

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Потоки заряженных частиц

Простейшим, во всяком случае в классификационном смысле, видом вещества является некоторая совокупность заряженных частиц — электронов и ионов. Мы встречаемся с системами заряженных частиц либо в виде пучков частиц, в которых все частицы имеют общую скорость и движутся в одном направлении, либо в виде газа хаотически движущихся частиц. Разумеется, возможны и промежуточные состояния. Сегодня мы рассмотрим основные физические явления и технические устройства, в которых мы имеем дело с пучками и с плазмой.

Потоки заряженных частиц

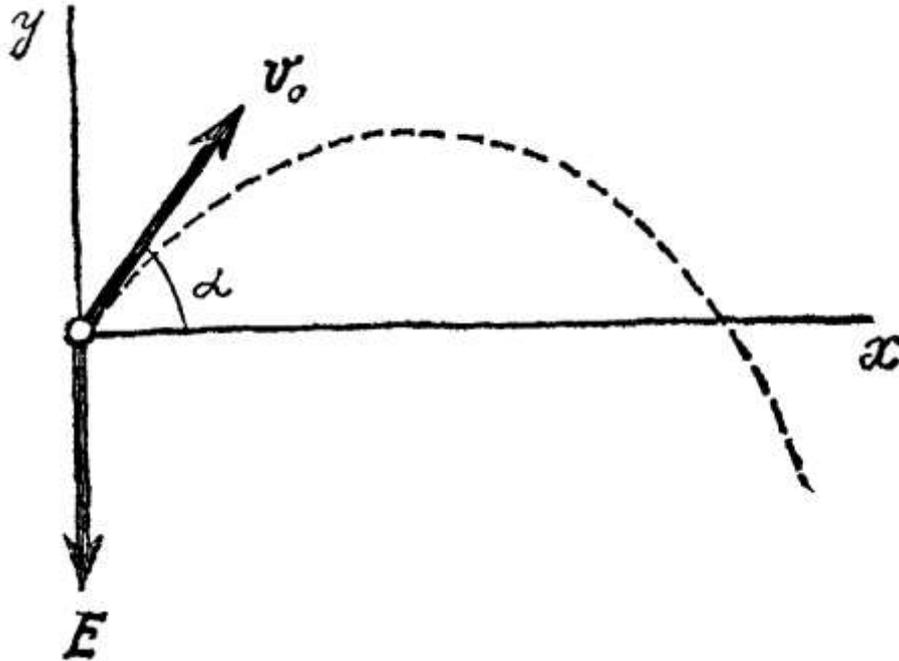
Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

Произвольное электромагнитное поле действует на заряженную частицу с силой $f = e\vec{E} + \frac{e}{c}[\vec{v}\vec{B}]$. Если поля \vec{E} и \vec{B} известны в функции координат и времени и даны начальная скорость и место нахождения частицы, то для частиц, движущихся со скоростями $v \ll c$, траектория частицы $r(t)$ может быть найдена с помощью основного закона механики

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{f}$$

Потоки заряженных частиц

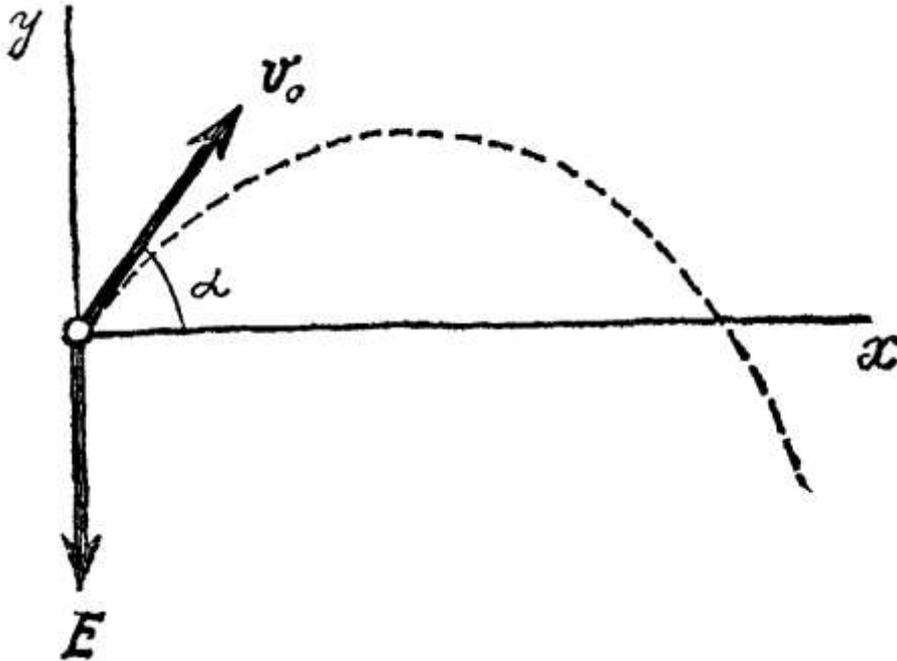
Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Решение такой задачи представляет обычно большие математические трудности. Для знакомства с закономерностями общего характера вполне достаточно рассмотреть движение заряда в однородном поле.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Частица в электрическом поле.

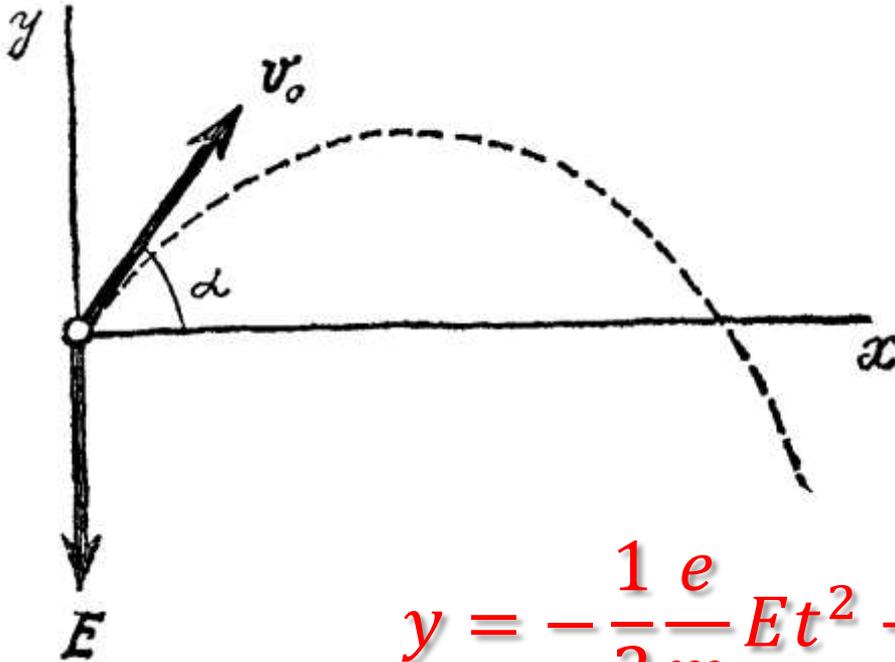
Частица входит в поле под углом $90^\circ + \alpha$. При выборе координат, указанном на рисунке, уравнения движения

ИМЕЮТ ВИД

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{e}{m}E, \quad \frac{dv_x}{dt} = 0.$$

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Отсюда

$$v_y = -\frac{e}{m}Et + v_{0y}, v_x = v_{0x}$$

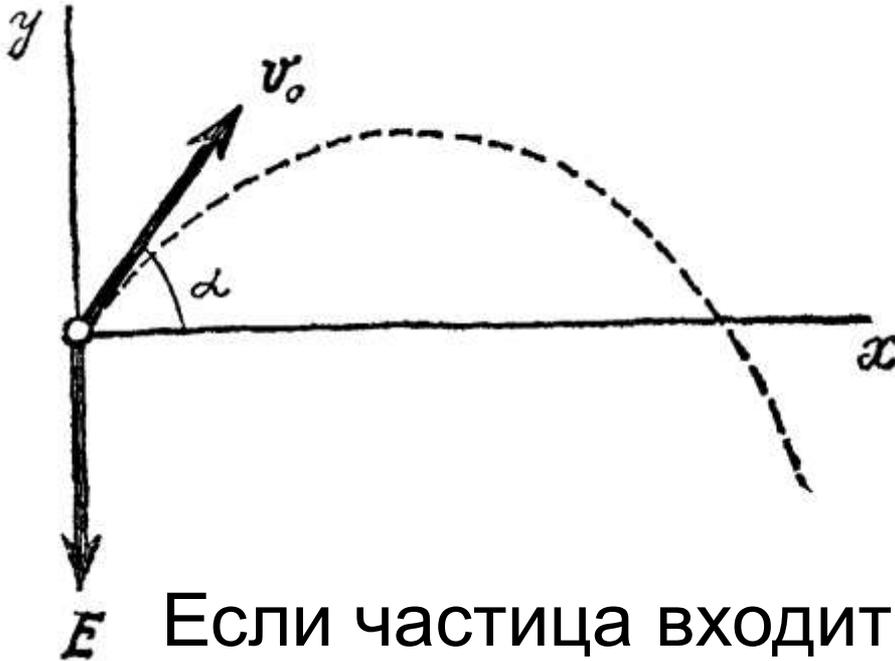
Интегрируя еще раз, получим, полагая $x=0$ при $t=0$:

$$y = -\frac{1}{2}\frac{e}{m}Et^2 + v_{0y}t, \quad x = v_{0x}t.$$

Исключая время, найдем уравнение параболы, которую будет описывать электрический заряд (пунктир на рисунке).

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



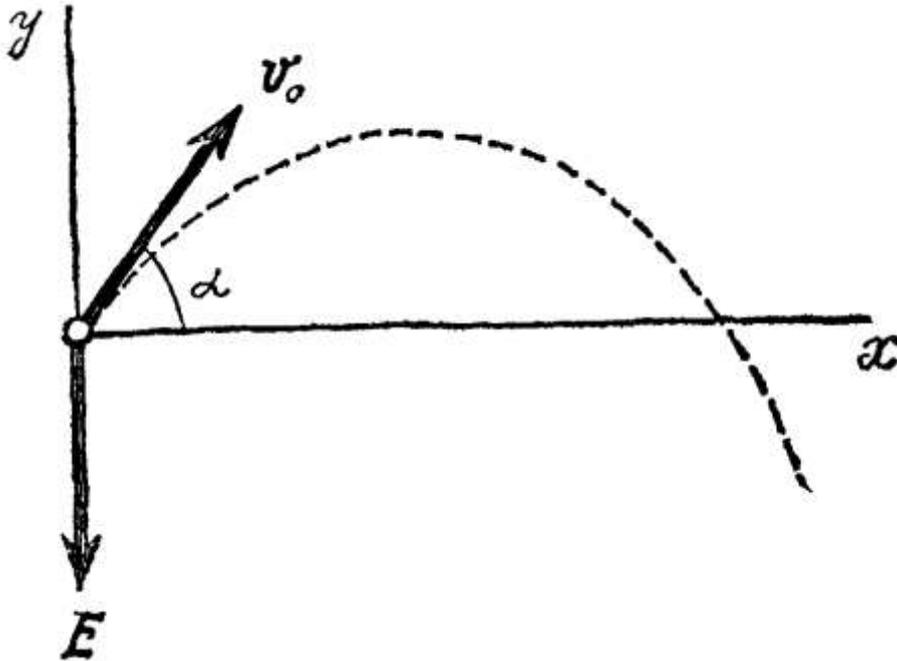
Если частица входит в поле под прямым углом ($v_{0y}=0$), то уравнение траектории имеет вид

$$y = -\frac{1}{2} \frac{e}{m} E \frac{x^2}{v_0^2} .$$

Если частица входит в поле вдоль силовой линии, то она и будет продолжать движение вдоль силовой линии с ускорением $\frac{e}{m} E$.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

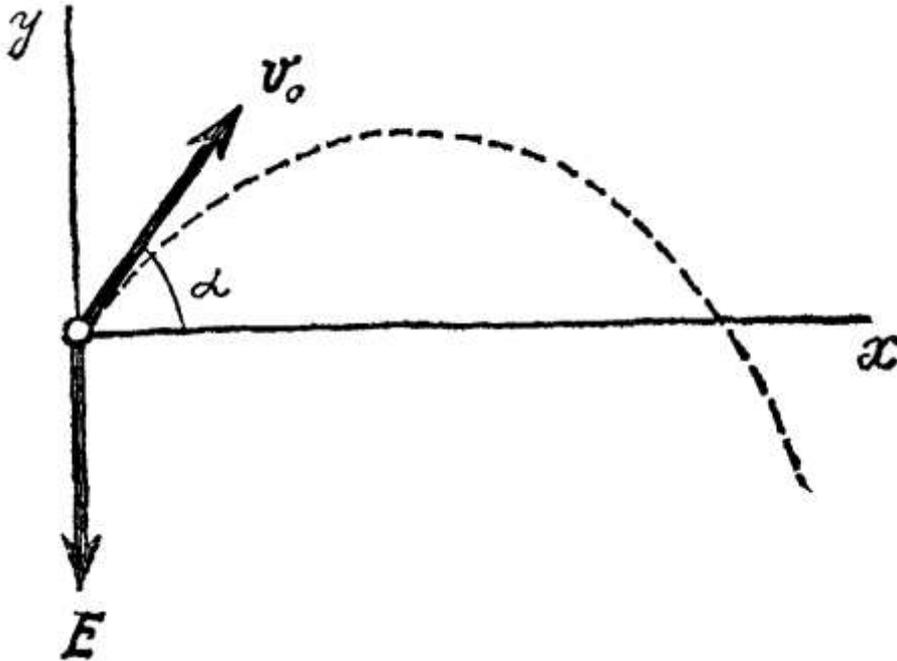


Обозначая разность потенциалов точек начала и конца движения заряженной частицы через V , получим с помощью уравнения кинетической энергии

$$eV = \frac{m}{2} (v^2 - v_0^2).$$

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Если конечная скорость $v \gg v_0$, то

$$eV = \frac{m}{2} v^2$$

и

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} V} .$$

Это уравнение делает понятным распространённость единицы энергии **электрон-вольт**: $1\text{эВ} = 1,63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,63 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

Это - работа, необходимая для ускорения электрона напряжением 1 В. Единица «электрон-вольт» удобна в тех случаях, когда энергии относят к одной элементарной частице. Работа ионизации, вырывания электрона, выхода электрона из металла — все эти величины имеют порядок единиц и десятков электрон-вольт.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

Частица в магнитном поле. Особенности силы, действующей на заряженную частицу в магнитном поле, нам известны. Пусть частица вошла в поле с начальной скоростью v_0 . Разложим этот вектор на составляющие вдоль и поперек поля, v_{\parallel} и v_{\perp} . Тогда для движения в плоскости, перпендикулярной к полю, имеем

$$ma = \frac{e}{c} v_{\perp} B .$$

Продольное движение будет происходить равномерно с неизменной скоростью v_{\parallel} .

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

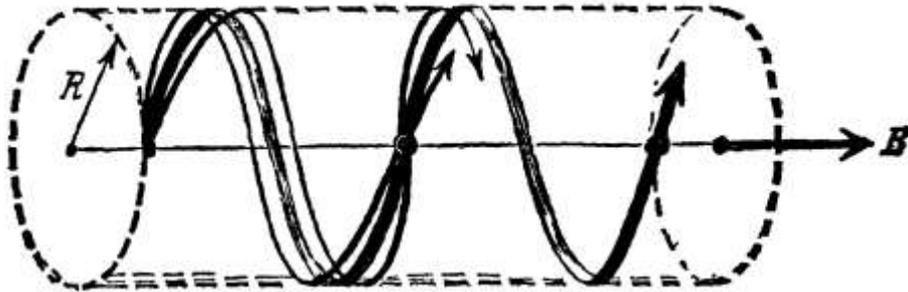
Движение в перпендикулярной плоскости — круговое, $a = v^2/R$ есть центростремительное ускорение. Таким образом,

$$\frac{e}{c} v_{\perp} B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$$

откуда радиус окружности $R = \frac{mv_{\perp}c}{eB}$ прямо пропорционален скорости частицы и обратно пропорционален магнитной индукции. Полезно запомнить, что угловая скорость обращения около силовой линии $\omega = \frac{eB}{mc}$ у частиц данного сорта в заданном поле будет одинаковой, независимо от скорости частиц.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Если частица вошла в поле под углом к направлению поля, то она будет двигаться по

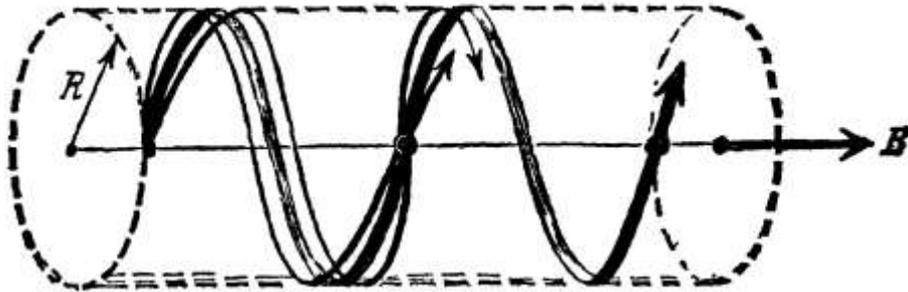
спирали с радиусом витка R и с частотой ω .

Проекция скорости на направление силовых линий v_{\parallel} позволит найти шаг спирали:

$$z = T v_{\parallel} = \frac{2\pi}{\omega} v_{\parallel} = \frac{2\pi m c}{e B} v_{\parallel} .$$

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях



Величина $v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha$,
где α — угол начальной скорости с полем, с большой точностью

постоянна при угле разброса начальных скоростей до 10° (при этом значения v_{\parallel} будут различаться не более чем на 1%). А это значит, что через каждые z сантиметров расходящийся в таких пределах пучок заряженных частиц будет фокусироваться на образующей цилиндра, проходящей через точку входа частиц в поле.

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

Пример. Пусть электрон разгоняется напряжением $V=300$ В и входит в магнитное поле с индукцией $B=0,05$ Тл под углом $\alpha=30^\circ$. Скорость электрона

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 300}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 10^7 \text{ м/с}$$

Полезно отметить, что $\frac{v_0}{c} = \frac{1}{30}$, поэтому вводить в расчет релятивистские поправки не имеет смысла.

$$v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha = 0,87 \cdot 10^7 \text{ м/с} ,$$
$$v_{\perp} = \sin \alpha 0,5 \cdot 10^7 \text{ м/с} .$$

Потоки заряженных частиц

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях

Радиус цилиндра, на который навивается спиральная траектория электрона,

$$R = \frac{mv_{\perp}c}{eB} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Угловая скорость

$$\omega = \frac{eB}{mc} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,89 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$$

Шаг спиральной траектории

$$z = v_{\parallel}T = 0,87 \cdot 10^7 \cdot \frac{2\pi}{0,89 \cdot 10^{10}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

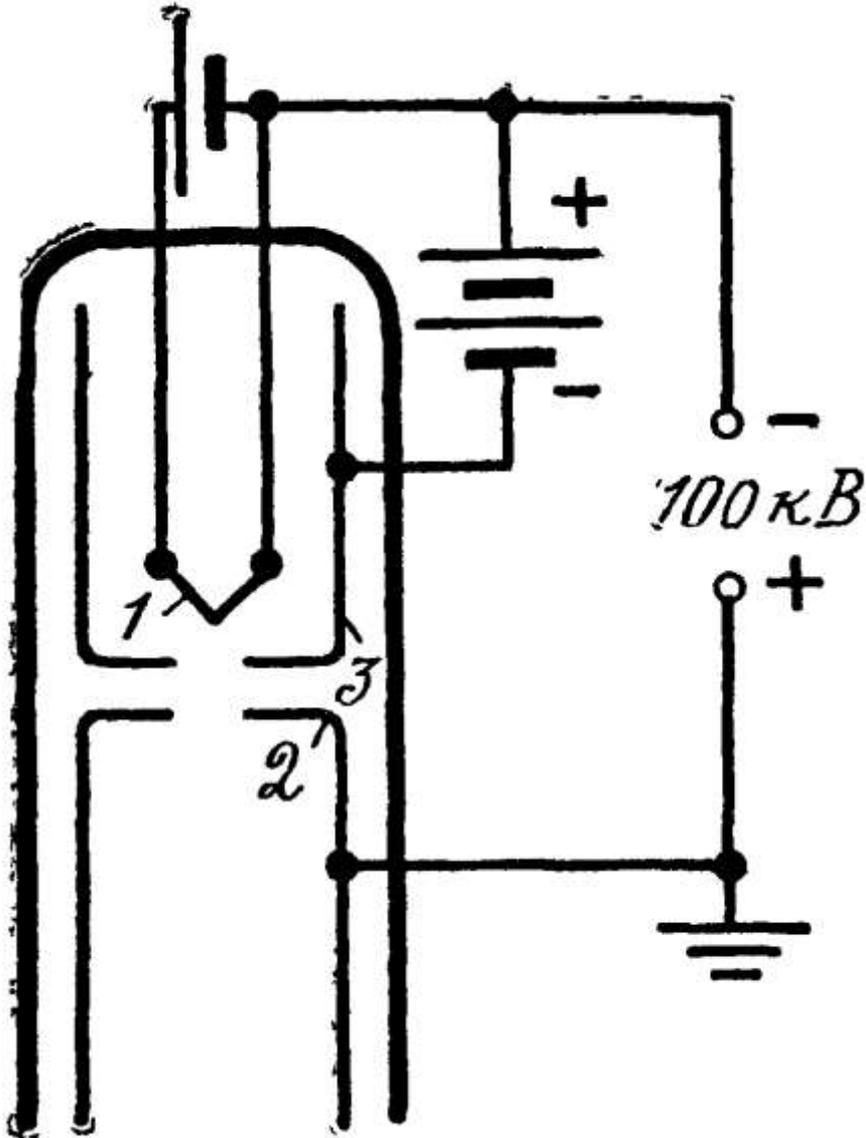
Потоки заряженных частиц

Получение пучков заряженных частиц

В газоразрядной трубке навстречу друг другу движутся потоки электронов и положительных ионов. Чтобы получить ионный луч, т.е. пучок ионов, движущихся в одном направлении, можно сделать отверстие (канал) в катоде. Большая часть ионов, прошедших отверстие, далее будет двигаться по инерции. Эти пучки под именем каналовых или закатодных лучей были известны физикам еще в XIX веке. Подобный способ получения ионного потока сохраняет свою актуальность и сейчас. Вещество переводится в газообразное состояние, молекулы его ионизируются и далее положительные ионы выводятся через канал из газоразрядного объема.

Потоки заряженных частиц

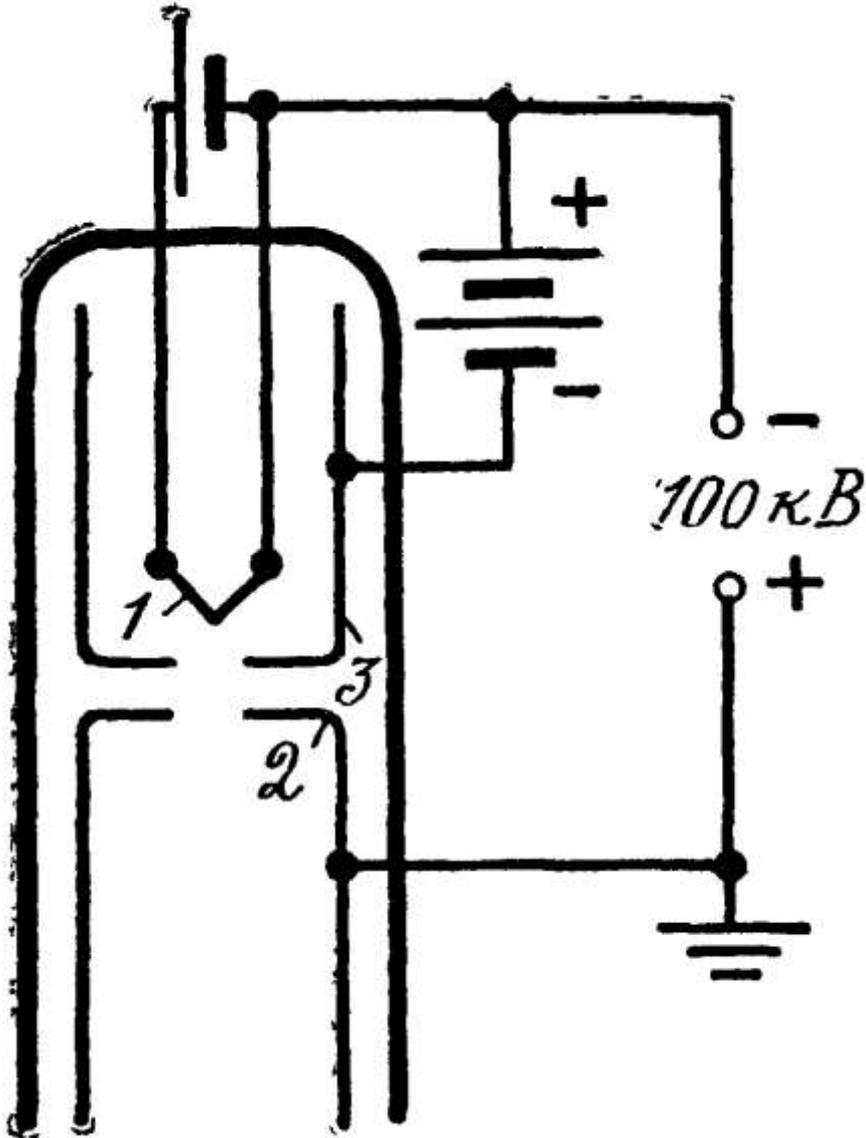
Получение пучков заряженных частиц



Для получения электронного луча газовый разряд не используется. Его источником служит так называемая электронная пушка - устройство, использующее явление термоэлектронной эмиссии. Как известно, раскаленные металлы могут служить источником электронов.

Потоки заряженных частиц

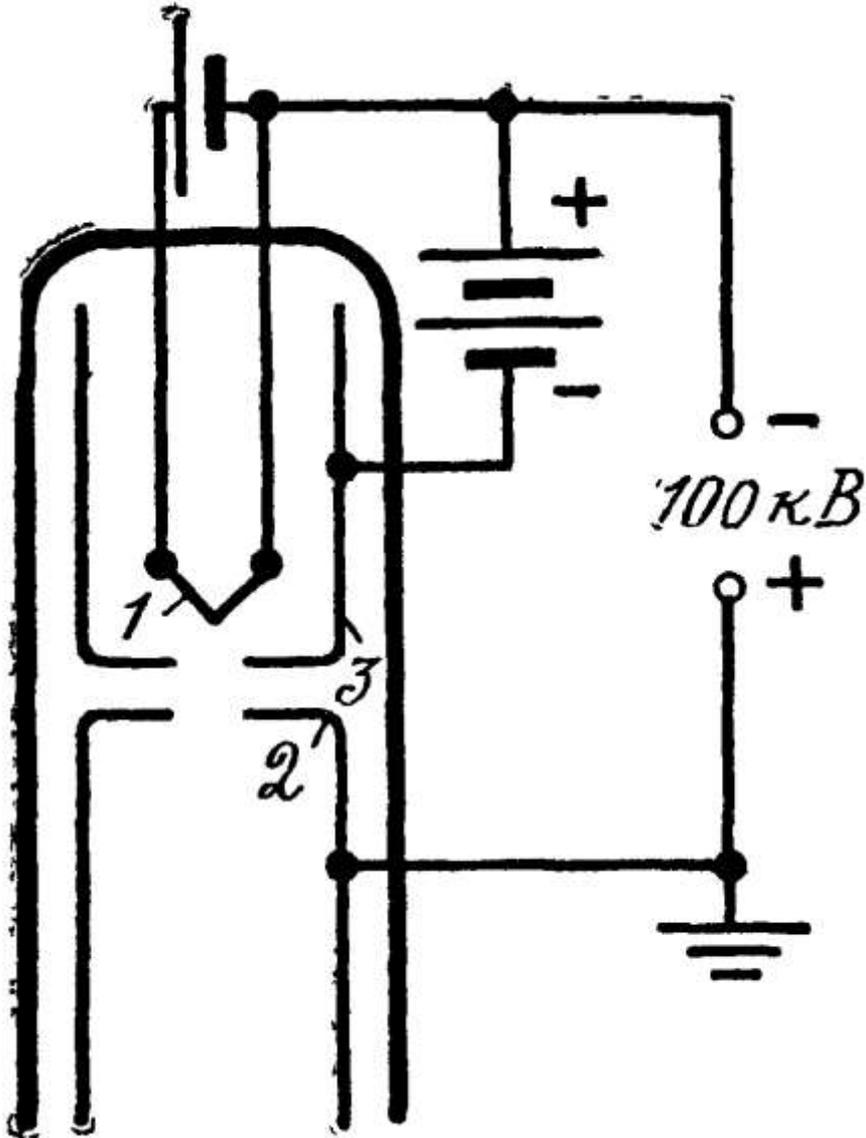
Получение пучков заряженных частиц



Так, 1 см^2 поверхности вольфрама, нагретого до $2400 \text{ }^\circ\text{C}$, дает в 1 с число электронов, соответствующее току силой в 1 А. На электроды подается напряжение, ускоряющее электроны. Катодом служит накаливаемая током вольфрамовая нить 1. Анод 2 имеет форму стакана с круглым отверстием в дне.

Потоки заряженных частиц

Получение пучков заряженных частиц



Электроны выходят из этого отверстия в виде пучка, расходимость и ширина которого определяются отверстием. Фокусировка электронного пучка (фокусирующий электрод 3) позволяет получать сильные и тонкие пучки электронов.

Потоки заряженных частиц

Получение пучков заряженных частиц

Большое техническое значение имеет проблема получения электронного пучка максимальной интенсивности при данной затрате энергии.

Чтобы использовать все электроны, испускаемые нитью, необходимо, прежде всего, ускорять электроны достаточно высоким напряжением. Нить испускает определенное число электронов в единицу времени. Все эти электроны должны удаляться от нити. Если напряжение мало, то около нити образуется электронное облако, которое будет препятствовать эмиссии. По мере увеличения напряжения облако постепенно рассасывается и термоэлектронный ток растет.

Потоки заряженных частиц

Получение пучков заряженных частиц

При некотором напряжении электронное облако уже не образуется. Дальнейшее увеличение напряжения уже не приведет к нарастанию термоэлектронного тока — мы достигли тока насыщения.

При этом условии и должна работать электронная пушка. Итак, достаточное напряжение обеспечит отвод от нити всех ее электронов.

Далее встает задача увеличить выход электронов. Торированные и оксидные катоды по эмиссионным свойствам намного эффективнее вольфрамовых.

Потоки заряженных частиц

Получение пучков заряженных частиц

Торированный катод — это вольфрамовая проволока, покрытая тончайшей пленкой металлического тория. Тот ток, который чистый вольфрам дает при 2400°C , торированный вольфрам дает при 1500°C . Оксидный катод состоит из металлической подложки, на которую нанесен слой окислов щелочноземельных металлов. Этот катод уже при 900°C дает ток, получаемый от вольфрама при 2400°C .

В современных электронных приборах оксидный катод применяется с косвенным подогревом: катод изготавливается в виде трубочки, внутрь которой вставляется вольфрамовая спираль, разогреваемая током.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы

Электрические и магнитные поля позволяют управлять электронным пучком. Однако их действие не ограничивается возможностями отклонения пучка от первоначального направления. При помощи различных полей можно параллельный пучок электронов сделать сходящимся или расходящимся, можно расходящийся из одной точки пучок свести в другую точку. Весьма простые системы полей позволяют изготовить «линзы» для электронного пучка. Этими вопросами занимается большая область науки — электронная оптика, одним из наиболее существенных достижений которой является, например, электронный микроскоп.

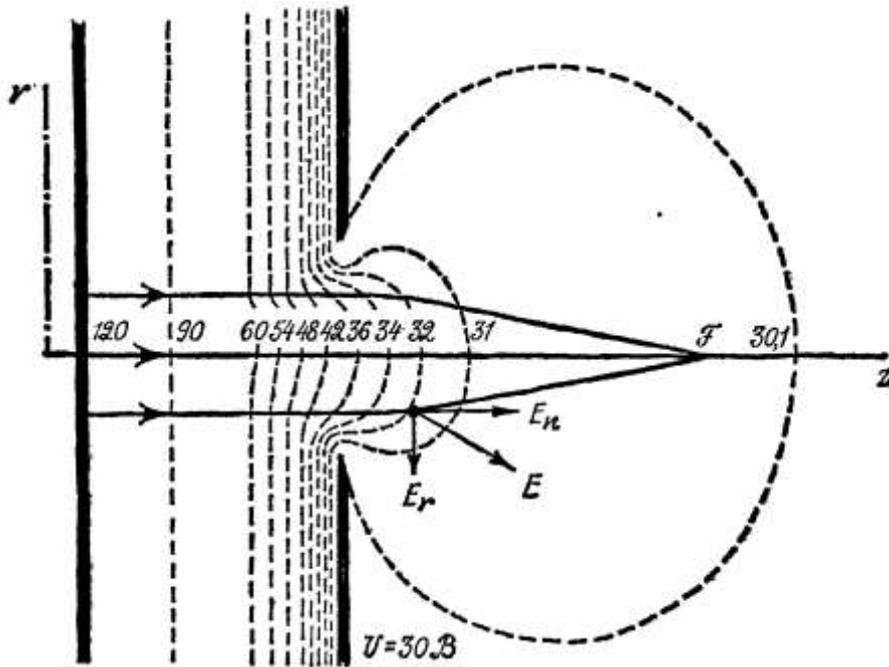
Электронные линзы

Роль линз с успехом могут выполнять электрические и магнитные поля с осевой симметрией. Такие поля можно получить от заряженных пластинок с круглым отверстием, от цилиндрических конденсаторов, витков тока и плоских катушек. Существует большое число систем, ведущих себя как линзы по отношению к электронному лучу. Нам достаточно для пояснения идеи рассмотреть один пример электрической линзы и один пример магнитной линзы.

В качестве примера электрической линзы возьмем конденсатор, в одной из пластин которого сделано круглое отверстие.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы

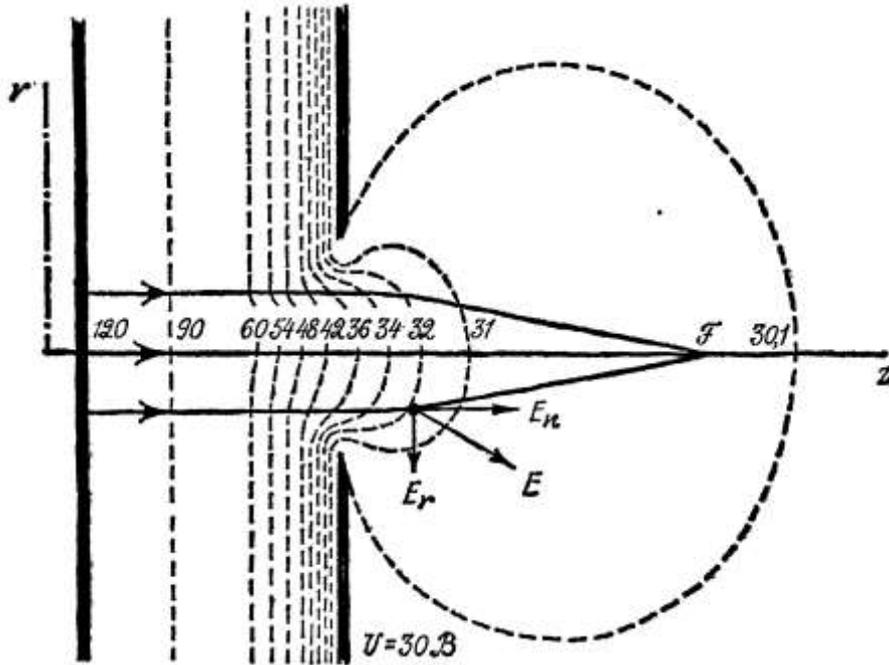


Если электронный пучок будет падать на это отверстие со стороны однородного поля, то он будет фокусироваться. Действительно, когда электрон попадет в область неоднородного

поля, то на него будет действовать сила, перпендикулярная к эквипотенциальным поверхностям и, следовательно, образующая угол с осью симметрии.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы

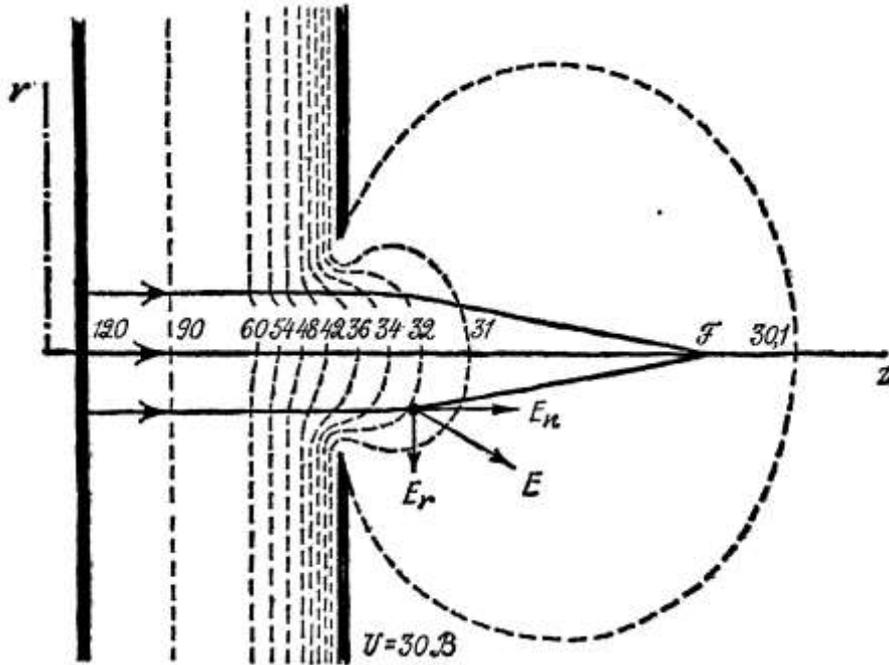


Раскладывая эту силу на две, мы видим, что имеется радиальная составляющая, прижимающая электроны к оси. Однако этого было бы недостаточно, чтобы рассмотренная система

играла роль линзы. Нужно еще, чтобы радиальная составляющая поля была пропорциональна расстоянию между осью симметрии и точкой попадания электрона в плоскость отверстия.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы



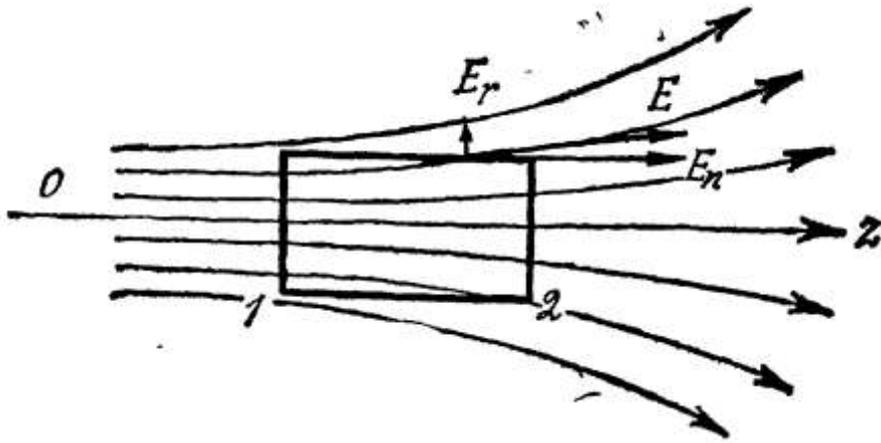
Несложный вывод показывает, что так оно и есть. Радиальная составляющая напряженности электрического поля может быть представлена в виде

$$\vec{E}_r = -\frac{1}{2} \frac{dE}{dz} \vec{r},$$

где $\frac{dE}{dz}$ — градиент напряженности вдоль оси симметрии.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы



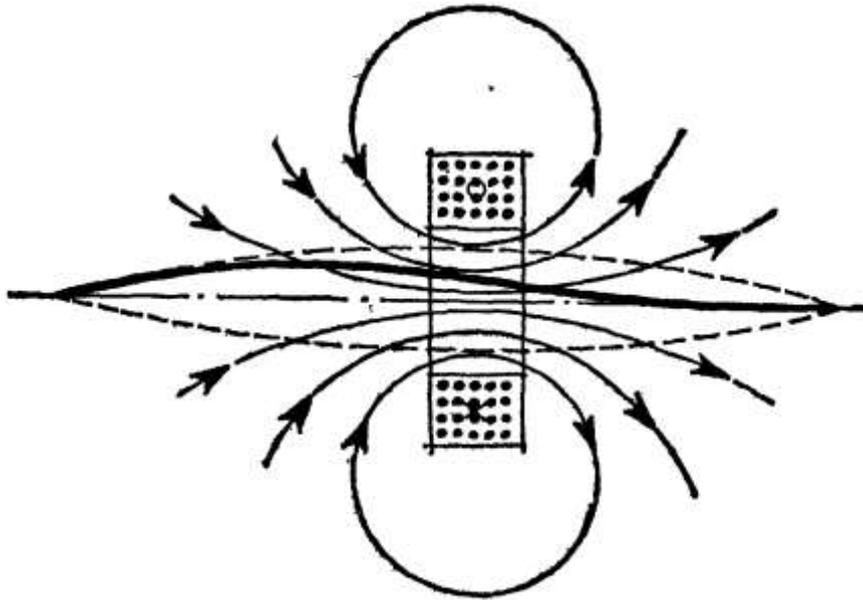
Для доказательства рассмотрим маленький цилиндр, расположенный, как показано на рисунке (расстояние 1-2 считаем

бесконечно малым). Так как внутри цилиндра зарядов нет, то разность потоков через основания 1 и 2, $\pi r^2 dE$, должна равняться потоку через боковую поверхность $E_r \cdot 2\pi r dz$ с обратным знаком.

Таким образом, отверстие в заряженной пластине играет роль линзы для электронного луча.

Потоки заряженных частиц

Электронные линзы

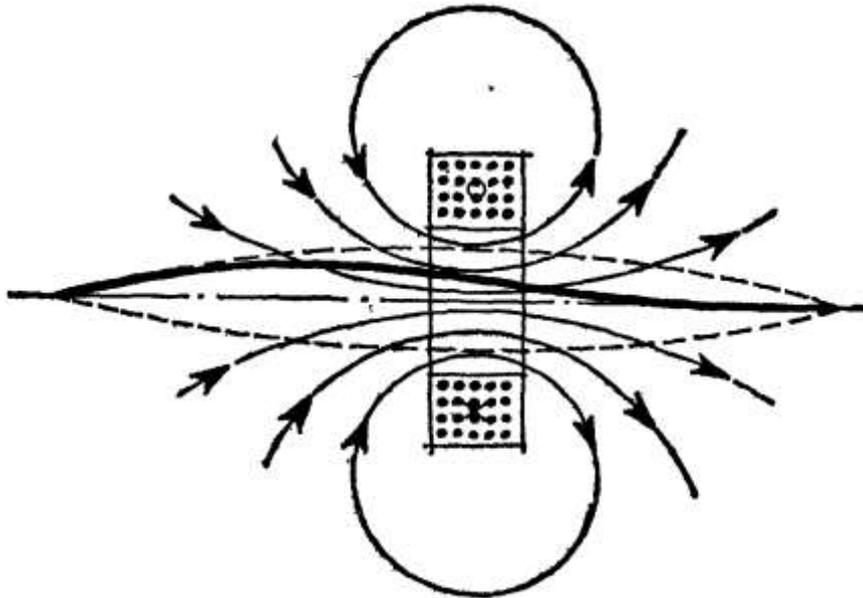


Рассмотрим теперь поведение электронных лучей, проходящих через плоскую катушку с током. Такая катушка является магнитной линзой.

Электроны движутся по

спирали и возвращаются на ось симметрии, сделав виток спирали. Фокусирующие свойства катушки несомненны. Можно доказать, что угол отклонения луча пропорционален расстоянию этого луча от оси симметрии.

Электронные линзы



Магнитная катушка меняет азимут электронной траектории, значит, изображение предмета в такой линзе будет повернуто. Однако и этот поворот не искажает

электронно-оптического изображения.

Итак, если предмет рассеивает или излучает электронные лучи, то, поставив по ходу этих рассеянных электронов электрическую или магнитную линзу, мы можем получить «электронное изображение» предмета.

Электронные линзы

Если в плоскость изображения поставить фотопластинку или светящийся экран, то возникнет своеобразная «картина» предмета, яркая в тех точках, которые излучают или рассеивают много электронов, темная в тех местах, которые соответствуют отсутствию рассеяния и излучения в предмете. Так как можно построить системы электронных линз, дающие увеличенное изображение предмета, то становится возможным осуществление электронного микроскопа.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Электронный микроскоп, т.е. такой микроскоп, в котором роль лучей света играют электронные лучи, обладает исключительными, еще до конца не исчерпанными возможностями непосредственного «разглядывания» объекта. Дело заключается в том, что возможности увеличения объекта, рассматриваемого в электронном микроскопе, вообще говоря, неограниченны. В то же время оптический микроскоп может дать увеличение не более чем в 2000—3000 раз.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Чтобы понять причины этого различия, нам нужно познакомиться с понятием *разрешающей способности* микроскопа. Вопрос ставится следующим образом: каковы условия раздельного видения двух близких точек?

Представим себе, что перед щелью или круглым отверстием находится идеальный точечный источник света. После того как свет пройдет через отверстие, возникнет дифракционная картина. Линза, поставленная позади отверстия, не соберет лучи в одну точку.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Вместо нее возникнет размытый кружок (или полоса, смотря по тому, идет ли речь о круглом отверстии или щели), окруженный чередующимися темными и светлыми кольцами. Мы вычисляли величину этого размытия. Радиус диска, которым изобразится точка после дифракции от отверстия диаметром D на расстоянии f от него, равен $1,22\lambda f / D$.

Каждый оптический прибор обязательно имеет входное отверстие — объектив. Дифракция на объективе неизбежна, и любая светящаяся точка в фокальной плоскости прибора расплывается в светлый кружок.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Угловой размер радиального размытия равен $1,22\lambda/D$, таким образом, линейные его размеры в фокальной плоскости будут $1,22\lambda f/D$. Здесь f и D имеют смысл фокусного расстояния и диаметра объектива. Строго говоря, для микроскопа эта формула дает лишь порядок величины, так как предмет близок к объективу и пучок лучей нельзя считать параллельным. Однако мы не станем вдаваться в детали, так как нам интересны лишь качественные оценки.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Если две светящиеся точки, которые наблюдаются в микроскоп, настолько близки, что светлые диски их изображений перекрываются, то раздельное видение этих двух точек становится невозможным.

В микроскопических наблюдениях предельное линейное разрешение равно $1,22\lambda f / D$. Так как отношение фокусного расстояния к диаметру объектива не может быть сделано существенно меньше единицы, то микроскоп позволяет разглядеть две точки, которые находятся на расстоянии порядка длины волны.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Таким образом, при наблюдении в оптическом диапазоне (длина волны около 0,5 мкм) мы можем разглядеть у объекта детали не мельче микронных размеров.

Какое же полезное увеличение дает оптический микроскоп? Представим себе, что некоторое изображение рассматривается при помощи окуляра, фотографируется, затем опять рассматривается с помощью окуляра и т.д. Совершенно ясно, что таким способом можно добиться сколь угодно большого увеличения.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Однако увеличение теряет всякий смысл после того, как на полученной фотографии можно будет увидеть предельно разрешимые точки. Таким образом, если фотография, полученная на оптическом микроскопе, увеличена до такой степени, что одному микрону соответствует 0,5 - 1 мм, то это предел полезного увеличения. Как мы видим, для микроскопа он лежит около 1 - 2 тысячи.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Электронный луч также обладает свойствами волны, длина которой выражается формулой

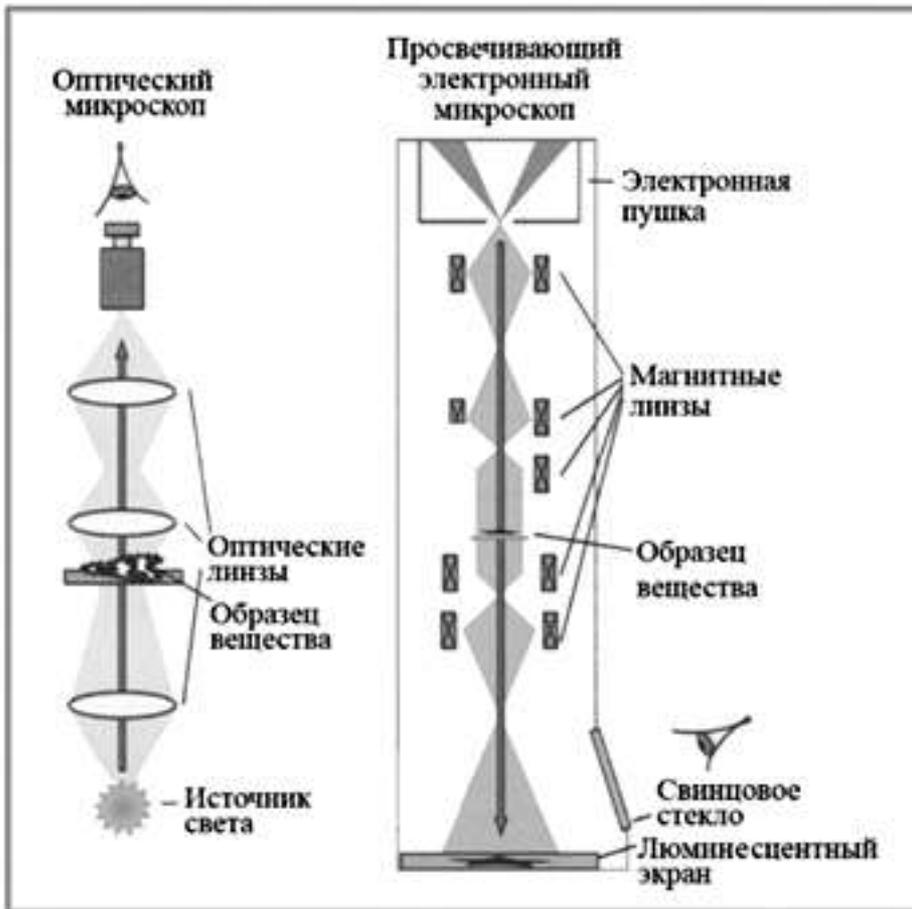
$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

где h — постоянная Планка, m — масса и v — скорость электрона. При напряжении 50 000 В длина волны равняется 0,05 Å. Того же порядка должна быть и разрешающая способность. Но расстояние между атомами больше 1 Å. Таким образом, предельные возможности электронного микроскопа с разрешающей способностью не связаны.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

В настоящее время с помощью электронных микроскопов можно добиться увеличения в 90 млн.



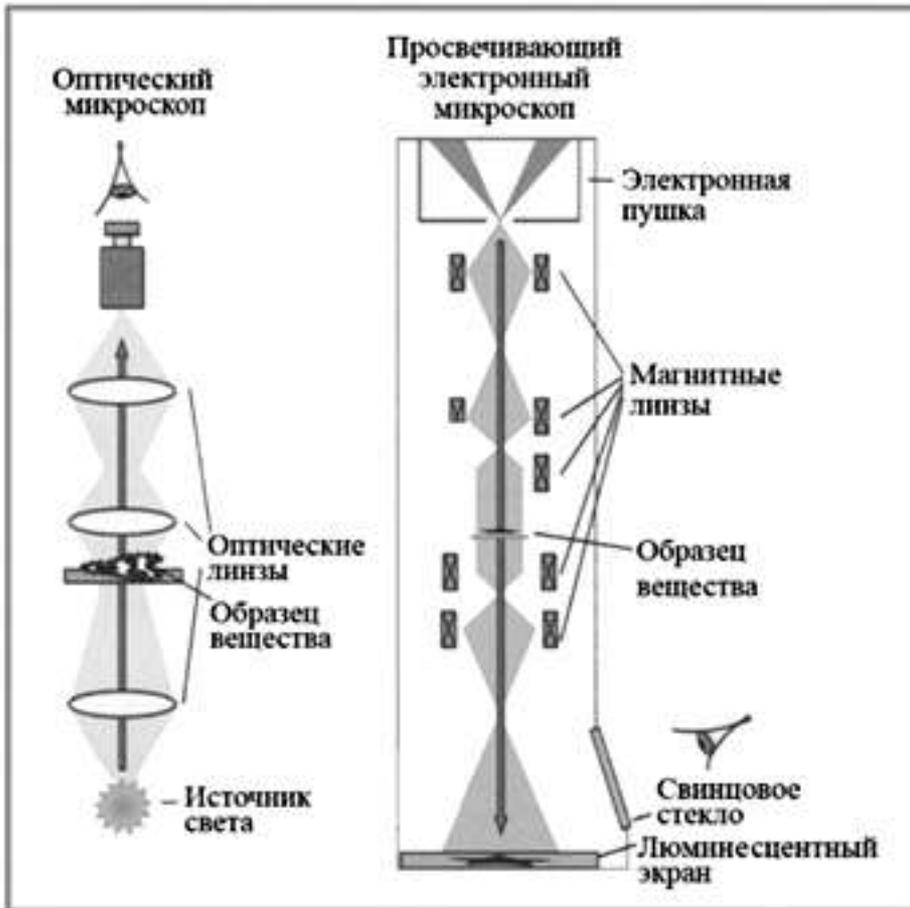
раз и пространственного разрешения в 0,06 нм, что меньше размера большинства атомов.

Устройства оптического и электронного микроскопа имеют много общего.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Они состоят из источника излучения, системы фокусировки излучения на изучаемом объекте



и регистрирующего устройства – детектора. В электронном микроскопе в качестве источника электронов используется электронная пушка, для фокусировки пучка электронов применяют электромагнитные линзы, а в качестве детектора – люминесцентный экран.

Потоки заряженных частиц

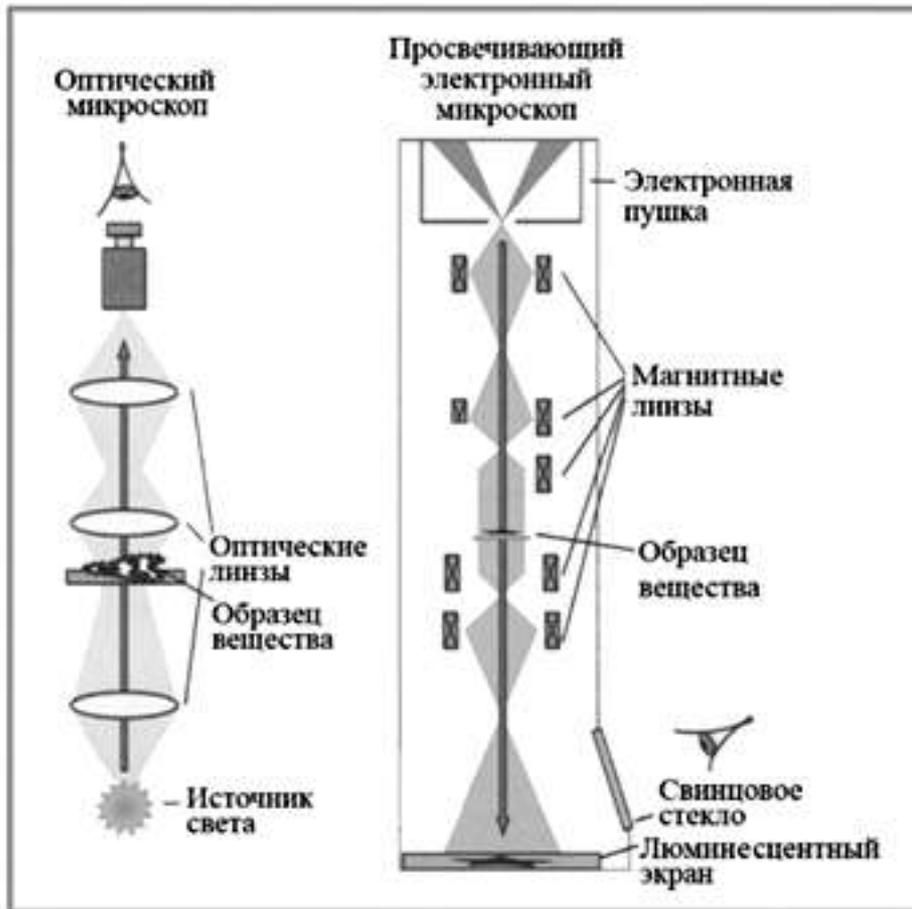
Электронный микроскоп

Главное различие (впрочем, не принципиальное) состоит в том, что электронно-оптические линзы представляют собой устройства с непрерывно меняющимся «показателем преломления», так как электрические или магнитные поля меняются в электронных линзах не скачком (как показатель преломления на границе стеклянной линзы), а непрерывно.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

По методике измерения различают просвечивающие и сканирующие (растровые) электронные

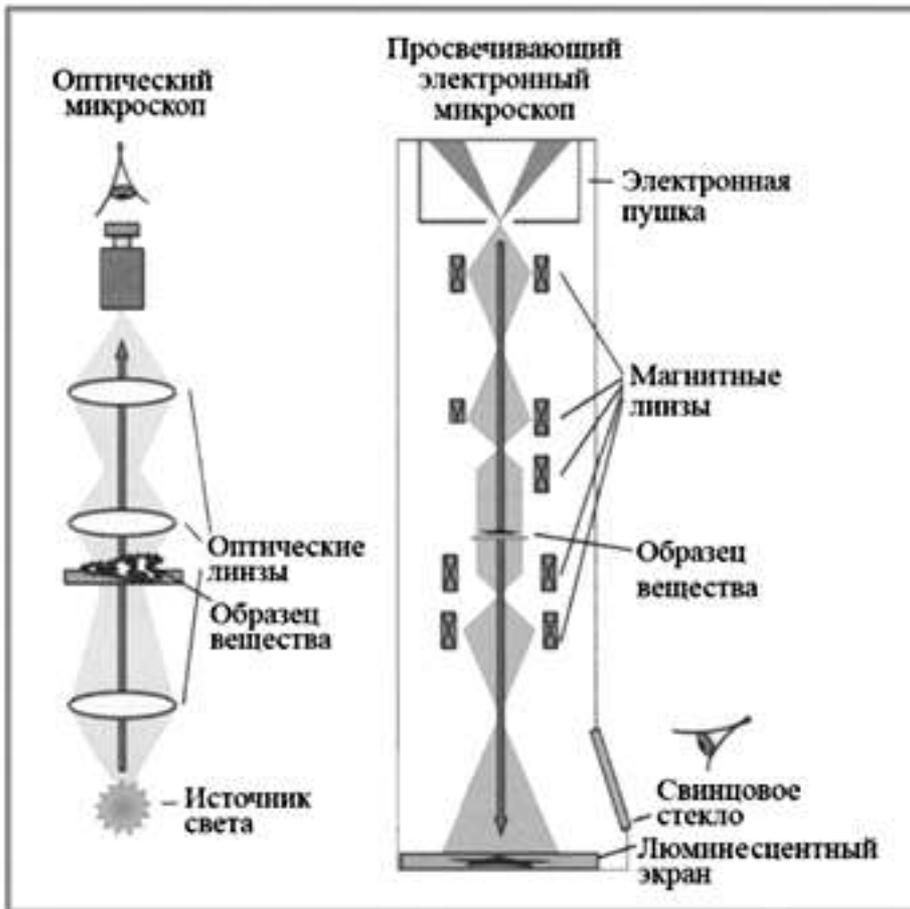


микроскопы. Они дают различную информацию об объекте и часто используются совместно. В *просвечивающем электронном микроскопе* (ПЭМ) пучок электронов проходит через очень тонкий (<100 нм) слой вещества.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

При этом он дает информацию о внутренней микроструктуре образца. Микроскоп представляет

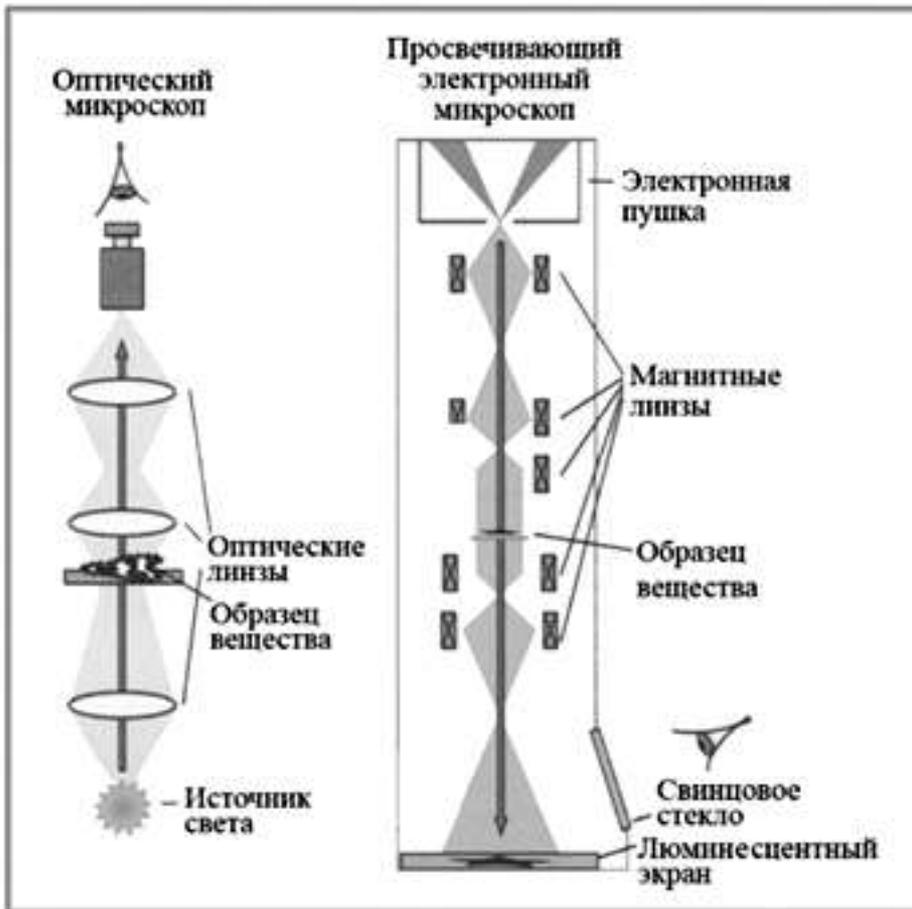


собой устройство, состоящее из длинной широкой трубы – электронной пушки, конденсора (электронная линза) и люминесцентного экрана, соединенного с фотокамерой или компьютером, на котором и возникает изображение.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Объект помещают на предметный столик не в виде куска, а в форме пленки или тонкого среза.



При работе микроскопа объект просвечивают пучком электронов. Часть электронов, взаимодействуя с атомами вещества, отклоняется, попадая в системы магнитных линз, которые и формируют на люминесцентном экране изображение внутренней структуры объекта.

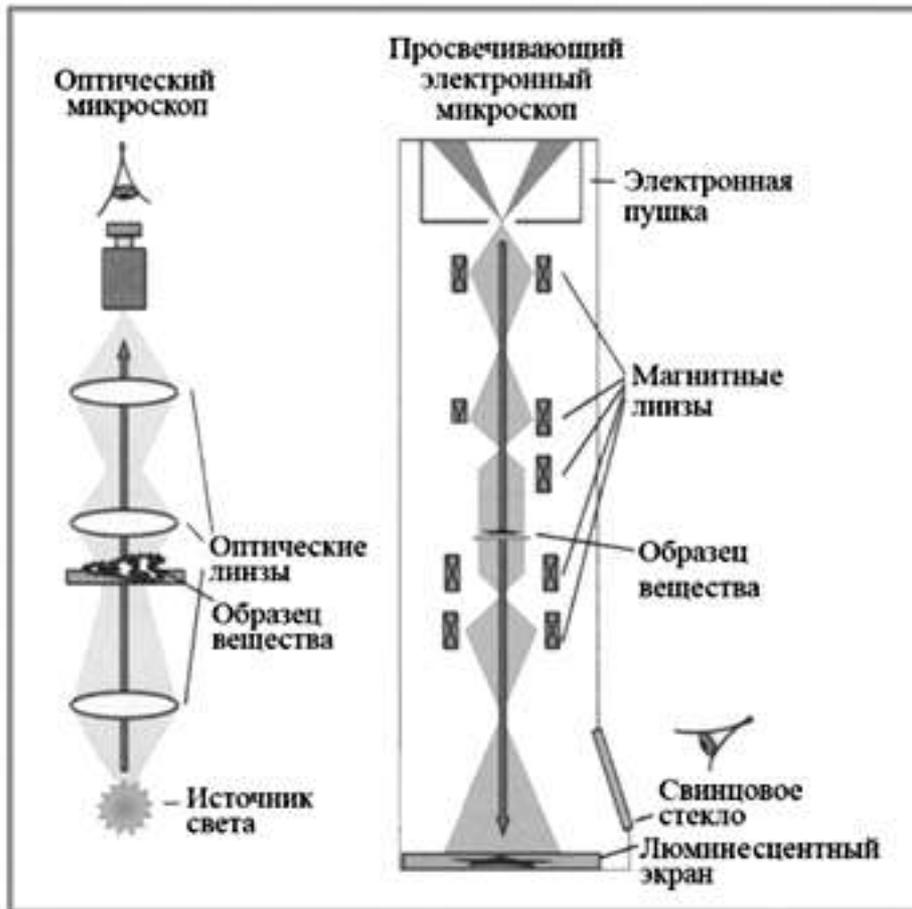
Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

Рассеянные электроны задерживают при помощи диафрагм, позволяющих регулировать

контрастность изображения.

Заметим, что все микрофотографии по сути своей черно-белые, они не способны передавать цвет.



Потоки заряженных частиц

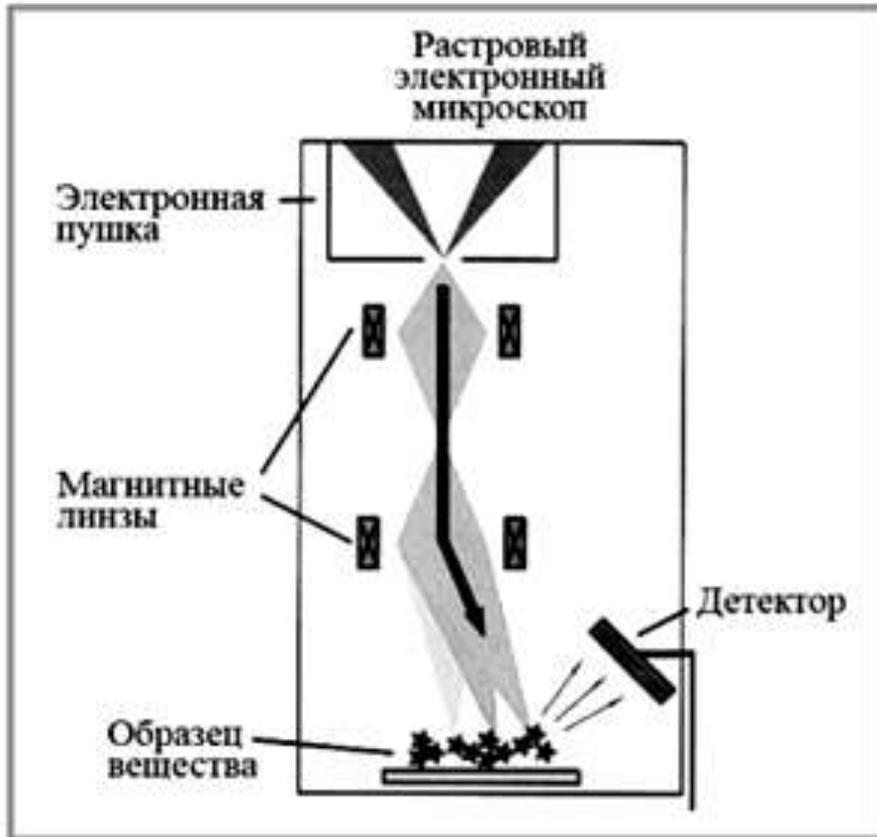
Электронный микроскоп

Поскольку электроны поглощаются молекулами, входящими в состав воздуха, то в пространстве, через которое проходит электронный пучок в микроскопе, создают вакуум. Образец также помещают в отсек, который вакуумируют, т.е. откачивают из него воздух специальным насосом. Электронный микроскоп – очень дорогое оборудование, он доступен лишь крупным исследовательским лабораториям.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

В отличие от просвечивающих, *сканирующие электронные микроскопы* (СЭМ) строят

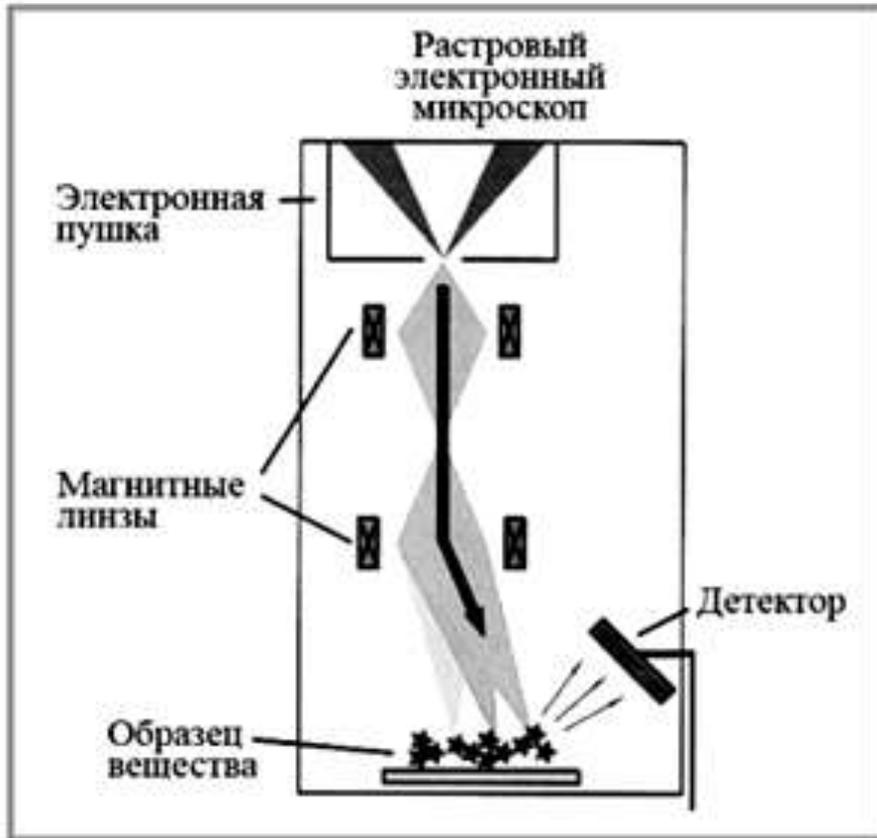


изображение внешней поверхности образца, сканируя ее с помощью электронного луча, сжатого магнитными линзами до размера порядка 5 нм.

Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

После взаимодействия луча с поверхностью электроны рассеиваются и попадают на детектор,

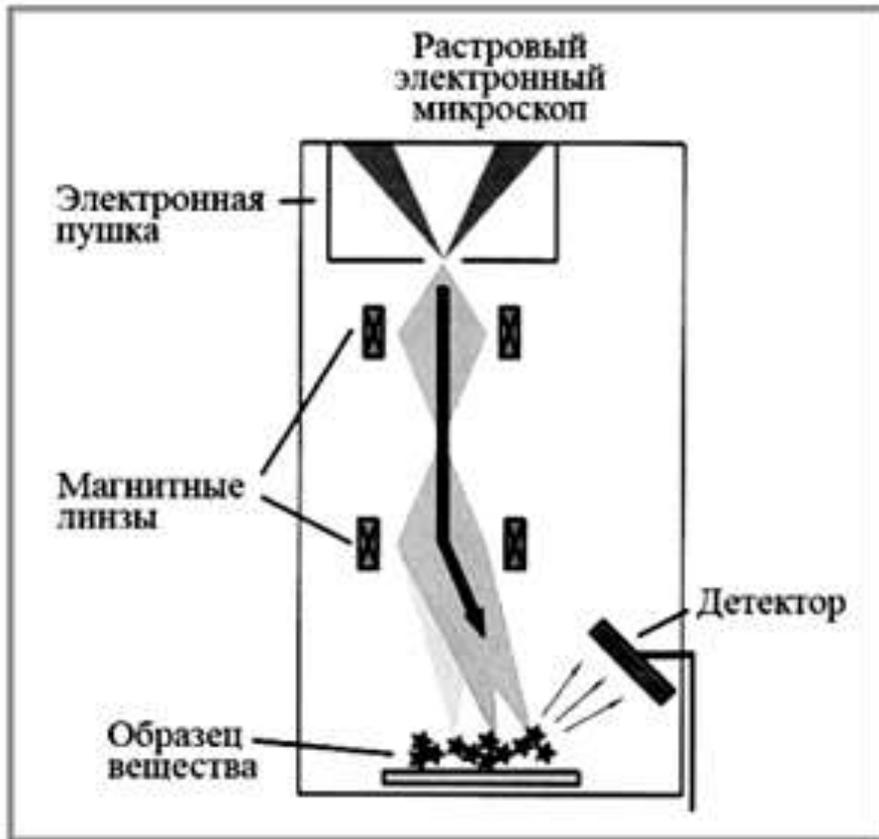


регистрирующий сигнал и преобразующий его в изображение поверхности. Интенсивность сигнала зависит от рельефа поверхности, размера частиц и их химического состава.

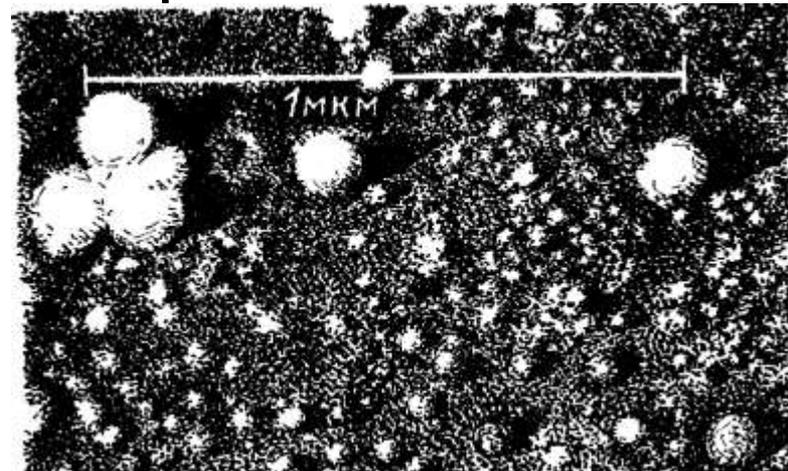
Потоки заряженных частиц

Электронный микроскоп

После взаимодействия луча с поверхностью электроны рассеиваются и попадают на детектор,

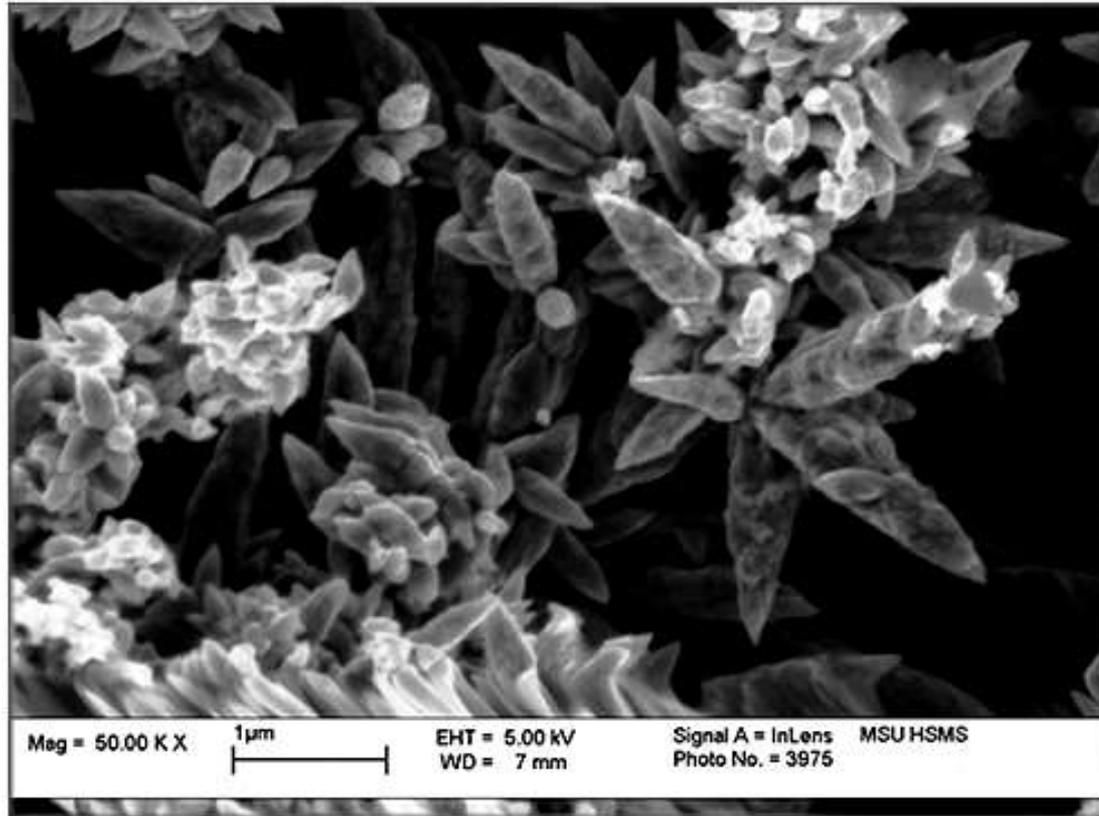


Все это можно определять с помощью сканирующего электронного микроскопа.



Потоки заряженных частиц

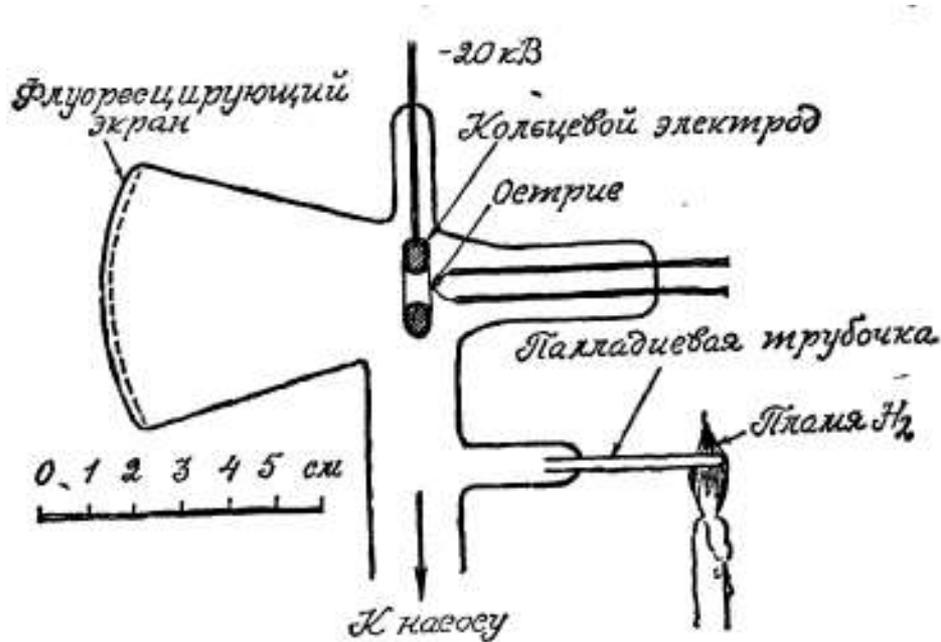
Электронный микроскоп



Поверхность оксида цинка, осажденного на золотой подложке Изображение получено на сканирующем электронном микроскопе

Потоки заряженных частиц

Электронные и ионные проекторы



При помощи электронного микроскопа в настоящее время удастся в лучшем случае заметить крупные молекулы в виде отдельных пятен или точек. Однако имеется

возможность добиться гораздо большего, а именно разглядеть форму молекулы и увидеть картину ее электронного облака. Это удалось сделать с помощью особых микропроекторов.

Потоки заряженных частиц

Электронные и ионные проекторы

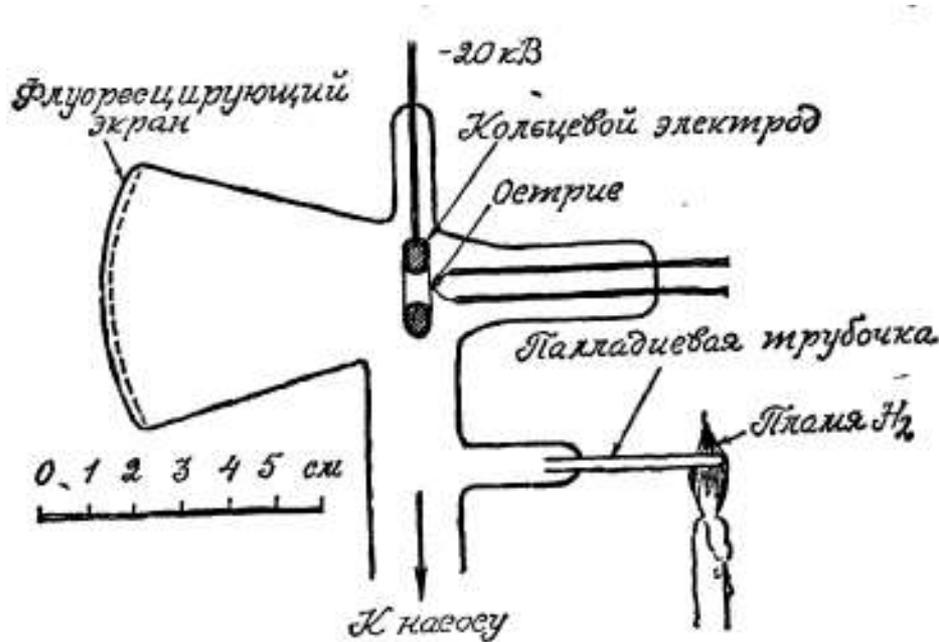
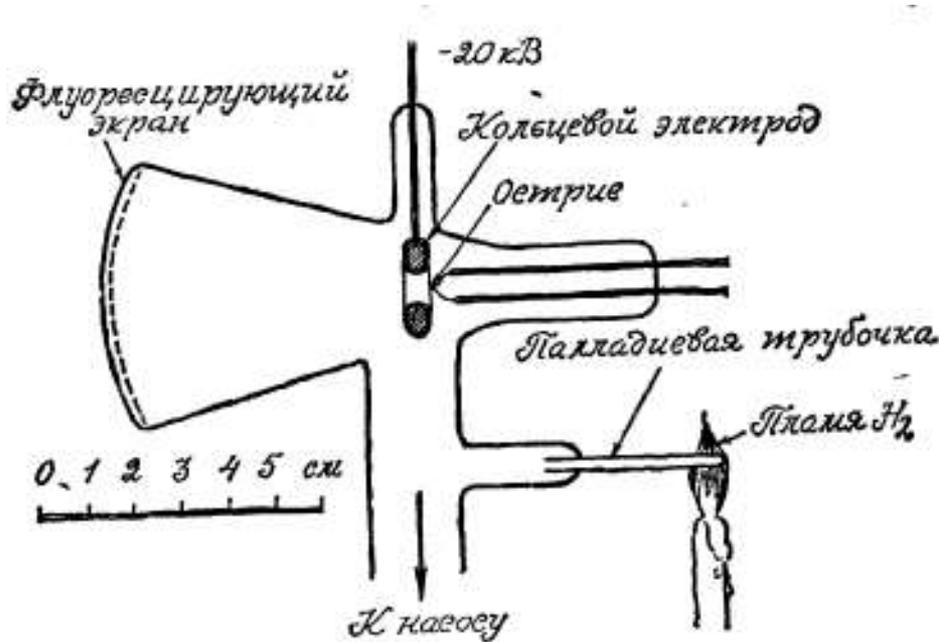


Схема электронно-ионного микропроектора представлена на рисунке. Это баллон, откачанный до вакуума 10^{-8} мм рт. ст., в который введены электроды, причем катод изготавливается в виде

острия с весьма малым радиусом закругления. Форма катода позволяет создать около него поля порядка 10^7 В/см. При таком поле из холодного катода начинают вырываться электроны, летящие радиальным потоком.

Потоки заряженных частиц

Электронные и ионные проекторы



Если на пути потока находится препятствие, то на флуоресцирующем экране возникает теневое изображение. Если объект лежит на поверхности острия, то увеличение равно отношению

расстояния от острия до экрана к радиусу закругления острия. Особыми способами удается добиться радиуса закругления меньше 200 \AA .

Потоки заряженных частиц

Электронные и ионные проекторы

Если нанести молекулы какого-либо вещества на острие, то можно увидеть их изображение на экране. Это удалось сделать для молекул фталоцианина, имеющих размер около 15 \AA . На экране были четко видны форма молекулы, ее характерное четырехлепестковое строение, сгущения и разрежения электронной плотности. Хотя этот способ никак нельзя рассматривать как осуществимый в стандартных лабораторных условиях для любых объектов, трудно переоценить возможность достижения полезного увеличения, превышающего десятки миллионов.

Потоки заряженных частиц

Электронные и ионные проекторы

Однако разрешающая способность может быть повышена еще на порядок величины, а кроме того, может быть много увеличена четкость изображения, если осуществить тот же принцип рассмотрения объектов, заменив электронный пучок на ионный. Устройство ионного проектора в принципе не отличается от схемы электронного проектора. На острие подается положительный потенциал и при сильных полях ($\sim 10^9$ В/м) от острия могут отрываться ионы. Для этого надо предварительно или во время работы проектора осуществить адсорбцию атомов или молекул поверхностью острия.

Потоки заряженных частиц

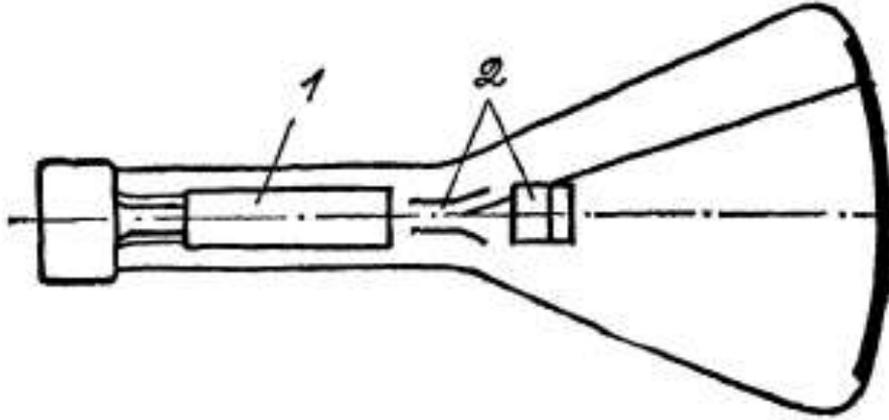
Электронные и ионные проекторы

Как только нейтральные атомы (молекулы) занимают место на поверхности острия, они отдают свой электрон и в виде положительных ионов направляются к экрану.

При помощи такого ионного проектора удалось уже получить изображение самого вольфрамового острия. Изображение возникает по той причине, что адсорбция атомов происходит в определенных местах вольфрамового кристалла. На полученном изображении удалось видеть периоды решетки, т.е. разрешение достигло 2 - 3 Å.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка



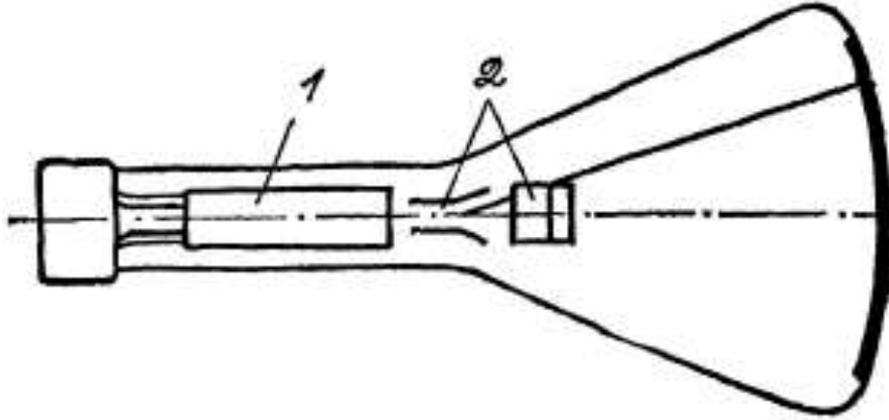
Электронно-лучевая трубка — весьма распространенное устройство, необходимый элемент

телевизора, радиолокатора, осциллографа.

Принцип работы электронно-лучевой трубки мы поясним на простейшем примере трубки, состоящей из электронной пушки 1 и двух конденсаторов 2, отклоняющих электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

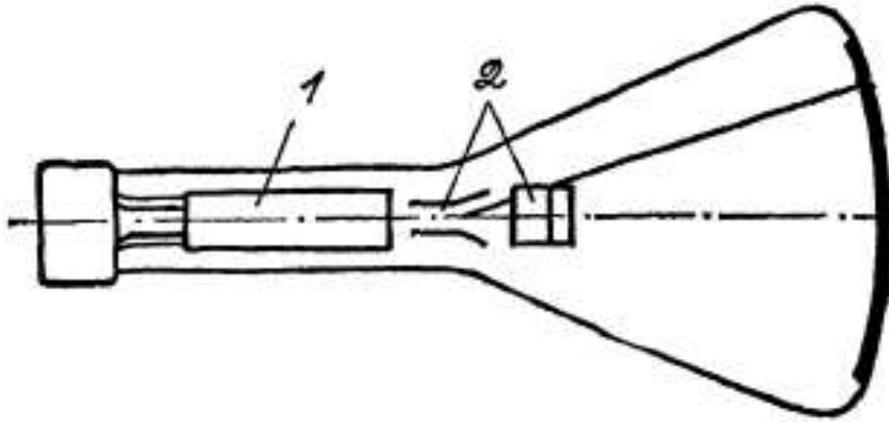


Рассмотрим применение электронно-лучевой трубки для записи быстропротекающих процессов. Если

напряжение к конденсаторам не приложено, то электронный луч идет вдоль оси прибора и создает светящуюся точку в центре экрана. Допустим, что на горизонтальную пару конденсаторных пластин подано переменное напряжение (частота больше 20 Гц). Тогда, в такт с изменениями поля, электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка



Ввиду ничтожной массы электронов это колебание будет практически безынерционным.

Мы не увидим движения луча, так как глаз не успевает следить за движениями светящегося пятна, а также потому, что экран обладает послесвечением.

Теперь вступает в ход вторая пара пластин, дающая так называемую «временную развертку». К этой паре пластин прикладывается пилообразное напряжение.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Так как вторая пара пластин дает горизонтальное отклонение луча, то под действием такого напряжения светящаяся точка будет двигаться, скажем, слева направо вполне равномерно. Дойдя до конца экрана, светящаяся точка прыжком будет возвращаться в исходное положение и процесс будет повторяться. Прикладывая к вертикальным пластинам пилообразное напряжение разной частоты, можно регулировать временной масштаб горизонтального смещения пучка.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Если на пластины, дающие горизонтальное смещение луча, включена временная развертка, а на пластины, дающие вертикальное смещение, — исследуемое напряжение, то луч будет вычерчивать кривую напряжения в функции времени, поскольку горизонтальная координата светящейся точки пропорциональна времени, отсчитываемому от произвольного мгновения.

Особенно эффективно применение осциллографа для наблюдения за периодическими процессами.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Всегда удастся подобрать временную развертку таким образом, чтобы картина, созданная лучом при одном пробеге слева направо, совпала с картиной, создаваемой при втором и следующих пробегах. Когда период развертки подобран, на осциллографе устанавливается неподвижная кривая, дающая величину напряжения в функции времени для любого временного интервала (меньше одного периода или равного нескольким периодам).

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевую трубку можно усложнить, помещая между катодом и анодом модулятор. Он представляет собой металлический цилиндр, один из торцов которого закрыт диафрагмой с отверстием, примерно равным размеру катода. Подавая отрицательный потенциал на модулятор, мы получаем возможность изменять интенсивность пучка. При некотором напряжении (запирающее напряжение) луч гасится полностью; это нужно делать, например, во время обратного хода луча при развертке.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Чтобы одновременно наблюдать на экране две переменные величины, электронно-лучевую трубку снабжают электронным коммутатором, периодически переключающим отклоняющее устройство попеременно в измерительную схему одной или другой величины. Для этой же цели разработаны двухлучевые осциллографы. Эти приборы снабжены электронно-лучевой трубкой с двумя независимыми электронными прожекторами и отклоняющими системами. В таком осциллографе имеются также два отдельных усилителя исследуемых напряжений и два генератора пилообразных колебаний.

Потоки заряженных частиц

Электронно-лучевая трубка

Большое значение имеет подбор светящихся экранов для электронно-лучевых трубок.

Существуют экраны с длительным послесвечением; для иных целей, напротив, требуются экраны, у которых свечение пропадало бы мгновенно после выключения луча.

Масс-спектрограф

Из основного уравнения движения заряженной частицы

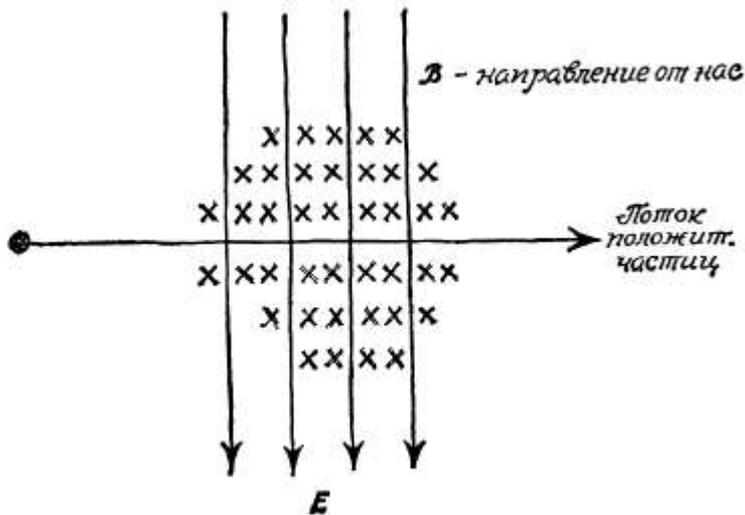
$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v} \vec{B}] \right)$$

очевидно, что ее траектория определяется отношением заряда к массе e/m . Поэтому исследование отклонения частицы в электрическом и магнитном полях может быть использовано для нахождения e/m . Так как начальная скорость движения частицы не известна, то e/m не может быть найдено измерением отклонения в одном электрическом или одном магнитном поле.

Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

Действительно, из общих формул для отклонения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях следует, что траектория определяется коэффициентами, в которые входят и e/m , и начальная скорость. Задача решается использованием отклонения одной и той же частицы как в магнитном, так и в электрическом поле.

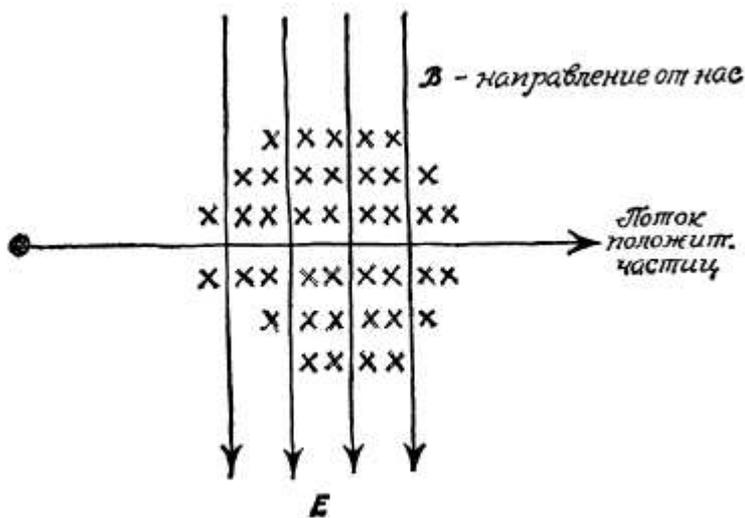


В простейшем случае достаточно уравновесить электрическое отклонение магнитным. Для этого надо расположить поля так, как показано на рисунке.

Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

Заряженные частицы не будут отклоняться при условии $eE = \frac{1}{c}evH$. Отсюда можно найти скорость частицы. Далее можно воспользоваться либо одним электрическим, либо одним магнитным отклонением; по величине отклонения от прямолинейного пути можно рассчитать e/m .

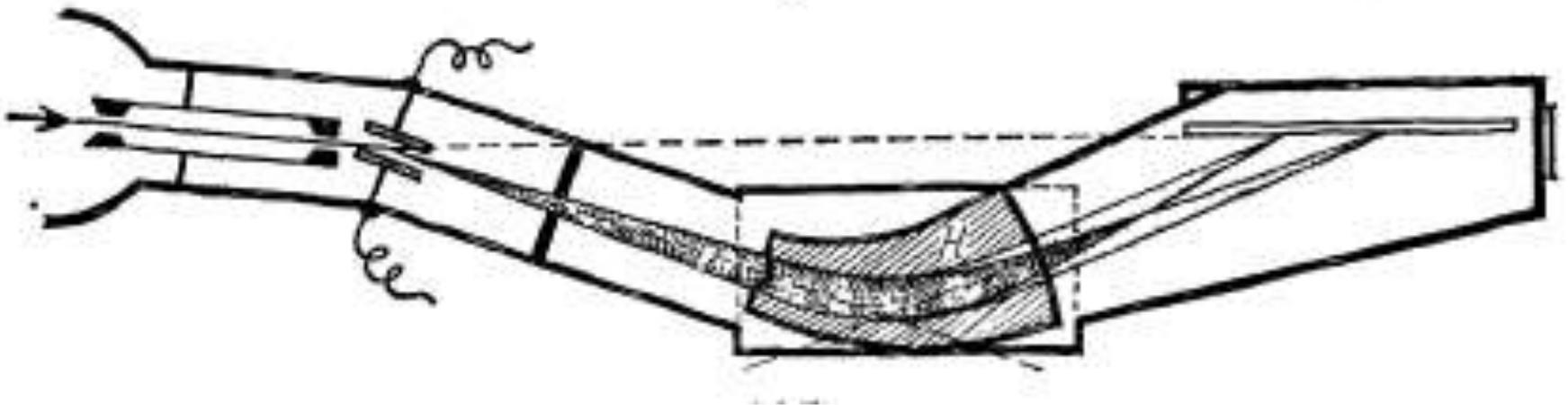


Измерения e/m имеют большое значение в атомной физике как средство определения массы частиц (если заряд известен).

Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

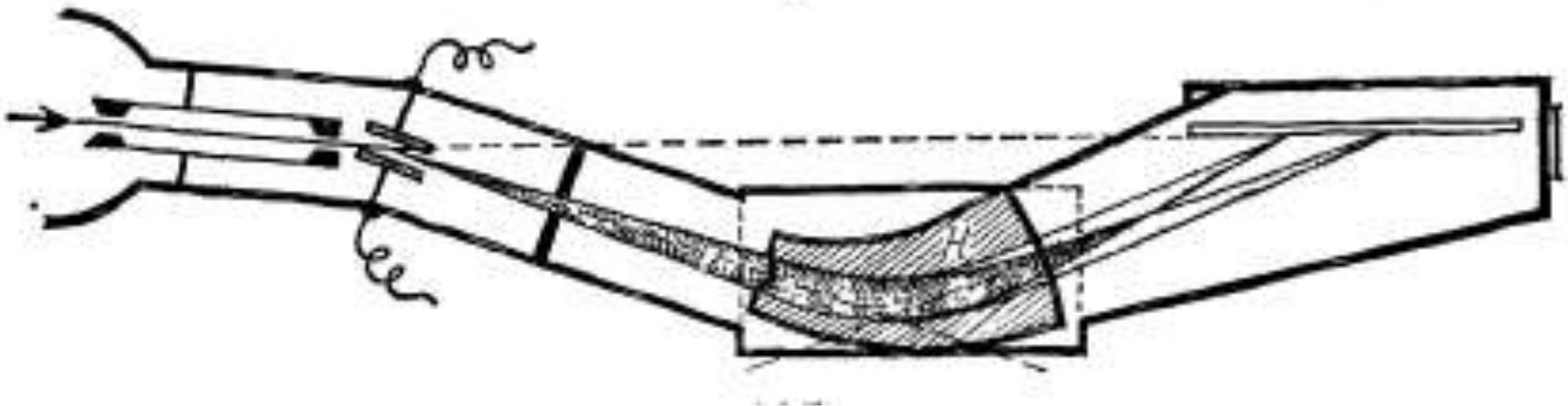
Особенно важно измерение масс ионов. Прибор, в котором пучок частиц разделяется по массам и состав частиц по массам может быть исследован, называется *масс-спектрографом*.



Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

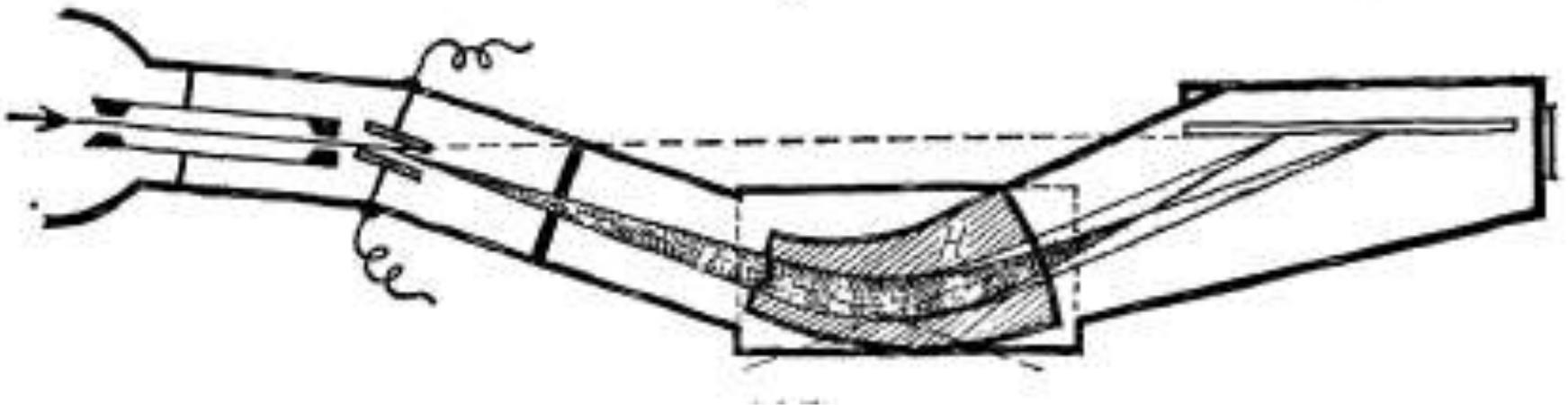
Схема этого прибора показана на рисунке. Идея его, предложенная Астоном, заключается в следующем. В электрическое поле конденсатора поступают частицы с разными значениями скоростей.



Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

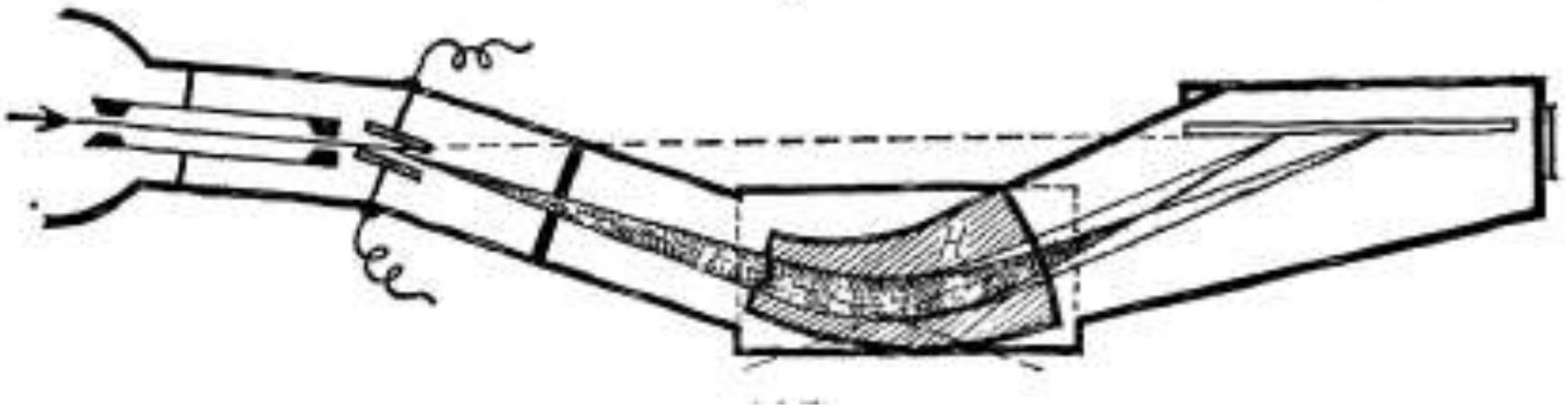
Выделим мысленно группу частиц с одинаковыми e/m . Поток этих частиц попадает в электрическое поле и расщепляется: быстрые частицы отклонятся в электрическом поле меньше, медленные - больше. Веер этих частиц поступает теперь в магнитное поле, перпендикулярное к чертежу.



Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

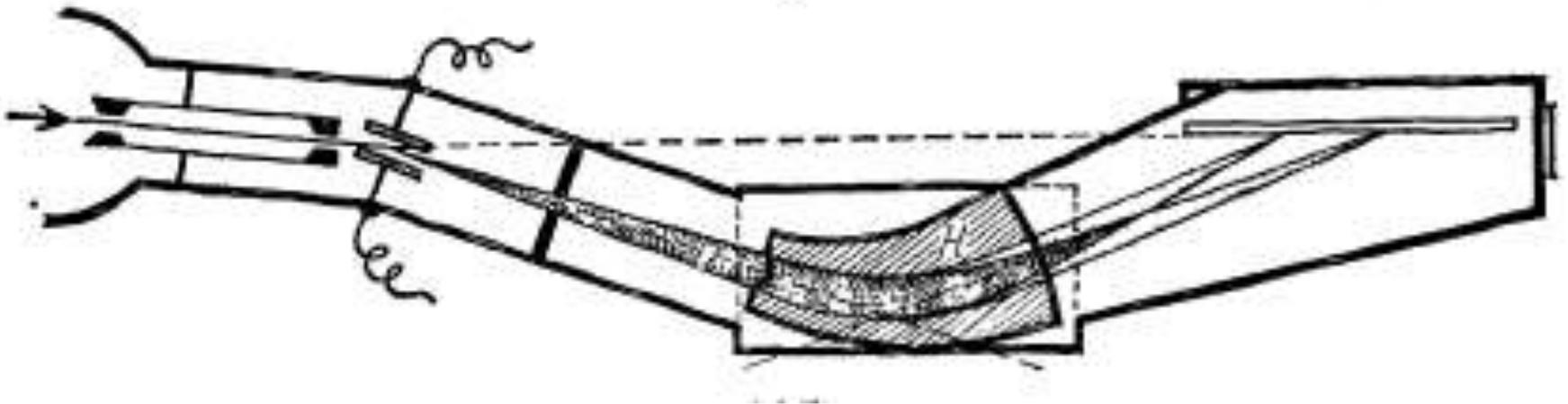
Оно включено так, чтобы отклонять частицы в противоположную сторону. И здесь быстрые частицы будут отклоняться меньше, а медленные — больше. Отсюда следует, что в какой-то точке, лежащей за пределами поля, выделенный нами мысленно пучок одинаковых частиц опять соберется в одну точку — сфокусируется.



Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

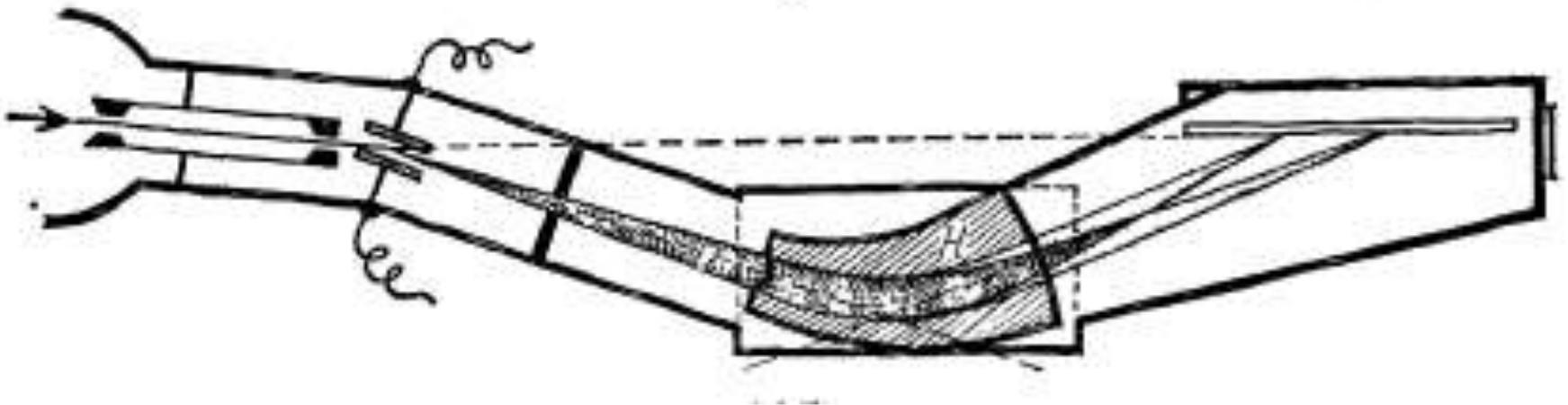
Частицы с иным значением e/m также соберутся в точку, но в другую. Расчет показывает, что фокусы для всех e/m расположатся весьма близко к некоторой прямой. Если вдоль этой прямой расположить детектор, то частицы каждого сорта дадут знать о себе отдельной линией.



Потоки заряженных частиц

Масс-спектрограф

Масс-спектрограф имеет весьма высокую разрешающую способность и позволяет обнаруживать присутствие очень близких изотопов. На первый взгляд это может показаться несущественным — массы изотопов различаются по крайней мере на единицу атомного веса.



Масс-спектрограф

Но на единицу различаются изотопы одного и того же химического элемента, изотопы же разных элементов (например, S^{36} и Ar^{36}) могут отличаться по массе весьма незначительно. Кроме того, важно иметь возможность определять массу сложных ионов. Подобные проблемы возникают, например, при химическом анализе газовых смесей. Тогда близкими по массе могут оказаться разные частицы, например $C^{12}H_2$ и N^{14} или $N^{14}H_2$ и O^{16} и т.д. Все эти задачи с успехом решаются с помощью масс-спектрографа.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

По сути дела, ускорителями заряженных частиц являются и такие приборы как электронная лампа, рентгеновская трубка, электронная пушка. Однако этот термин закрепился за установками, которые создают потоки заряженных частиц (электронов, протонов, дейтонов и т. д.), движущихся со скоростями, близкими к скорости света; такие потоки предназначены для воздействия на вещества. Цели такого воздействия могут быть самыми различными: изучение ядерных превращений, создание радиоактивных изотопов, медицинские цели, химические воздействия и т.д.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

Роль ускорителей в современной науке исключительно велика.

Разумеется, можно ускорить частицу вплоть до любых энергий, заставляя ее проходить последовательно ускоряющие поля. Однако для создания частиц с энергиями в миллиарды электрон-вольт, которые требуются современной физике, необходимы отрезки пути порядка многих километров. Линейный ускоритель огромной длины построен в Станфорде в США. Несмотря на частичные достоинства, такое лобовое решение вопроса нельзя считать оптимальным.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

Основная идея, положившая начало конструированию ускорителей, основанных на циркулярном принципе, принадлежит Лоуренсу. В одной установке объединяется ускорение частицы электрическим полем и ее многократное возвращение к тому же ускоряющему промежутку с помощью магнитного поля. Первые ускорители, основанные на этой идее, получили название *циклотронов*.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

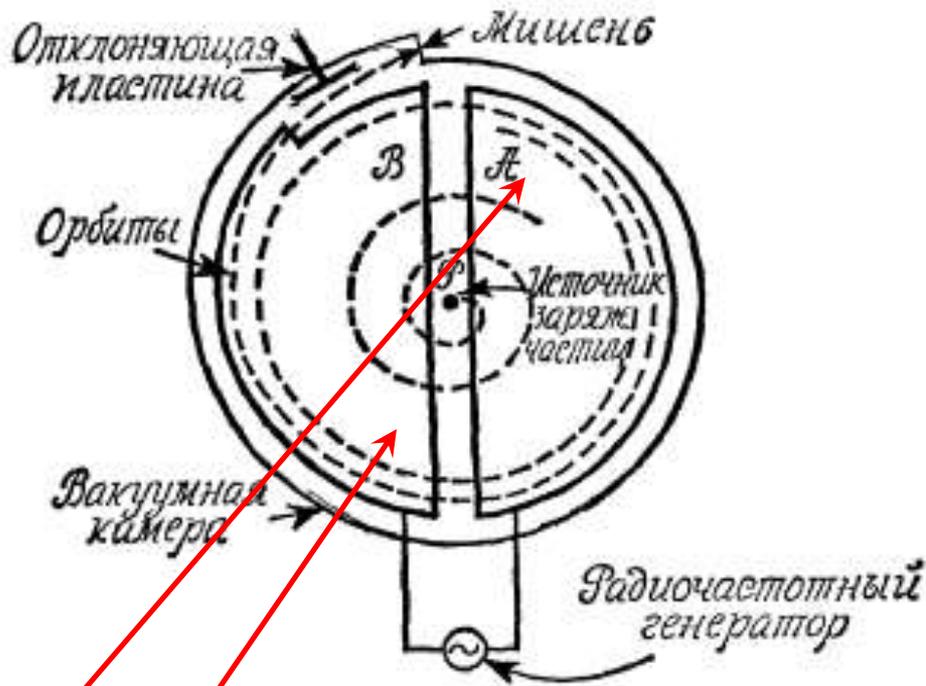
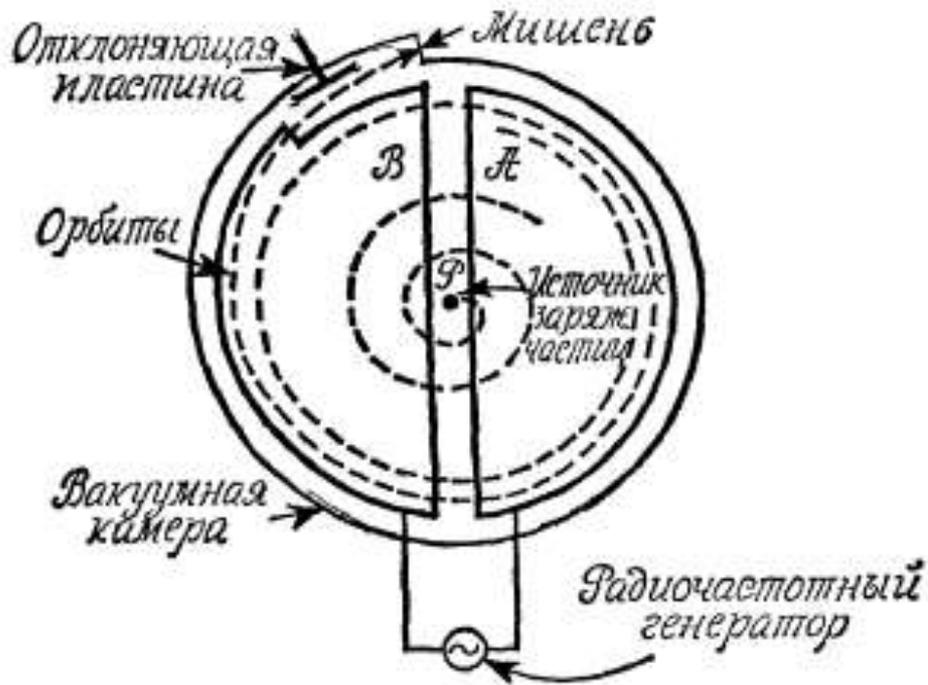


Схема циклотрона показана на рисунке. Чтобы представить себе ускорительную камеру, вообразите плоскую круглую конфетную коробку, разрезанную по диаметру. Две половины

А и **В** большой металлической коробки, называемые дуантами, и составляют основную часть ускорительной камеры. К дуантам прикладывается переменное электрическое поле определенного периода **T** .

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

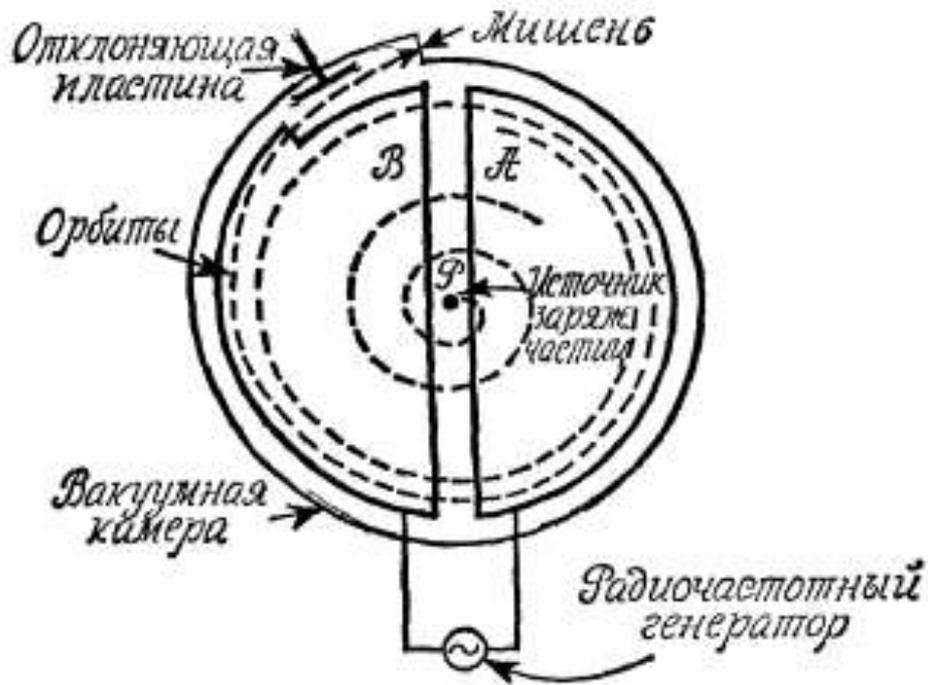


Вся эта система помещается между полюсами электромагнита, создающего внутри коробки перпендикулярно к ее основанию сильное постоянное магнитное поле.

Напряженность этого поля подбирается так, чтобы период вращения частиц в нем ($T = \frac{2\pi mc}{eH}$) равнялся бы периоду изменения электрического поля.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц



При таком условии все заряженные частицы, попадающие в ускорительную камеру, подхватятся полями и начнут спиральное ускоряющее движение с неизменным периодом

T. Действительно, попавшая в промежуток между дуантами частица получит ускорение, пройдет половину окружности в магнитном поле и подойдет к ускорительному промежутку как раз в тот момент, когда фаза напряжения изменится на 180° .

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

Частица опять ускорится в том же направлении и попадет внутрь другого дуанта, где пройдет полукругность с возросшим радиусом. Далее процесс повторяется, скорость частицы растет и, наконец, мы выпускаем их из циклотрона.

Возможности циклотрона ограничены. Дело в том, что по мере возрастания скорости частицы растет и ее масса, а значит, меняется период обращения в магнитном поле. Период обращения начинает увеличиваться и частица начинает запаздывать: она приходит к ускоряющему промежутку в момент, когда фаза напряжения изменилась не на 180° , а на большую величину.

Потоки заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

Это запаздывание нарастает, и в конце концов получится так, что электрическое поле не только не будет подхватывать частицы, но будет тормозить их. Предельная энергия, которую циклотрон может сообщить заряженной частице, выражается

формулой $2\sqrt{\frac{ev_0mc^2}{\pi}}$, что дает для протонов 22 МэВ и в три раза большую величину для α -частиц.

Циклотрон, ускоривший протоны до 10 МэВ, работал в НИИ ядерной физики ТПУ. В настоящее время демонтирован. Вообще этот вид ускорителей можно считать устаревшим.

Потоки заряженных частиц

Автофазировка

Решение проблемы потери синхронизации было предложено Векслером (СССР) и Мак-Миланом (США) соответственно в 1944 и 1945 гг. Из формулы периода обращения частицы в магнитном поле

$$T = \frac{2\pi mc}{eH}$$

видно, что возрастание массы можно скомпенсировать возрастанием магнитного поля, при этом период обращения заряда останется неизменным.

Потоки заряженных частиц

Автофазировка

Допустим, что во время работы циклотрона напряженность магнитного поля нарастает. Среди частиц, движущихся в ускорительной камере, несомненно, найдутся такие, у которых возрастание массы из-за увеличения скорости идет как раз в такой пропорции с нарастанием магнитного поля, чтобы период обращения оставался неизменным. Расчеты показали, что и другие частицы при этих условиях не будут выходить из синхронизма, с тем лишь различием, что их энергия будет нарастать не монотонно, как у частиц «удачных», у которых возрастание массы полностью компенсируется возрастанием магнитного поля, а колеблясь около значения энергии «удачных» частиц.

Потоки заряженных частиц

Автофазировка

У «удачных» частиц радиус орбиты согласован со значением энергии, в этом и состоит их «удачливость». Положим теперь, что имеется частица, у которой энергия больше, чем надо для данного радиуса. Но тогда из-за излишнего прироста массы частица будет замедляться. Если же частице не хватает энергии, то прирост массы будет мал, и частица будет ускоряться по отношению к своим соседям на том же радиусе. Следовательно, возрастание массы со скоростью позволяет частицам как бы самостоятельно регулировать скорости своего движения и подбирать фазы напряжения, пригодные для корректировки этого движения. Отсюда и термин «*автофазировка*».

Автофазировка

Таким образом, возможно в принципе безгранично увеличивать скорость движущихся в циклотроне частиц, плавно увеличивая напряженность магнитного поля. Ускорять частицы в такой установке следует импульсным методом. При возрастании поля установка работает, обратный цикл является холостым.

Описанный способ не является единственным приемом осуществления автофазировки. Другой принцип заключается в медленном изменении периода электрического напряжения.

Потоки заряженных частиц

Автофазировка

Идея та же самая: возрастание массы заряженной частицы влечет за собой увеличение периода обращения в магнитном поле; мы подгоняем к этому нарастанию соответствующее изменение режима переменного электрического поля.

Ускоритель, в котором медленно увеличивается период электрического напряжения, носит название *фазотрона (синхроциклотрона)*. Траектория частицы в фазотроне представляет собой плоскую спираль. Чем дальше пойдет эта спираль, тем большая энергия частиц будет достигнута.

Потоки заряженных частиц

Автофазировка

Таким образом, увеличение энергии связано с увеличением площади ускорительной камеры, находящейся в магнитном поле. Из существующих ускорителей этого типа наиболее мощным является фазотрон АН СССР с весом магнита 7000 т. Этот фазотрон дает пучок протонов с энергией 680 МэВ. Фазотроны ограничены энергиями порядка сотен МэВ; дальнейшее увеличение их возможностей привело бы к немыслимому увеличению веса магнита. Энергии частиц в миллиарды электрон-вольт (ГэВ) достигаются в синхрофазотроне.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

У синхрофазотрона остается уже совсем мало общего с циклотроном. Синхрофазотрон осуществляет ускорение частиц на одной круговой орбите. Это сильно ограничивает объем магнитного поля. Мы можем, так сказать, вырезать всю центральную часть магнита. Количество металла, идущее на магнит, резко уменьшается. Электромагнит синхрофазотрона АН СССР на 10 ГэВ весит 36 000 т. Фазотрон на те же энергии потребовал бы около 1 млн. т металла.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Чтобы ускорять частицу на орбите постоянного радиуса, надо менять, и притом согласованно, период ускоряющего электрического поля и напряженность магнитного поля. Работа должна происходить импульсным методом. Каждый импульс состоит в нарастании магнитного поля и уменьшении периода электрического ускоряющего напряжения.

При заданном радиусе орбиты напряженность поля и скорость частицы однозначно связаны формулой

$$H = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \frac{c}{er}$$

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

а связь периода обращения со скоростью определяется выражением

$$T = \frac{2\pi r}{v} .$$

Если эти условия выполнены, то некоторая «удачная» частица будет монотонно набирать скорость.

Условия автофазировки имеют место и здесь. Поэтому остальные частицы хотя и не станут описывать круговую орбиту, однако будут идти по траектории, колеблющейся около этой орбиты, и примут участие в синхронном возрастании скорости.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Колебания около средней круговой орбиты заставляют делать довольно широкую дорожку для заряженных частиц. Ведутся интенсивные поиски методов сужения этой дорожки, что приведет к сокращению веса металла и, следовательно, позволит добиться еще больших энергий частиц.

Мы говорили до сих пор об ускорителях, применяемых для тяжелых частиц. Ускорители электронов обладают рядом своеобразных особенностей.

Еще в 1941 г. для ускорения электронов был создан ускоритель, получивший название *бетатрона*.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Эта установка работает по принципу трансформатора, у которого первичной обмоткой является обмотка магнита, а вторичной «обмоткой» — пучок электронов, вращающихся по окружности постоянного радиуса. Иначе говоря, электроны движутся по кольцевой силовой линии вихревого электрического поля, создаваемого переменным магнитным потоком.

На первый взгляд кажется, что такое ускорение может продолжаться беспредельно. Возрастание массы со скоростью не накладывает какого-либо ограничения, так как в этом явлении нет нужды ни в каком синхронизме.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Тем не менее бетатрон имеет ограничение. Дело в том, что при энергиях в десятки и сотни МэВ становятся чувствительными потери энергии на излучение — ведь ускоренно движущийся электрон излучает электромагнитные волны. В результате излучения траектория электронов из круговой превращается в спиральную, закручивающуюся внутрь, и ускорение становится невозможным. Когда нужны электроны с энергиями 20 - 50 МэВ, бетатроны применяются с успехом. Если мы желаем получить электроны больших энергий, то надо прибегнуть к **синхротронам** — установкам, предложенным в 1946 - 1947 гг.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Синхротрон подобен описанному выше фазотрону, т.е. является резонансным ускорителем. К магнитному полю бетатрона добавляется ускоряющее электрическое поле. Механизм ускорения обеспечивается автофазировкой. Однако то обстоятельство, что мы имеем дело с легчайшими частицами, электронами, облегчает задачу конструктора. Дело в том, что уже при энергии 2 - 3 МэВ скорость электронов практически становится равной скорости света. Но если так, то при дальнейшем возрастании энергии радиус траектории электронов не меняется.

Потоки заряженных частиц

Синхрофазотрон. Синхротрон

Это дает возможность выполнять магнит в виде кольца, как в синхрофазотроне. Но как быть с излучением, ведь оно имеет место и при движении в синхротроне? Для того, чтобы компенсировать потери на излучение, приходится увеличивать ускоряющее напряжение.

При больших энергиях потери на излучение достигают внушительных цифр. В ускорителе на 300 МэВ и при радиусе орбиты 1 м электрон излучает за один оборот энергию 1000 эВ. Если бы мы построили синхротрон на 10 ГэВ с радиусом орбиты 20 м, то потери энергии за один оборот составляли бы 30 МэВ.

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Превращение атома в положительный ион, т.е. отрыв электрона от атома, может произойти самыми различными способами. Удар электроном, другим атомом или молекулой, поглощение фотона — все эти способы передачи энергии могут привести к ионизации атома, если только подводится количество энергии, достаточное для преодоления сил связи электрона с атомом. Эта энергия для разных атомов и молекул колеблется в пределах 4 - 25 эВ. Это значит, что ионизация атома может быть совершена электроном, который разогнан напряжением 4 - 25 В.

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Разумеется, частица большей энергии способна превратить в ионы столько атомов или молекул, на сколько у нее хватит запаса энергии. Один электрон, разогнанный в мощном ускорителе, способен создать миллионы пар ионов.

Ионизация атома состоит в отрыве от него электрона; ионизация молекулы может привести также к отрыву электрона, однако в иных случаях молекула делится при ионизации на два крупных иона. Таким образом, ионизация создает не только электроны и положительные ионы, но может привести и к образованию отрицательных ионов.

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Однако отрицательные ионы получаются и иным путем, а именно, присоединением к нейтральному атому свободного электрона. Часто такой процесс оказывается энергетически выгодным.

Рассмотрим ионизацию газа, производимую потоком каких-либо частиц. Если источник ионизации убран, то начнется воссоединение (рекомбинация) положительно и отрицательно заряженных частиц в нейтральные атомы или молекулы. Так как при рекомбинации встречается пара частиц, то естественно, что скорость рекомбинации будет пропорциональна квадрату числа ионов в единице объема n .

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Если Δn — число ионов, превращающихся в нейтральные частицы в единицу времени в единице объема, то $\Delta n = \gamma n^2$, где γ — коэффициент, имеющий значение порядка $10^{-6} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ для большинства газов при нормальных условиях. При постоянном действии ионизатора между процессами ионизации и рекомбинации должно установиться равновесие. Пусть ионизатор создает в единицу времени N пар ионов в единице объема. Сначала число ионов в газе будет нарастать, но так как рекомбинация будет происходить все чаще (пропорционально квадрату наличного числа пар ионов), то нарастание ионов прекратится, когда $N = \Delta n$, т.е. $N = \gamma n^2$

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Если ионизованный газ заполняет некоторый объем и если в нем преобладает хаотическое движение частиц газа, то такой электропроводящий газ, состоящий из нейтральных и заряженных частиц, называют *плазмой*.

Важным примером сильно ионизованного газа является ионосфера. Число заряженных частиц в единице объема ионосферы подвержено сильным суточным и годовым колебаниям. Как известно, эти колебания сказываются на радиоприеме. В 1 см^3 ионосферы находится $\sim 10^6$ электронов и ионов. Всего же частиц в этом объеме $\sim 10^8$.

Потоки заряженных частиц

Ионизованный газ

Таким образом, степень ионизации ионосферы $\sim 1\%$. В интенсивных плазмах, образующихся в различных ионных приборах, степень ионизации имеет такой же порядок величины.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Первоначальное знакомство с элементарными заряженными частицами физики получили, исследуя прохождение электрического тока через газы (электрический разряд в газе). В цепь тока включается стеклянная трубка с газом. Включение происходит с помощью электродов, впаянных в стекло. Чтобы получить исчерпывающую картину явления, надо исследовать его для различных газов, разных давлений газов и при разных напряженностях поля.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Поведение различных газов в общем одинаково. Различие ионизационных потенциалов приводит лишь к тому, что некоторые критические точки, о которых мы будем говорить ниже, обнаруживаются при других напряжениях и давлениях.

Рассмотрим характерные для всякого газа явления, происходящие при увеличении напряжения, прикладываемого к газоразрядной трубке. Эти явления характерны для широкого диапазона давлений.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Исключение составляют предельно низкие давления, когда длина свободного пробега становится соизмеримой с размерами межэлектродного промежутка, и чрезмерно высокие давления, когда высокая концентрация частиц делает длину свободного пробега неприемлемо маленькой.

Итак, приложим к газоразрядной трубке небольшое напряжение. Если ионизатор отсутствует, ток через трубку не пойдет. В присутствии ионизатора в газе находятся заряженные частицы — ионы и электроны.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

При наложении поля частицы будут направляться полем к электродам. Явление носит название *несамостоятельной проводимости* газа.

Скорость, с которой заряженные частицы будут передвигаться по направлению к электродам, зависит от многих обстоятельств и прежде всего от напряженности поля и давления газа.

На упорядоченное движение иона и электрона, происходящее под действием постоянной электрической силы, накладывается тепловое хаотическое движение. Разгоняемая электрическим полем частица пробегает небольшое расстояние

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Короткий пробег неминуемо заканчивается соударением. При небольших скоростях движения эти столкновения происходят по закону упругого удара.

Средняя длина свободного пробега определяется прежде всего давлением газа. Чем выше давление, тем короче свободный пробег, тем меньше средняя скорость упорядоченного движения частицы.

Напряжение, наложенное на газоразрядную трубку, действует, разумеется, в обратном направлении — увеличивает среднюю скорость упорядоченного движения частиц.

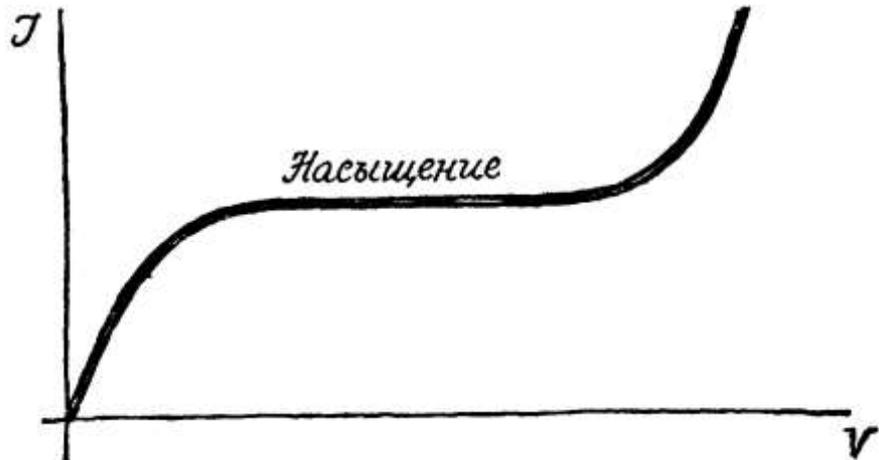
Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Как говорилось выше, в газе, находящемся под действием ионизатора, устанавливается определенная концентрация ионов: в равновесном состоянии число вновь образующихся в единицу времени ионов за секунду ионов равно числу рекомбинирующих за это же время. Приложенное напряжение нарушает равновесие: часть ионов достигает электродов, не успев рекомбинировать. По мере увеличения напряжения все большая и большая часть создаваемых достигает электродов, электрический ток через газ растет.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе



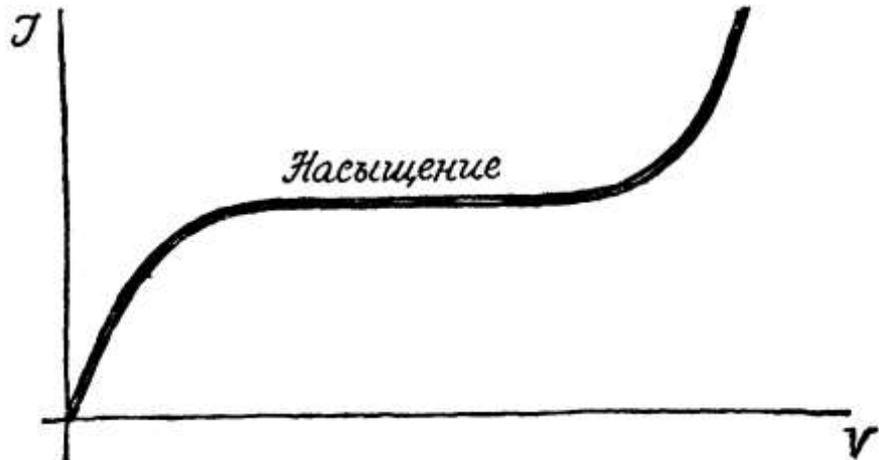
ионизаторами, доходят до электродов. Ясно, что дальнейшее увеличение напряжения не может увеличить тока. Чем меньше плотность газа, тем при меньших напряженностях поля будет достигнут ток насыщения.

Сила тока насыщения равна заряду ионов, образуемых ионизатором за секунду в объеме газоразрядной трубки.

Так продолжается до тех пор, пока совсем не остается времени для рекомбинации и все ионы, создаваемые

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

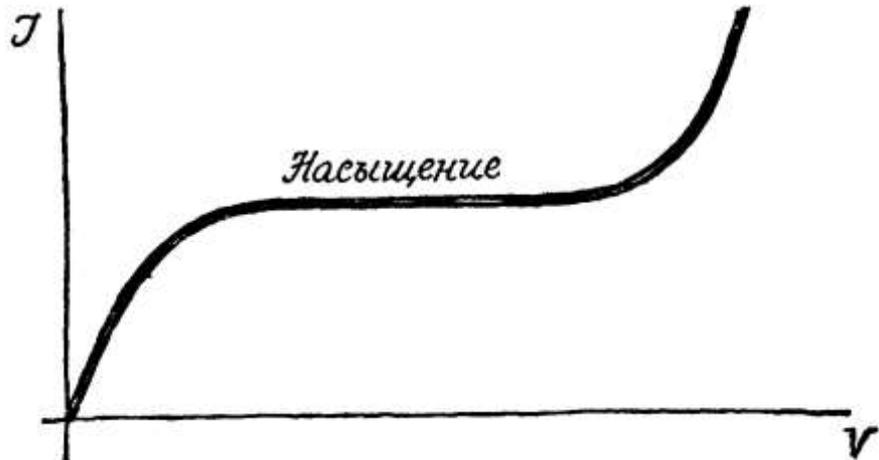


При дальнейшем увеличении напряжения возникают новые явления. В некоторый момент скорость

электронов становится достаточной для выбивания электронов из нейтральных атомов и молекул. Напряжение на трубке должно при этом достигнуть такого значения, при котором электрон успевает набрать на длине свободного пробега энергию, достаточную для ионизации молекулы.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе



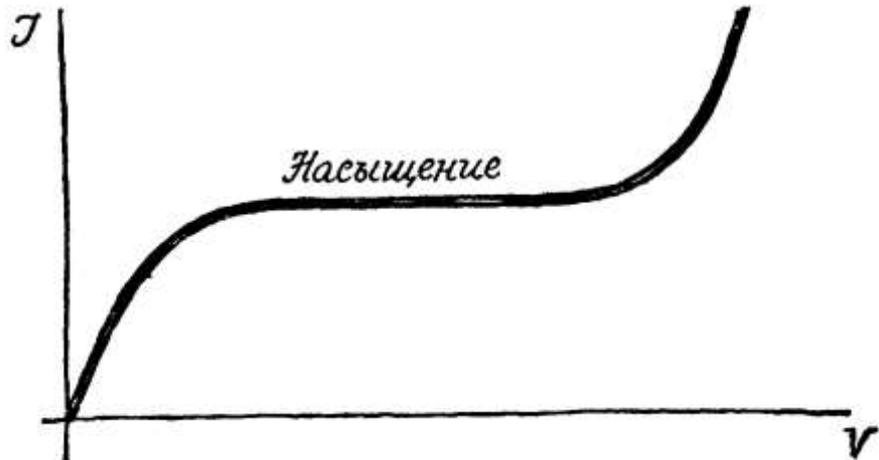
Возникновение ударной ионизации сказывается на кривой зависимости тока от напряжения: ток начинает расти,

поскольку увеличение напряжения означает увеличение скорости движения электрона.

Увеличение же скорости влечет за собой увеличение ионизирующей способности электрона, а следовательно, создание большего числа пар ионов и увеличение силы тока.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе



Для этой области напряжений прохождение тока через газы начинает сопровождаться

оптическими явлениями — газ светится. Действительно, если удары частиц могут привести к ионизации атома и молекулы, то они тем более могут привести к явлениям возбуждения частиц, т.е. к переходу на более высокие энергетические уровни. Возвращаясь в нормальное состояние, молекула или атом излучает квант света.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Если энергия электрона значительно превышает энергию, необходимую для ионизации одной молекулы, то прохождение электрического тока через газ приобретет ярко выраженный лавинный характер. Какой-либо электрон разрушает атом, создает ион и электрон. И созданный электрон обладает ионизирующей способностью, и первичный электрон сохранил еще достаточно энергии, чтобы ионизовать другой атом. Процесс расширяется, и из мест первичной ионизации в сторону электродов распространяется лавина электрических зарядов: в каждом последующем слое число пар ионов будет больше, чем в предыдущем.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

При более или менее высоких напряжениях возрастание этой лавины происходит исключительно быстро.

Вторичными ионизаторами в газе являются электроны, а не ионы. Последние приобретают способность ионизовать молекулы газа только при очень больших скоростях движения, с которыми мы обычно не имеем дела. Если ионы не производят ионизацию, то устранение внешнего ионизатора прекратит разряд даже в том случае, если число пар ионов, создаваемых ударами, в сотни и тысячи раз превосходит первичную ионизацию.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Каждая лавина должна начаться с первого электрона, а так как электроны движутся к аноду, разряд прекратится в отсутствие внешнего ионизатора, как только все электроны доберутся до анода.

Такого рода весьма сильные несамостоятельные разряды обладают следующей особенностью: при данном напряжении сила электрического тока, проходящего через газ, пропорциональна числу первичных ионов, создаваемых внешним ионизатором в единицу времени. Отношение силы такого, как говорят, газоусиленного тока к силе тока насыщения, создаваемого первичной ионизацией, может достигать сотен и тысяч.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Это свойство разряда используется при создании измерителей ионизации — пропорциональных усилителей.

Электрический разряд может стать *самостоятельным*, т.е. будет продолжаться при устранении внешнего ионизатора, лишь в том случае, если ионы станут дополнительными поставщиками заряженных частиц. Это происходит при очень больших напряжениях, когда ионы смогут ионизовать ударом молекулы газа. В этом случае ионы будут создавать все новые и новые электроны — первичные источники лавин.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Однако самостоятельный разряд возникнет и при значительно меньших напряжениях, если катод газоразрядной трубки изготовить в виде пластинки. Дело в том, что ионы могут выбивать электроны из холодного катода. Если скорость иона достаточна для этого, условие самостоятельного разряда можно сформулировать так: появление новых электронов на катоде должно по крайней мере заменить работу первичного ионизатора.

Свою роль играет и давление. При больших давлениях столб разряда сжимается, начинается термическая ионизация.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе

Различие давлений меняет картину распределения плотности тока и соответственно характер свечения газового разряда. При нормальных и более высоких давлениях мы сталкиваемся с разными видами разрядов: характерны тихий разряд, дуговой разряд, искровой разряд. В разреженных газах имеет место так называемый тлеющий разряд. Каковы же условия возникновения и внешний вид этих разрядов?

Тихим разрядом называются утечки зарядов с конденсаторов или иных заряженных тел, не сопровождающиеся ни звуком, ни свечением.

Потоки заряженных частиц

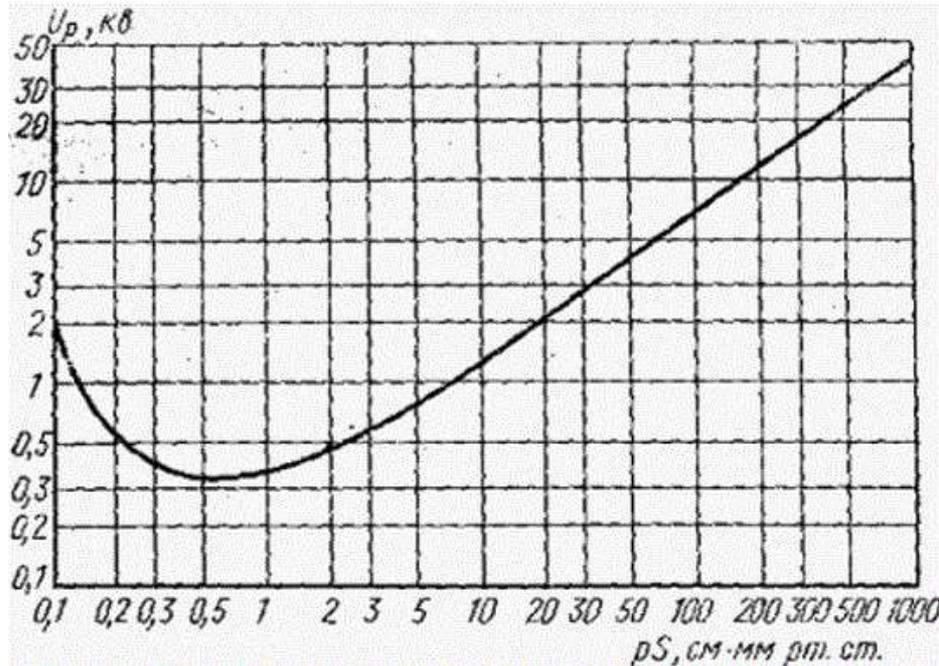
Электрический разряд в газе

На остриях, тонких проводках и вообще всюду, где имеет место резкое падение потенциала, а значит, большая напряженность поля, могут возникнуть самостоятельные тихие разряды — кистевой и корона.

При более высоких напряжениях возникает *искровой разряд*. Пробивное напряжение довольно строго зависит лишь от произведения давления газа на расстояние между электродами. Воздух между шаровыми электродами пробивается искрой при напряженности поля 30 кВ/см (при нормальном давлении).

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе



Измерение пробивного расстояния можно использовать для измерения высоких напряжений.

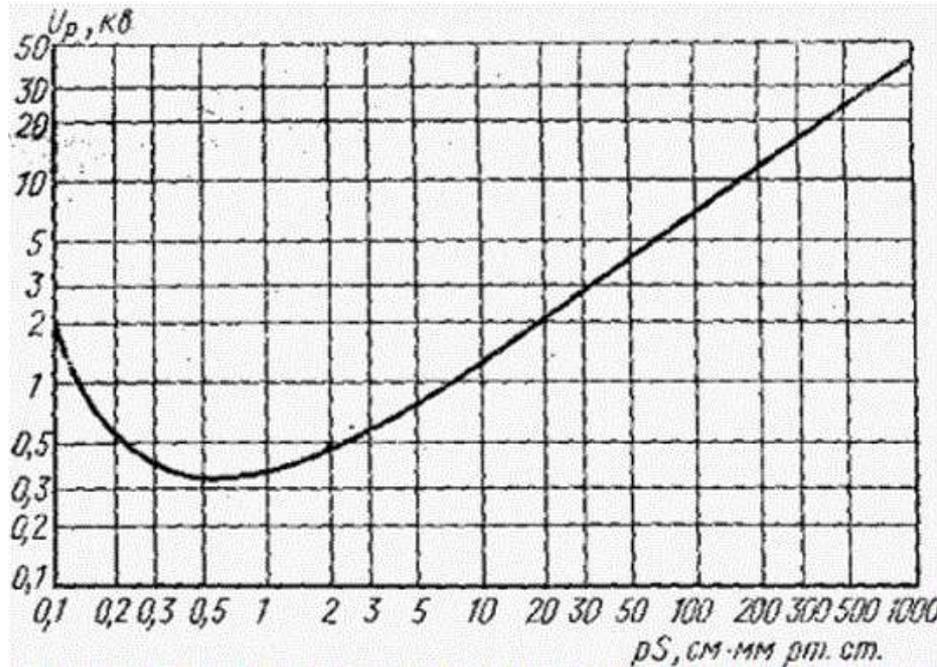
Особый вид разряда - **электрическая дуга**. В

дуговом разряде плотность тока велика, хотя напряжение между электродами мало.

Особенностью дугового разряда является чрезвычайно высокая температура электродов.

Потоки заряженных частиц

Электрический разряд в газе



Поэтому в дуге большую роль играет термоэлектронная эмиссия с катода.

Тлеющий разряд в разреженных газах имеет характерный вид

для каждого давления. При некотором опыте можно по одному лишь виду разряда с большой точностью определять степень разрежения.

Потоки заряженных частиц

Плазма

Вещество в состоянии плазмы. Можно привести газ в ионизованное состояние путем повышения температуры. Термическая ионизация газа начинается при температуре порядка 6000 °С. Средняя энергия движения молекул $\frac{3}{2}kT$ становится уже достаточной для того, чтобы обеспечить частые соударения между молекулами, приносящими энергию, необходимую для отрыва электрона или иной ионизации.

Степень ионизации зависит от температуры и давления газа. С возрастанием давления ионизация уменьшается.

Потоки заряженных частиц

Плазма

При температурах порядка десятков тысяч градусов и выше газ нейтральных атомов или молекул, заключенный в некотором объеме, переходит в новое состояние, которое называют *плазмой*.

Нетрудно прикинуть, что при температурах 20 000 - 30 000° водород, например, плотность которого соответствует давлению 1 мм рт. ст. при комнатной температуре, окажется полностью ионизованным. Действительно, средняя энергия на одну степень свободы при температуре 30 000 °С равна $\frac{1}{2}RT=30$ килокалорий на моль. Это существенно больше энергии ионизации атома водорода.

Потоки заряженных частиц

Плазма

Таким образом, тепловые соударения превратят нейтральный газ в смесь двух «газов» — «газа» протонов и «газа» электронов. Это и есть плазма.

Плазма, образовавшаяся из других веществ, может иметь более сложный состав. В ней могут находиться электроны, оголенные ядра и различные ионы. Разумеется, плазма в том или ином количестве содержит и нейтральные частицы. Однако при высоких температурах этот процент совсем мал. Для примера, приведенного выше, на один нейтральный атом придется $2 \cdot 10^4$ протонов.

Потоки заряженных частиц

Плазма

В состоянии плазмы вещество существует в звездах, в том числе и на Солнце. Верхний слой атмосферы, так называемая ионосфера, также является плазмой.

Получить в земных условиях вещество в состоянии плазмы путем нагревания сосуда, разумеется, невозможно из-за отсутствия настолько огнеупорных материалов. Однако при помощи специально подобранных форм магнитных полей даже горячую плазму удастся удержать в ограниченном объеме.

Потоки заряженных частиц

Плазма

Если все частицы плазмы свободно обмениваются энергией, то плазма быстро придет в состояние равновесия, т.е. средняя энергия электронов и ионов будет одинаковой, несмотря на большое различие в массах частиц. Ионы плазмы движутся медленно по сравнению с электронами. В ряде расчетов их можно даже считать неподвижными.

Скорость установления равновесия между частицами разных сортов может колебаться от ничтожных долей секунды до секунд в случае горячей плазмы (порядка 10^8 К).

Потоки заряженных частиц

Плазма

Примером неравновесной плазмы является плазма газового разряда. Внешние источники передают энергию прежде всего электронам. А выравнивание энергии электронов и ионов произойдет лишь после большого числа столкновений. Поэтому в газовом разряде электронная температура T_e много больше ионной T_i . В дуговом разряде T_e составляет десятки тысяч градусов, а T_i тысячи градусов.

Рассмотрим вопрос об электрическом поле плазмы. Оно сильно меняется и в пространстве, и во времени. Тем не менее можно рассчитать среднее поле системы, содержащей равное число ионов и электронов, расположенных на некотором среднем расстоянии l друг от друга.

Потоки заряженных частиц

Плазма

Нетрудно понять, что из-за нейтральности плазмы среднее поле плазмы по порядку величины должно равняться полю одного заряда на расстоянии l от него, т.е. $E \approx en^{2/3}$, где n — концентрация. Так, для водородной плазмы высокой концентрации (10^{14} ионов на один кубический сантиметр) $E \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{14})^{2/3} \approx 7,5 \cdot 10^{-11}$ В. Это поле меняется очень быстро. Оно может изменить знак за время порядка времени пробега и на дистанции порядка расстояния между частицами.

Потоки заряженных частиц

Плазма

Выше говорилось об электронейтральности плазмы. Это ее свойство является необходимым и выполняется, несмотря на хаотичность движения электронов, очень строго. При большой разнице концентраций n_i и n_e электрическое поле начнет выталкивать частицы, присутствующие в избытке, и притягивать частицы противоположного знака. Такой автоматизм действует с огромной точностью (препятствует совершенно мизерному отклонению от нейтральности) уже для небольших объемов, радиус которых больше $\sqrt{T_e/n}$, т.е. для плазмы нашего примера — больше 10^{-5} — 10^{-3} см.

Плазма

Плазма является источником электромагнитных волн в широком частотном диапазоне. Как известно, торможение электрона порождает сплошной спектр электромагнитных волн (так образуются рентгеновские лучи) с частотами от нуля до $E_{\text{макс}}/h$, где $E_{\text{макс}}$ — максимальная энергия электрона. Для оценки порядка величины длины волны тормозного излучения плазмы можно положить $E=kT_e$. Тогда окажется, что у холодной плазмы тормозное излучение будет видимым и инфракрасным, а у горячей плазмы — рентгеновским.

Важным источником излучения является рекомбинация протона (иона) с электроном.

Потоки заряженных частиц

Плазма

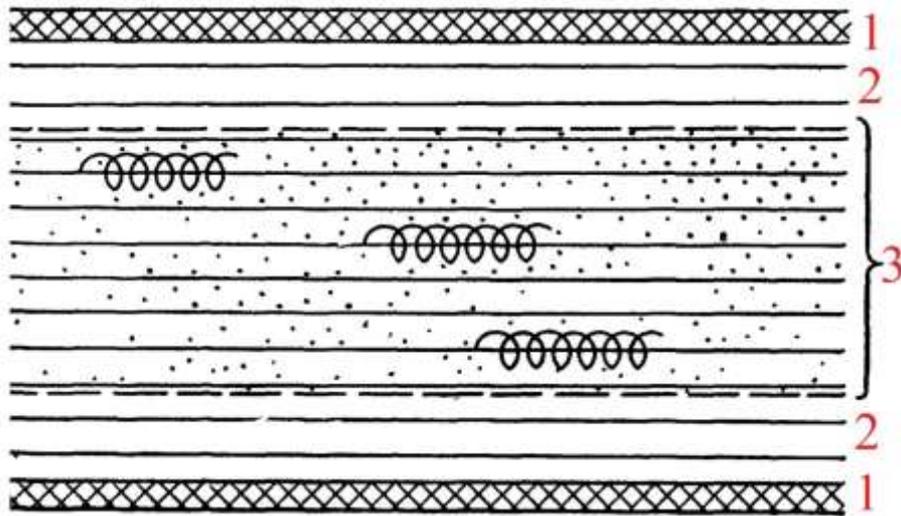
При этом, очевидно, излучается фотон с энергией, равной энергии связи частиц противоположных знаков.

Наряду с излучением, одинаковым для разных веществ, находящихся в состоянии плазмы, плазма излучает характеристически линейчатые спектры, поскольку в состав плазмы входят определенные возбужденные атомы и ионы.

Плазма в магнитном поле. При наложении магнитного поля траектории заряженных частиц становятся направленными. Свободная частица движется по винтовой линии, накрученной на вектор напряженности магнитного поля.

Потоки заряженных частиц

Плазма



Смещения поперек силовых линий происходят лишь под действием соударений. При высокой температуре и сильном

поле заряженная частица не может покинуть область магнитного поля.

Наложение магнитного поля на плазму приводит к тому, что плазма оказывается сжатой электродинамическим давлением. На рисунке показан поперечный разрез плазменного столба (1 — стенка камеры, 2 — вакуум, 3 — плазма).

Потоки заряженных частиц

Плазма

Траектории электронов представляются кольцевыми, если смотреть вдоль поля. Можно считать, что эти токи складываются в один круговой поверхностный ток.

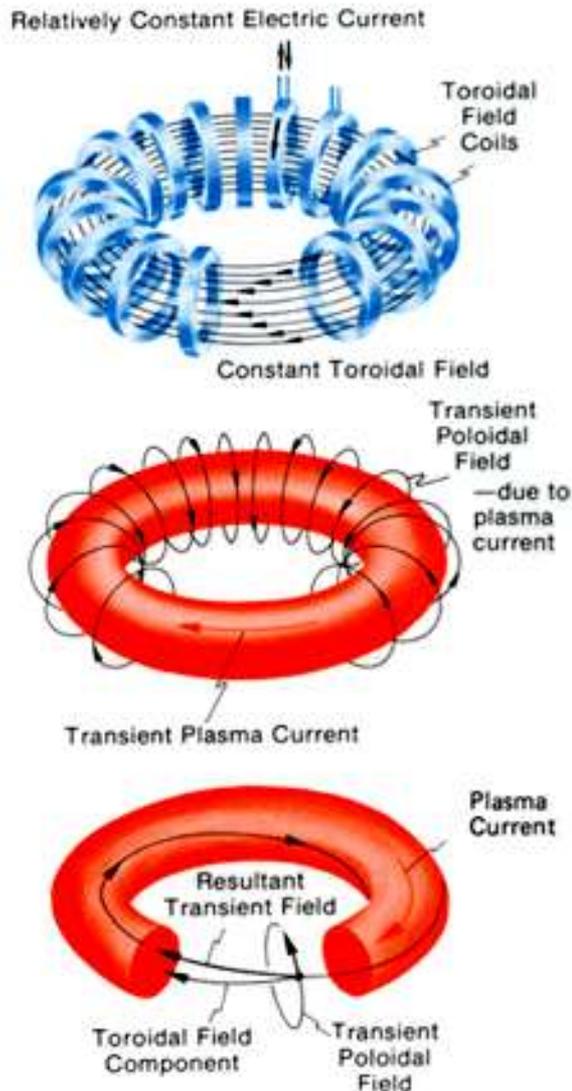
При таком расположении тока и поля возникает сила, направленная внутрь столба. Величина бокового давления будет равна значению плотности электромагнитной энергии, которое в нашем случае равно $H^2/2$ (если считать, что напряженность поля внутри плазмы сводится к нулю полями кольцевых токов).

Потоки заряженных частиц

Плазма

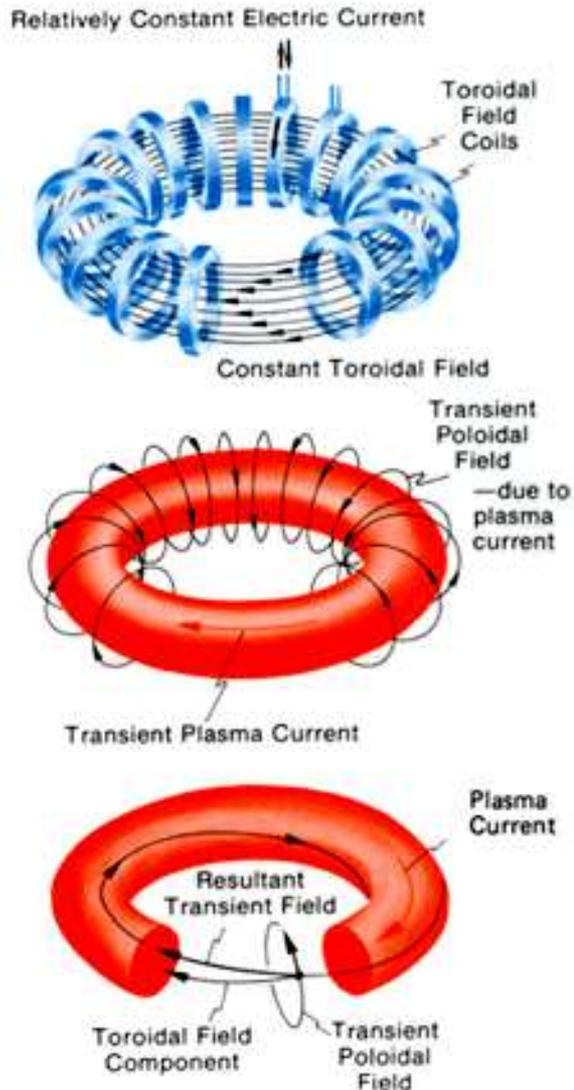
Это давление уравновешивает газовое давление плазмы, которое в отсутствие поля привело бы к немедленному ее расширению.

С эффектом давления магнитного поля связаны надежды на длительное удержания горячей плазмы в концентрированном состоянии.



Потоки заряженных частиц

Плазма



Практическое значение этой возможности состоит в конструировании термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы (Токамак).

При сильноточном газовом разряде электродинамическая сила $\frac{I}{c} [\vec{dl}, \vec{H}]$ приводит к образованию узкого плазменного шнура, оторванного от стенок разрядной трубки.

Плазма

Уравнение $p = \frac{H^2}{2}$ может быть переписано следующим образом. Допустим, что ионная и электронная температуры равны друг другу, тогда

$$p = 2nkT$$

Здесь n — концентрация частиц. Полагая, что шнур имеет форму цилиндра радиуса r_0 , и считая, что происходит скин-эффект, можем для напряженности магнитного поля на поверхности цилиндра записать формулу

$$H = \frac{I}{2\pi r_0}$$

Потоки заряженных частиц

Плазма

Обозначая $\pi r_0^2 n$ — число электронов на единицу длины — через N , получим

$$I^2 = 5,5 \cdot 10^{-14} NT$$

формула записана для силы тока, измеряемой в амперах.

Если начальное давление водорода 0,1 мм рт. ст., радиус трубки 10 см и сила разрядного тока $5 \cdot 10^5$ А, то температура плазмы окажется равной 2 млн. градусов.