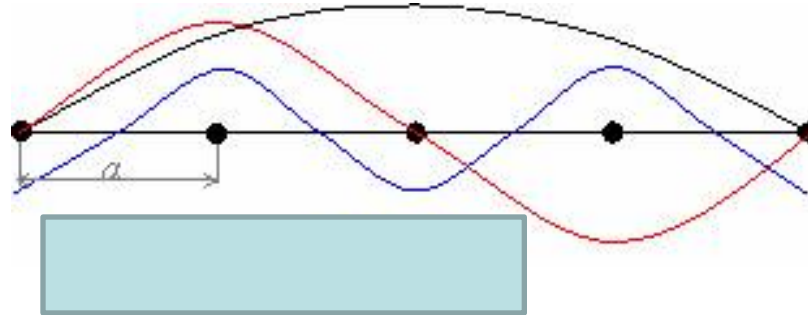
Рис. 4. Следы заряженных элементарных частиц в камере Вильсона.

**Фонон** (от греческого φωνή (фонэ) - «голос») - квазичастица - квант энергии звуковой волны в кристаллах



Рассеяние электронов проводимости при взаимодействии с фононами — основной механизм электросопротивления металлов и полупроводников.

Спектр колебаний кристаллической решетки можно представить в виде дискретного набора стоячих волн (нормальных колебаний) с длинами волн  $2L$ ,  $2/2 L$ ,  $2/3 L$ ,  $2/4 L$  ....  $2/a$ , где  $L$  — длина кристалла,  $a$  — межатомное расстояние.



Минимальные частоты фононов и, соответственно, максимальные длины упругих волн определяются размерами образца,  
Максимальные частоты — расстоянием между соседними атомами.

Вместо волн, в которых атомы испытывают каждый момент времени определенные смещения, в квантовой теории вводится понятие о так называемых **фононах** как о **квазичастицах**, обладающих определенными энергиями и направлениями движения.

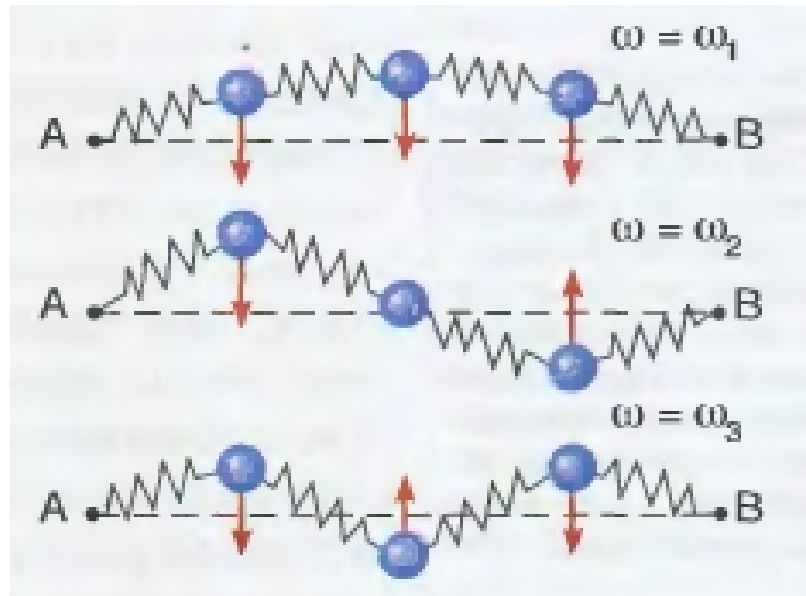
Таким образом, свободному распространению волн в гармоническом приближении соответствует в квантовой картине свободное движение не взаимодействующих друг с другом фононов.



Фонон имеет свою энергию, может двигаться в веществе, но не может существовать в пустоте.

Этим фононы отличаются от фотонов, которые могут существовать как в пустоте, так и в веществе (при наличии совокупности атомов).

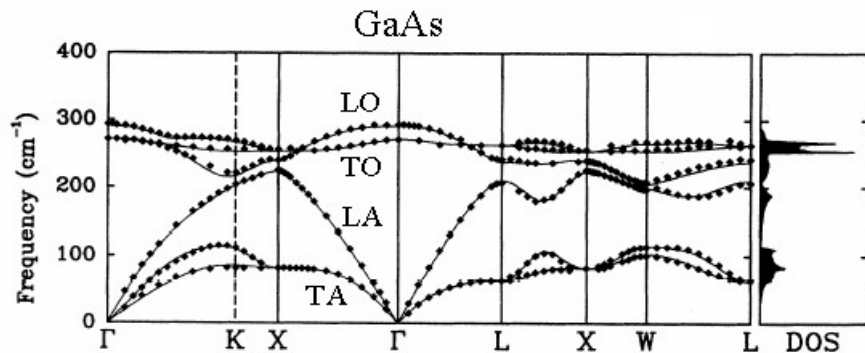
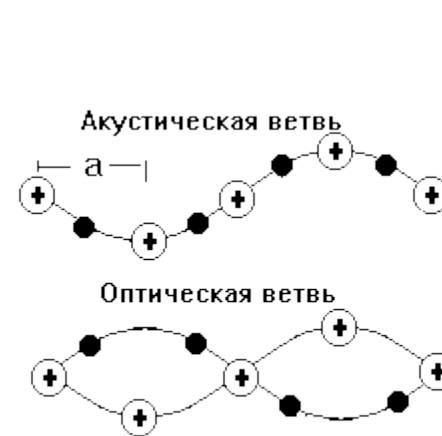
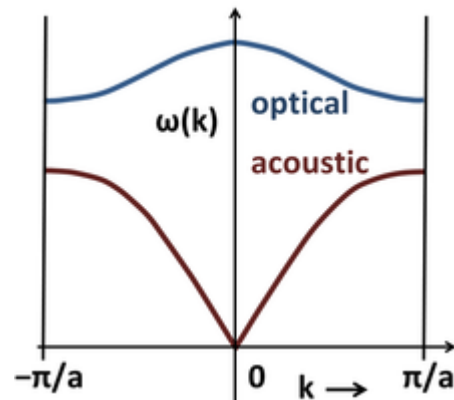
В последующих приближениях появляются различного рода процессы упругих и неупругих столкновений фононов. Эти столкновения и составляют механизм, приводящий к установлению теплового равновесия в фононном газе, то есть к установлению равновесного теплового движения в кристалле.



В кристалле могут распространяться:

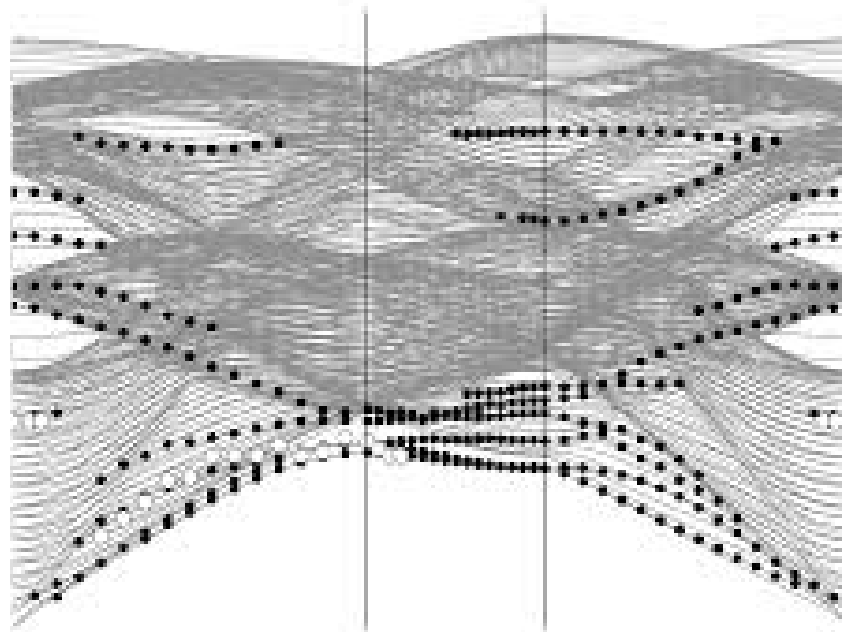
- Продольные волны сжатия-разрежения, когда смещения атомов происходят в направлении распространения волны
- Поперечные волны, когда колебания атомов происходят в направлении, перпендикулярном распространению

В твердом теле, состоящем из разных сортов атомов, наряду с **акустическими** волнами (так как они соответствуют распространению звука в твердом теле), могут распространяться **оптические** волны (так как колебания такого типа можно возбудить переменным электрическим полем, то есть световой волной)



Зависимость частоты фононов в GaAs от волнового вектора вдоль высоко-симметричных направлений зоны Бриллюэна

Количество ветвей на дисперсионном графике равно числу степеней свободы в элементарной ячейке.



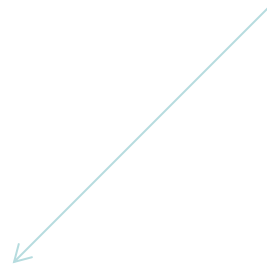
Фононный спектр системы Al(111) – Na (адсорбция замещения)  
Светлые кружки – эксперимент, темные - расчет

Знание фононных спектров необходимо для анализа и расчета многих оптических, тепловых, электрических и других свойств твердых тел.

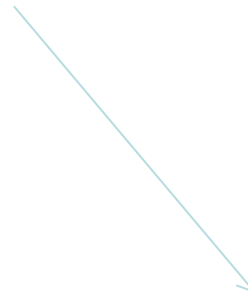
В экспериментах определяют дисперсионные кривые продольных и поперечных волн в направлениях высокой симметрии.

Затем эта информация используется для численного расчета плотности состояний .

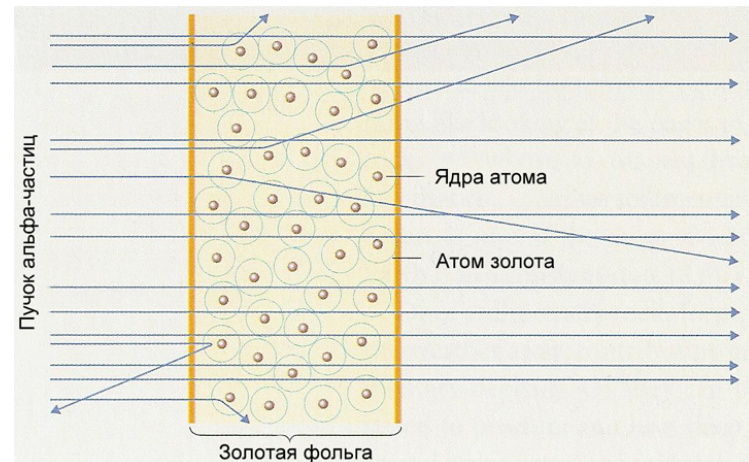
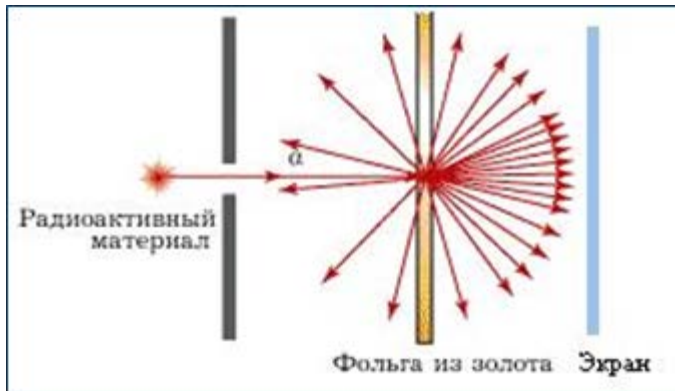
## Экспериментальные методы определения фононного спектра



**Нейтронография** - дифракционный метод изучения структуры материалов с помощью рассеивания нейтронов.



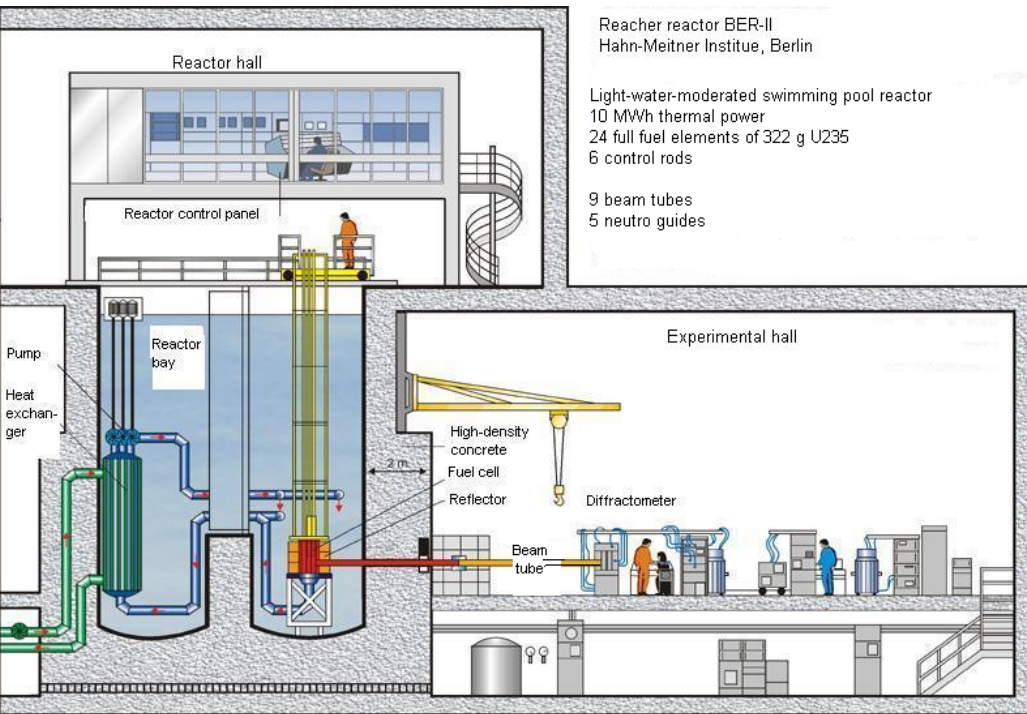
**Томсоновское рассеяние** - рассеяние электромагнитного излучения на заряженных частицах.



Механизм рассеяния **зависит** от размеров частицы!

# Нейтронोगрафия

**Деление ядра** — процесс расщепления атомного ядра на два (реже три) ядра с близкими массами, путем присоединения к исходному ядру нейтрона.



Деление тяжёлых ядер — экзотермический процесс, в результате которого высвобождается большое количество энергии в виде кинетической энергии продуктов реакции, а также излучения.

деление ядер нейтронами сопровождается испусканием нейтронов, что создаёт основу для протекания цепной реакции деления

Для получения дифракционных спектров используются тепловые нейтроны, получаемые в ядерных реакторах

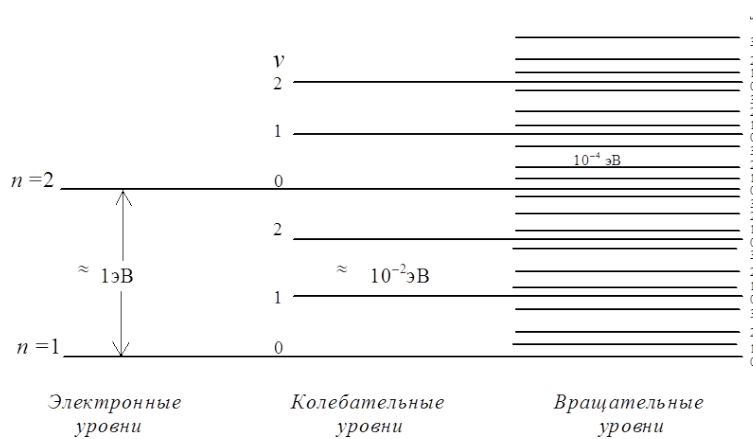
Исследуемый объект облучается пучком нейтронов, который рассеивается на атомах вещества. Для регистрации рассеяния используются нейтронные спектрометры, при помощи которых измеряется интенсивность рассеивания нейтронов в зависимости от угла дифракции, аналогично рентгеновской дифрактометрии.

# Электронные спектры

**Электронные спектры** – это спектры, обусловленные квантовыми переходами из одного электронного состояния молекулы в другое.

Переходы, при которых происходит поглощение кванта электромагнитного излучения, образуют электронные спектры **поглощения**.

Переходы, сопровождающиеся испусканием излучения, образуют электронные спектры **испускания**. Лежат в видимой и УФ – областях спектра.

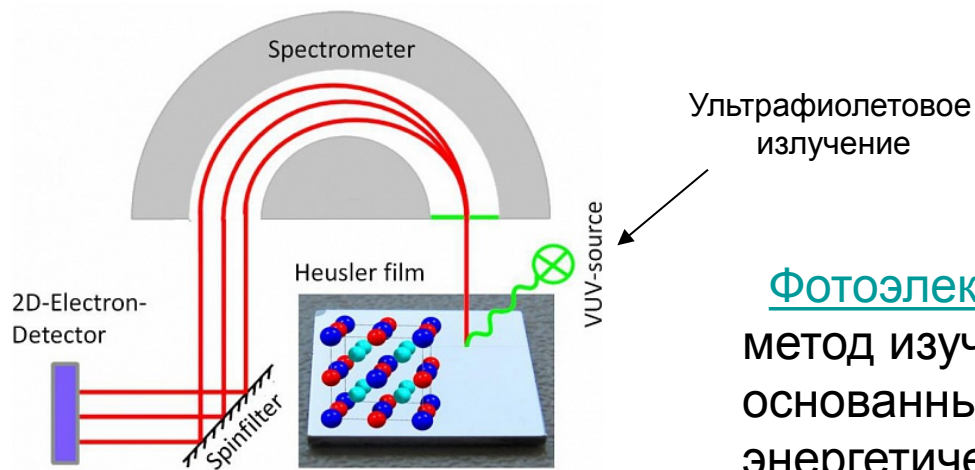


Состояние с  $M = 1$  ( $S = 0$ ) наз. синглетным (обозначается буквой S), состояние с  $M=2$  ( $S = 1/2$ ) - дублетным (D), состояния с  $M=3$  - триплетным (T) и т.д.

**Мультиплетность** электронного состояния  $M$  задается квантовым числом  $S$  результирующего электронного спина ( $M = 2S + 1$ )

## Виды электронной спектроскопии:

Фотоэлектронная спектроскопия  
Оже-спектроскопия  
Рентгеноспектральный микроанализ



Фотоэлектронная спектроскопия – это метод изучения строения вещества, основанный на измерении энергетических спектров электронов, вылетающих при фотоэлектронной эмиссии.



## Оже-спектроскопия

Электронная пушка



Когда электрон высокой энергии взаимодействует с атомом, он может выбить один из электронов внутренней электронной оболочки.

В результате на одной из внутренних оболочек атома (например К) возникает первичная вакансия, которая моментально (за  $10^{-15}$  с) заполняется электроном, перешедшим из другой оболочки атома (например М).

В результате возникает вторичная вакансия.

Энергия, выделяемая при таком переходе, может выделиться в виде выпущенного кванта характеристического **рентгеновского** излучения  $h\nu = E_K - E_M$  (радиационный переход), либо

передана электрону внешней оболочки атома (безызлучательный переход или оже-переход).

В этом случае электрон эмитируется в вакуум и регистрируется как **оже-электрон**.

Рентгеновское излучение появляется в результате двух главных процессов: эмиссии **характеристического излучения** (обусловленного переходами электронов между внутренними и внешними оболочками атома) и эмиссии **фонового, или тормозного излучения** (когда электрон падающего пучка испытывает торможение в электрическом поле атома.).

**рентгеноспектральный микроанализ** – это относительный метод, основанный на сравнении измеренной интенсивности рентгеновских линий, генерируемых в образце, с интенсивностями соответствующих линий в надлежащем стандартном образце известного состава



Определение энергии или длины волн эмитированного спектра позволяет сделать выводы об элементах, содержащихся в образце.

Рентгеновские фотоны обладают свойствами как частиц, так и волн. Для рентгеноспектрального анализа используется энергодисперсионный спектрометр (ЭДС), который сортирует фотоны по их энергии, Либо волнодисперсионный спектрометр (ВДС), использующий принцип разделения рентгеновского излучения по длинам волн.