

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ  
ПО ФИЗИКЕ АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**«ОПЫТЫ ФРАНКА И ГЕРЦА»**

Казань 2013

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Института физики

УДК 535.3

**Камалова Д.И., Сибгатуллин М.Э., Салахов М.Х.** Методические указания к выполнению лабораторной работы по физике атомных явлений «Опыты Франка и Герца». Учебно-методическое пособие для студентов третьего курса Института физики. Казань, 2013, 25 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание и методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу "Физика атомных явлений» для студентов третьего курса Института физики. Работа «Опыты Франка и Герца» дает представление о дискретности атомных состояний.

**Рецензент:** д.ф.-м.н., профессор Таюрский Д.А.

© Институт физики Казанского федерального университета, 2013.

Опыты Д. Франка и Г. Герца (1913) дали прямое доказательство дискретности атомных состояний, которая является одним из основных явлений физики атомов. Энергия атомной системы не может изменяться непрерывно. Атомная система может обладать лишь определенным набором значений энергии. Каждое из возможных значений энергии относится к конкретному состоянию атомной системы. Опытами Франка и Герца было впервые доказано, что внутренняя энергия атома может меняться только скачками. Они явились непосредственной проверкой существования уровней энергии атомов и наличия квантовых переходов между уровнями с излучением.

В начале XX в. существовали две модели строения атома. Согласно первой модели строения атома (модели Томсона) по всему объему атома с некоторой объемной плотностью распределен положительный заряд. Электроны погружены в эту положительно заряженную среду. Электроны взаимодействуют с элементами положительно заряженной среды атома по закону Кулона. Вторая модель строения атома (планетарная) предполагала, что в центре атома находится тяжелое положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются легкие отрицательно заряженные электроны по круговым либо эллиптическим орбитам подобно планетам вокруг Солнца. Опыты Э. Резерфорда (1908-1913) по рассеянию  $\alpha$  - частиц на атомах показали, что атомы состоят из малого массивного положительно заряженного ядра и окружающей его электронной оболочки, и подтвердили планетарную модель атома. Однако такая модель обладала так называемой электродинамической неустойчивостью, так как согласно законам классической электродинамики, вращаясь по орбите, электрон должен излучать электромагнитную волну и спустя время порядка  $10^{-8}$  с после начала движения, потеряв энергию, упасть на ядро. При таком движении должна меняться непрерывно частота вращения электрона вокруг ядра и тем самым должна меняться частота излучаемой

электромагнитной волны, т.е. атом должен был бы излучать сплошной спектр, что противоречило наблюдаемым линейчатым спектрам.

Н. Бор в 1913 г. выдвинул ряд предположений (гипотез) о свойствах атомов, которые позднее по мере подтверждения их разными экспериментами были сформулированы в виде двух постулатов:

1. Атомы могут длительное время находиться только в определенных, так называемых стационарных состояниях. Энергии стационарных состояний  $E_1, E_2, E_3 \dots$  образуют дискретный спектр.

2. При переходе атома из одного начального стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое конечное состояние с энергией  $E_m$  ( $E_m < E_n$ ) происходит излучение кванта света с частотой  $\omega$ , причем

$$\hbar\omega = E_n - E_m \quad (1)$$

где  $\hbar = h/2\pi$  – постоянная Планка.

Опыты Франка и Герца (Нобелевская премия по физике за 1925 г.) явились проверкой постулатов Бора и убедительно доказали наличие дискретных энергетических уровней атомов.

Схема опытов Франка и Герца показана на рис. 1. Основной частью экспериментальной установки является трехэлектродная лампа Л. Электроны, вылетающие вследствие термоэмиссии с раскаленного катода К, ускоряются напряжением  $U_y$ , приложенным к сетке С. На небольшом расстоянии от сетки помещается анод А, причем между анодом и сеткой приложено тормозящее напряжение  $U_z$ , задерживающее медленные электроны. Количество электронов, достигающих анода, регистрируется чувствительным гальванометром А<sub>2</sub>. Амперметр А<sub>1</sub> регистрирует ток через катод, который в ходе опытов должен оставаться постоянным. Изменение напряжений  $U_y$  и  $U_z$

осуществляется с помощью потенциометров  $R_y$  и  $R_3$ . Весь объем лампы заполнен каким-либо газом. В опытах Франка и Герца таким газом были пары ртути при давлении около 1 мм рт. ст.

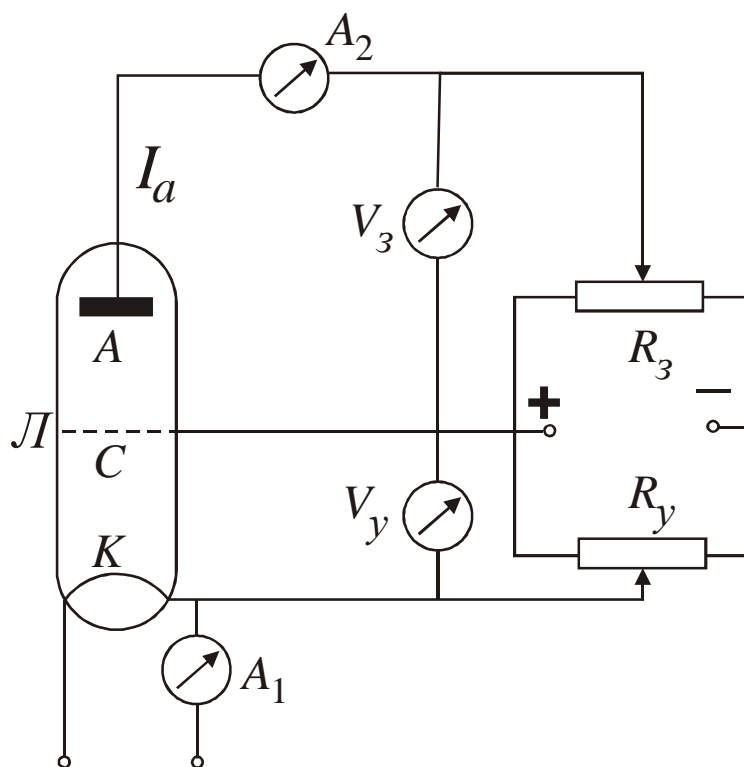


Рис. 1. Схема опытов Франка и Герца

В ходе экспериментов снималась вольт-амперная характеристика лампы Л, т.е. зависимость анодного тока  $I_a$  от напряжения на сетке  $U_y$  при постоянном напряжении  $U_3$ . Такая характеристика для атомов ртути показана на рис. 2. Она состоит из ряда чередующихся максимумов и минимумов тока. Максимумы токов наблюдались при  $U_y = 4,9; 9,8$  и  $14,7$  В, причем расстояние между положениями максимумов, как показано на рис. 2, равнялось постоянной величине  $4,9$  В.

В действительности максимумы тока получались при значениях  $U_y = 4,1; 9,0$  и  $13,9$  В, что обусловлено наличием контактной разности

потенциалов  $U_K$  между катодом и анодом (обычно катод и анод изготавливаются из разных металлов). Между ними имеется некоторое контактное электрическое поле, которое ускоряет электроны даже в отсутствие приложенной извне разности потенциалов. В опытах Франка и Герца значение  $U_K$  составляло 0,8 В и, усиливая ускоряющее поле, складывалось со значением  $U_y$ , т.е. действительное ускоряющее напряжение определялось величиной  $U_y + U_K$ .

Для объяснения особенностей вольт-амперной характеристики рассмотрим, что происходит при столкновении легких ускоренных электронов с атомами, масса которых во много раз больше массы электрона.

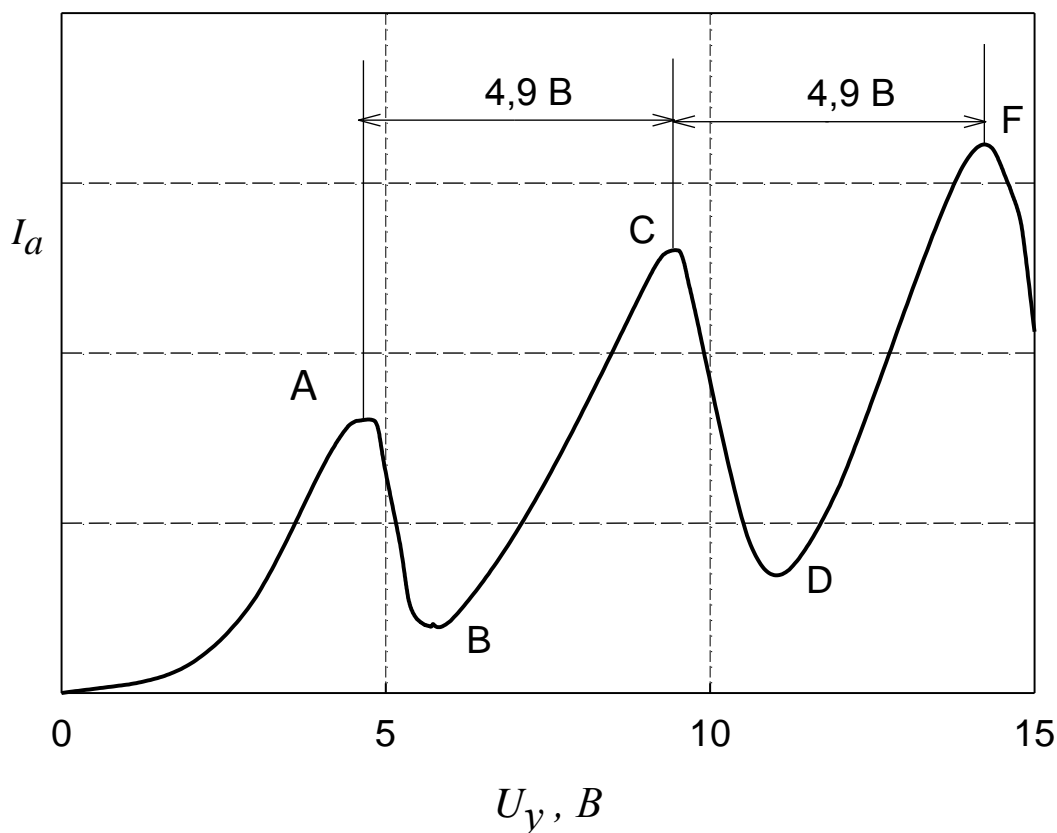


Рис. 2. Зависимость анодного тока от ускоряющего напряжения для паров ртути

Различают два вида соударений: упругие и неупругие в зависимости от изменения начальной кинетической энергии частиц. При упругом ударе сталкивающиеся частицы обмениваются только кинетической энергией, причем суммарная кинетическая энергия электрона и атома не меняется. При неупругом ударе часть кинетической энергии электрона  $K_{am}$  переходит во внутреннюю энергию атома.

На основе законов сохранения энергии и импульса частиц подсчитаем энергию, которая может быть передана электроном атому при упругом и неупругом столкновении. Предположим для простоты, что атом массы  $M$  неподвижен, а электрон с массой  $m_e$  ( $m_e \ll M$ ) и скоростью  $\vec{V}_0$ , двигаясь по классической траектории, претерпевает с ним лобовое столкновение, как показано на рис. 3. При лобовом (центральном) ударе все скорости частиц (начальная скорость электрона  $\vec{V}_0$  и конечные скорости электрона  $\vec{V}_1$  и атома  $\vec{V}$ ) направлены вдоль оси  $x$ , проходящей через центр атома. Рассмотрим вначале неупругий удар и оценим максимальную энергию  $K_{max}$ , которая может быть передана электроном атому при таком ударе. Представим скорости частиц в виде  $\vec{V}_0 = v_{x0} \vec{e}_x$ ,  $\vec{V}_1 = v_{x1} \vec{e}_x$  и  $\vec{V} = V_x \vec{e}_x$ , где  $\vec{e}_x$  есть единичный вектор, направленный вдоль оси  $x$ , а скалярные величины  $v_{x0}$ ,  $v_{x1}$  и  $V_x$  являются проекциями векторов на ось  $x$ . Из законов сохранения энергии и импульса (импульсы частиц в виде векторов  $\vec{p}_0 = m_e \vec{V}_0$ ,  $\vec{p}_1 = m_e \vec{V}_1$  и  $\vec{p} = M \vec{V}$  показаны на рис. 3) имеем следующие уравнения:

$$\frac{1}{2} m_e v_{x0}^2 = \frac{1}{2} m_e v_{x1}^2 + \frac{1}{2} M V_x^2 + K_{am} \quad (2)$$

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p}. \quad (3)$$

При центральном ударе из векторного уравнения (3) может быть получено уравнение, содержащее проекции векторов:

$$m_e v_{x0} = m_e v_{x1} + M V_x. \quad (4)$$

Проекция  $v_{x0}$  и  $V_x$  являются положительными, а проекция  $v_{x1}$  может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от характера соударения частиц. Подставляя  $V_x$  из (4) в (2), получим:

$$v_{x0}^2 = v_{x1}^2 + \frac{m_e}{M} (v_{x0} - v_{x1})^2 + 2 \frac{K_{am}}{m_e}. \quad (5)$$

Уравнение (5) при заданной начальной скорости электрона  $v_{x0}$  показывает функциональную связь между теряемой электроном энергией  $K_{am}$  и конечной скоростью электрона  $v_{x1}$ . При заданном значении  $v_{x0}$

максимальная энергия  $K_{max}$  может быть найдена из условия  $\frac{dK_{am}}{dv_{x1}} = 0$ .

Дифференцирование уравнения (5) по  $v_{x1}$  при условии  $\frac{dK_{am}}{dv_{x1}} = 0$  дает

$v_{x1} = v_{x0} \frac{m_e}{m_e + M}$ . Подставляя это значение  $v_{x1}$  в (5) и обозначая

начальную кинетическую энергию электрона  $\frac{1}{2} m_e v_{x0}^2$  через  $K_0$ , получим

$$K_{max} = K_0 \frac{M}{m_e + M}. \quad (6)$$

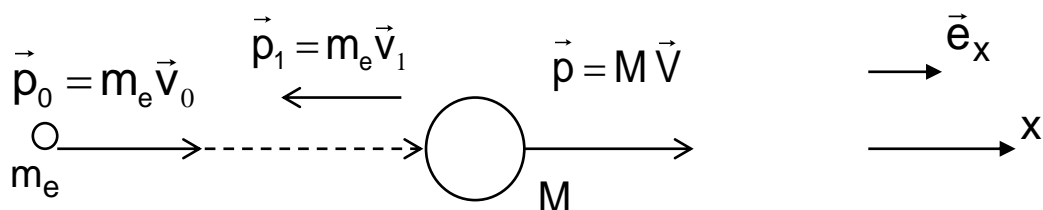


Рис. 3. Лобовое (центральное) столкновение электронов. Направление векторов соответствует случаю упругого удара



Поскольку  $m_e \ll M$ , то из (6) следует, что при неупругом столкновении почти вся энергия электрона может перейти во внутреннюю энергию атома. Для упругого центрального удара справедливы те же уравнения (2) и (4), в которых следует положить  $K_{am} = 0$ . В этом случае проекции скоростей электрона связаны соотношением  $v_{x1} = -v_{x0} \frac{M - m_e}{m_e + M}$ .

Согласно этому соотношению проекция скорости  $v_{x1}$  является отрицательной, т.е. электрон отскакивает от атома, при этом по абсолютной величине проекция скорости  $v_{x1}$  мало отличается при  $m_e \ll M$  от абсолютной величины проекции скорости  $v_{x0}$ . Для отношения проекций скоростей  $V_x$  и  $v_{x0}$  имеем

$$\frac{V_x}{v_{x0}} = \frac{2m_e}{m_e + M} \approx \frac{2m_e}{M}. \quad (7)$$

Согласно (7), переданная электроном атому кинетическая энергия равна

$$\Delta K = \frac{1}{2} M V_x^2 = K_0 \frac{4m_e}{M}. \quad (8)$$

Как видно из (8), при упругом ударе только малая часть энергии электрона передается атому. Упругие удары в основном меняют лишь траекторию движения электрона.

Перейдем теперь к объяснению вольт-амперной характеристики. Франк и Герц полагали, что на участке ОА электроны совершают только упругие столкновения с атомами. При этом они опирались на результаты своих опытов на разных атомах и показали, что электроны при малом значении ускоряющего напряжения  $U_y$  совершают действительно только упругие столкновения с малой потерей кинетической энергии, как это следует из формулы (8). При учете только упругих столкновений картину движения электронов в лампе можно представить следующим образом.

Если бы электроны покидали катод с нулевой скоростью и на пути к аноду не сталкивались с атомами, то все они достигли бы анода при ускоряющем потенциале  $U_y$ , равном тормозящему полю  $U_3$ . При приближении к сетке электроны приобретали бы энергию  $eU_y$ , где  $e$  есть элементарный заряд, равный абсолютному значению заряда электрона. Однако уже при вылете с катода электроны оказываются распределенными по скоростям в соответствии с законом Максвелла. Кроме того, в результате упругих столкновений с атомами их движение становится зигзагообразным и приобретает диффузионный характер, т.к. после каждого упругого удара направление скорости электрона меняется. При центральном ударе, показанном на рис. 3, направление скорости электрона меняется на противоположное. Подлетая к сетке С, электроны имеют самые различные проекции скорости на направление электрического поля и тем самым различные значения проекции  $v_x$  вектора скорости на ось  $x$  (предполагаем, что показанная на рис. 2 ось  $x$  направлена в лампе от катода к аноду). Очевидно, что анода достигнут только те электроны, для которых выполняется условие

$$\frac{1}{2}mv_x^2 \geq eV_3.$$

С ростом  $U_y$  таких электронов становится все больше в случае, когда электроны совершают только упругие столкновения. Этим и объясняется монотонное увеличение тока на участке ОА вольт-амперной характеристики, типичное для всех термоэлектронных приборов.

Монотонное возрастание тока  $I_a$  наблюдается лишь при  $U_y < 4,9$  В. При  $U_y = 4,9$  В характер вольт-амперной характеристики сильно изменяется. На участке АВ ток внезапно резко падает, а затем снова монотонно возрастает на участке ВС. Сильный спад тока на участке АВ

можно объяснить только тем, что при  $U_y > 4,9$  В столкновения электронов с атомами становятся также неупругими, при которых согласно уравнению (6) почти вся кинетическая энергия электрона расходуется на увеличение внутренней энергии атома. Из-за неупругих столкновений при  $U_y > 4,9$  В часть электронов отдает почти всю свою энергию атомам и не попадает на анод из-за наличия задерживающего напряжения  $U_3$ . Потерявшие энергию электроны вылавливаются сеткой и создают сеточный ток. В точке В большая часть электронов участвует в неупругих соударениях и не попадает на анод. Анода достигают в основном только те электроны, которые не участвовали в неупругом столкновении. При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения  $U_y$  электроны, потерявшие часть энергии при неупругом столкновении, все же сохраняют достаточную скорость и соответственно кинетическую энергию для преодоления тормозящего поля между сеткой и анодом. С ростом  $U_y$  таких электронов становится все больше и ток на участке ВС вновь начинает монотонно возрастать.

По достижении точки С при  $U_y = 9,8$  В вольт-амперная характеристика опять сильно изменяется. На участке CD ток резко падает и далее на участке DF снова монотонно возрастает. Такой ход вольт-амперной характеристики можно объяснить, положив, что при  $U_y > 9,8$  В электрон в пространстве между катодом и сеткой может испытать два последовательных неупругих столкновения (с двумя атомами ртути), а далее при прохождении точки F при  $U_y > 14,7$  В - три последовательных неупругих столкновения (с тремя атомами ртути) и т.д.

Итак, для атомов ртути первый максимум тока достигается при ускоряющем напряжении  $U_y = 4,9$  В. Последующие максимумы тока достигаются при значениях  $U_y = 9,8$  В;  $14,7$  В и т.д., кратных значению

ускоряющего напряжения  $U_y = 4,9$  В. При  $U_y = 4,9$  В электрон приобретает кинетическую энергию  $K_e = 4,9$  эВ. (1 эВ – внесистемная единица энергии, применяемая для измерения энергии микрочастиц и равная произведению заряда электрона на разность потенциалов в 1 В;  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж).

Таким образом, энергия 4,9 эВ имеет особое значение для атомов ртути. Меньшую энергию они не поглощают (при меньшей энергии электрона удар упругий). Энергию же 4,9 эВ атомы ртути поглощают полностью.

Появление возбужденных атомов ртути должно сопровождаться появлением электромагнитного излучения. Спектр излучения атомов ртути является линейчатым. Спектральные линии проявляются как в видимой области спектра, так и в ультрафиолетовой. В ультрафиолетовой области спектра самой интенсивной является спектральная линия излучения с длиной волны  $\lambda = 254$  нм, которая хорошо проявлялась также в спектре поглощения паров ртути. По частоте этой линии  $\omega = 2\pi c/\lambda$  ( $c$  – скорость света) и по формуле (1) можно оценить порцию энергии  $\Delta E = \hbar\omega$ . Франк и Герц заметили, что оцененная таким образом энергия  $\Delta E$  для линии атомов ртути  $\lambda = 254$  нм совпала с энергией 4,9 эВ, определенной по вольт-амперной характеристике. Это совпадение энергий говорило об определенной взаимосвязи между неупругими ударами электронов с атомами ртути и излучением или поглощением спектральной линии с  $\lambda = 254$  нм.

Для экспериментального установления взаимосвязи указанных процессов Франк и Герц поставили дополнительные опыты, в которых баллон лампы был выполнен из кварца, прозрачного для ультрафиолетового излучения (в первых опытах баллон лампы был выполнен из стекла, которое поглощает ультрафиолетовое излучение). Дополнительные опыты показали, что при ускоряющем напряжении

$U_y < 4,9$  В атомы ртути в лампе не испускали никакого излучения. Когда же ускоряющее напряжение превышало 4,9 В, атомы ртути испускали излучение с одной длиной волны  $\lambda=254$  нм. Отсюда можно сделать вывод, что приобретаемая атомом ртути энергия в 4,9 эВ является энергией возбуждения атома.

Ускоряющее напряжение 4,9 В, при котором атомы ртути начинают участвовать в неупругом соударении с электронами, называется первым критическим потенциалом или резонансным потенциалом (обозначим его как  $U_p$ ) атома ртути. Такие же резонансные потенциалы  $U_p$  найдены и для других атомов: для атомов калия  $U_p = 1,63$  В, для атомов натрия  $U_p = 2,12$  В и т.д.

Кроме энергии, соответствующей первому критическому потенциалу, атомы могут обладать и более высокими степенями возбуждения. Однако для того, чтобы их обнаружить, необходимо использовать возможно меньшие давления газа. При высоких давлениях число соударений электрона с атомами столь велико, что электрону достаточно набрать энергию  $eU_p$ , соответствующую первому критическому потенциалу  $U_p$ , чтобы передать почти всю ее при столкновении атому и возбудить его. Только при низких давлениях газа и высоком ускоряющем напряжении возбуждаются более высокие энергетические уровни атома.

Задача настоящей работы состоит в определении первого резонансного потенциала атомов ртути и неона. Работа выполняется на лабораторном комплексе фирмы LEYBOLD DIDACTIC GMBH (Hürth, Германия).

## Порядок выполнения работы

### Аппаратура:

трубка Франка-Герца со ртутью,  
посадочное место для трубки со штырьками,  
электрический нагреватель на 220 В (нагревательная печь),  
блок питания и управления установки Франка-Герца,  
термопара NiCr-Ni,  
трубка Франка-Герца с неоном в держателе,  
двухканальный осциллограф,  
два экранированных кабеля BNC/ 4мм,  
соединительный кабель к трубке Франка-Герца с неоном,  
аппаратный блок SENSOR-CASSY 2  
ноутбук с программой CASSY Lab 2.

### *Опыт Франка и Герца с ртутью*

Для предварительного наблюдения вольт-амперной характеристики и оптимизации параметров эксперимента сначала рекомендуется использовать двухканальный осциллограф.

1. Убедитесь, что блок питания и управления установки выключен. Выключатель находится на задней стенке блока.
2. Подсоедините нагревательную печь через 4-миллиметровые гнезда на задней стенке блока.
3. Присоедините медный провод медной втулки 4-миллиметровой желто-зеленой штепсельной вилкой к желто-зеленому гнезду предохранителя, расположенного на задней стенке блока, чтобы экранировать трубку Франка-Герца от мешающих полей.

4. Вставьте вилку термопары в гнездо (**b**) на передней панели установки и штекер трубки Франка-Герца в гнездо (**c**), как указано на рис.4.

5. Убедитесь, что термопара введена в глухое отверстие медного цилиндра до отказа, а сам цилиндр с трубкой Франка-Герца помещен в нагревательную печь.

6. Поверните переключатель режимов (**d**) в положение RESET и включите блок питания выключателем, расположенным на задней панели блока питания. После нескольких секунд светодиодный индикатор  $H_g$  изменит цвет с зеленого на оранжевый.

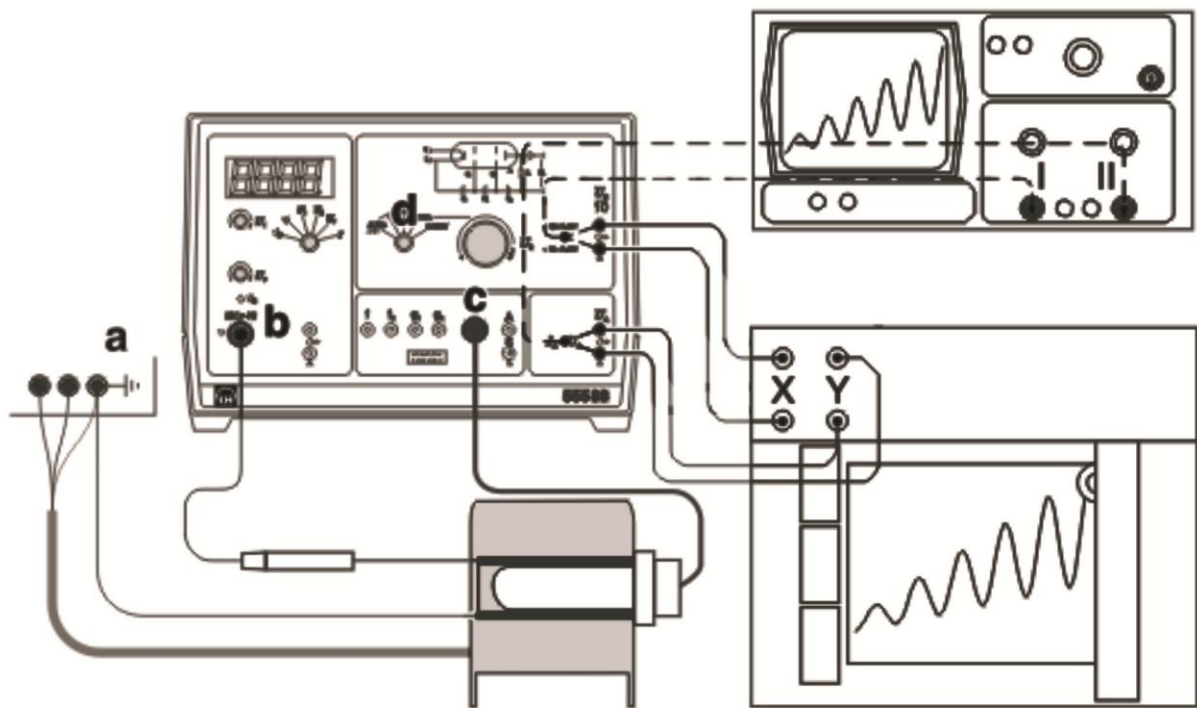


Рис. 4. Экспериментальная установка для опыта Франка-Герца с ртутью

7. Переключатель вида измерений установите в положение  $\theta_s$  и дождитесь достижения температуры  $\theta_s = 176^\circ\text{C}$  (приблизительно 20-30 минут), контролируя ее с помощью переключателя вида измерений в положении  $\theta$ . Температура сначала достигает максимума и затем

опускается до некоторого конечного значения. При этом индикатор  $H_g$  изменит цвет с оранжевого на зеленый.

8. Для проведения измерений с помощью осциллографа соедините гнезда  $U_2/10$  блока питания и управления с каналом II ( $0,5 \text{ V/DIV}$ ) осциллографа и гнезда  $U_A$  блока питания и управления с каналом I ( $2\text{V/DIV}$ ) осциллографа (рис. 4). Включите осциллограф.

9. Чтобы ввести осциллограф в XY-режим, нажмите кнопку XY на панели осциллографа.

10. Переведите переключатель (d) блока питания и управления в положение «Пилообразный».

11. Установите Y-положение осциллографа так, чтобы верхняя часть кривой полностью помещалась на дисплее осциллографа.

12. Проведите оптимизацию кривой Франка-Герца. Для этого сначала установите переключатель режимов в положение  $U_1$  и плавно выставьте начальное значение напряжения  $U_1 = 1,5 \text{ В}$ . Затем аналогично установите переключатель режимов в положение  $U_3$  и ручкой плавной регулировки выставьте задерживающее напряжение  $U_3 = 1,5 \text{ В}$ . Наблюдайте кривую Франка-Герца.

#### 12.1. Оптимизация температуры $\theta_s$

Если кривая Франка-Герца растет резко (см. рис. 5а) и в трубке Франка-Герца виден газовый разряд через окно в печи (голубое свечение), то немедленно поверните переключатель в положение RESET и подождите достижения необходимой температуры. При необходимости поднимите значение температуры  $\theta_s$ , используя шаговый потенциометр (т.е. через  $5^\circ\text{C}$ ) и ждите несколько минут, пока система не войдет в новое тепловое равновесие.



## 12.2. Оптимизация напряжения $U_1$

Если кривая Франка-Герца растет слишком круто (рис. 5b), т.е. верхний предел тока достигается при значениях ниже  $U_2 = 30$  В и вершина кривой Франка-Герца обрывается, то уменьшайте  $U_1$  до тех пор, пока крутизна кривой будет соответствовать рис. 5d.

Если кривая Франка-Герца слишком ровная, нерельефная, т.е. ток  $I_a$  остается меньше 5 нА во всей области (см. рис. 5c), то увеличивайте  $U_1$  (максимально до 4,8 В) до тех пор, пока крутизна кривой не станет соответствовать рис. 5d.

Если кривая Франка-Герца будет ровной даже после увеличения  $U_1$ , то уменьшайте значение температуры  $\theta_s$  в нагревательной печи, используя потенциометр.

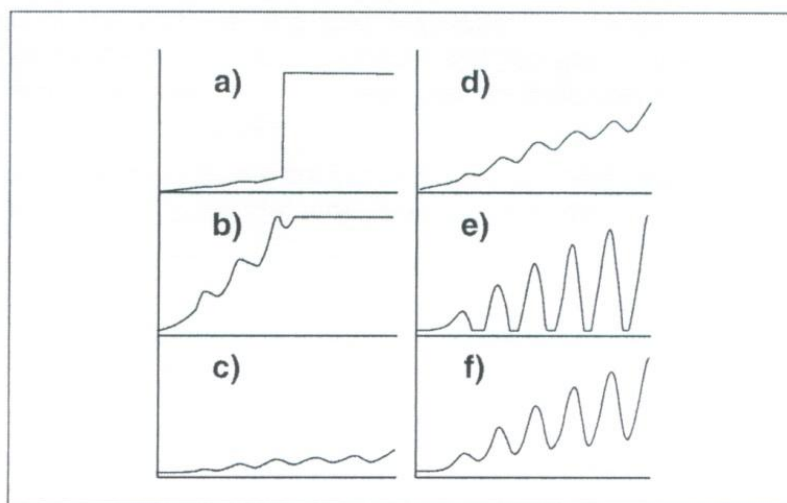


Рис. 5. Возможные варианты кривых Франка-Герца при разных значениях параметров  $U_1$ ,  $U_3$ ,  $\theta_s$

## 12.3. Оптимизация напряжения $U_3$

Большее задерживающее напряжение  $U_3$  вызывает лучше выраженные максимумы и минимумы кривой Франка-Герца; в то же время полный ток коллектора уменьшается.

Если максимумы и минимумы кривой Франка-Герца недостаточно выражены (см. рис. 5d), то сначала увеличьте задерживающий потенциал  $U_3$  (максимум 4,5 В) и затем увеличивайте напряжение  $U_1$  до тех пор, пока кривая Франка-Герца не будет такой, как показано на рис. 5f.

Если минимумы кривой Франка-Герца обрезаны снизу (см. рис. 5e), то уменьшайте  $U_3$  (максимум 4,5 В) и затем  $U_1$  до тех пор, пока не получите форму кривой как на рис. 5f.

13. Для снятия вольт-амперной характеристики по точкам переведите переключатель (**d**) в положение MAN и медленно увеличивайте ручкой ускоряющее напряжение  $U_2$  в интервале от 0 до 30 В с шагом 1 В. При этом снимите показания ускоряющего напряжения  $U_2$  и тока  $I_a$  с дисплея установки, пользуясь переключателем для выбора либо показаний напряжения, либо показаний тока.

14. Поверните ручки плавной регулировки в крайнее левое положение.

15. Полученные результаты оформите в виде графиков  $I_a = f(U_y)$ , из которых определите величину первого резонансного потенциала  $U_p$  атомов ртути как разность абсцисс двух соседних максимумов или минимумов вольт-амперной характеристики. Найдите среднее значение  $U_p$  по разным измерениям. Рассчитайте длину волны, соответствующую резонансному потенциалу. Оцените отношение масс  $M/m_e$  для случая атома ртути.

## Опыт Франка и Герца с неоном

Для предварительного наблюдения вольт-амперной характеристики и оптимизации параметров эксперимента сначала рекомендуется использовать двухканальный осциллограф.

1. Убедитесь, что блок питания и управления установки Франка-Герца выключен. Выключатель находится на задней стенке блока.

2. Соедините кабелем трубку Франка и Герца для неона с блоком питания и управления (**а**), как показано на рис. 6.

3. Для проведения измерений с помощью осциллографа соедините гнезда  $U_2/10$  блока питания и управления с каналом II ( $0,5 \text{ V/DIV}$ ) осциллографа и гнезда  $U_A$  блока питания и управления с каналом I ( $2\text{V/DIV}$ ) осциллографа (рис. 6).

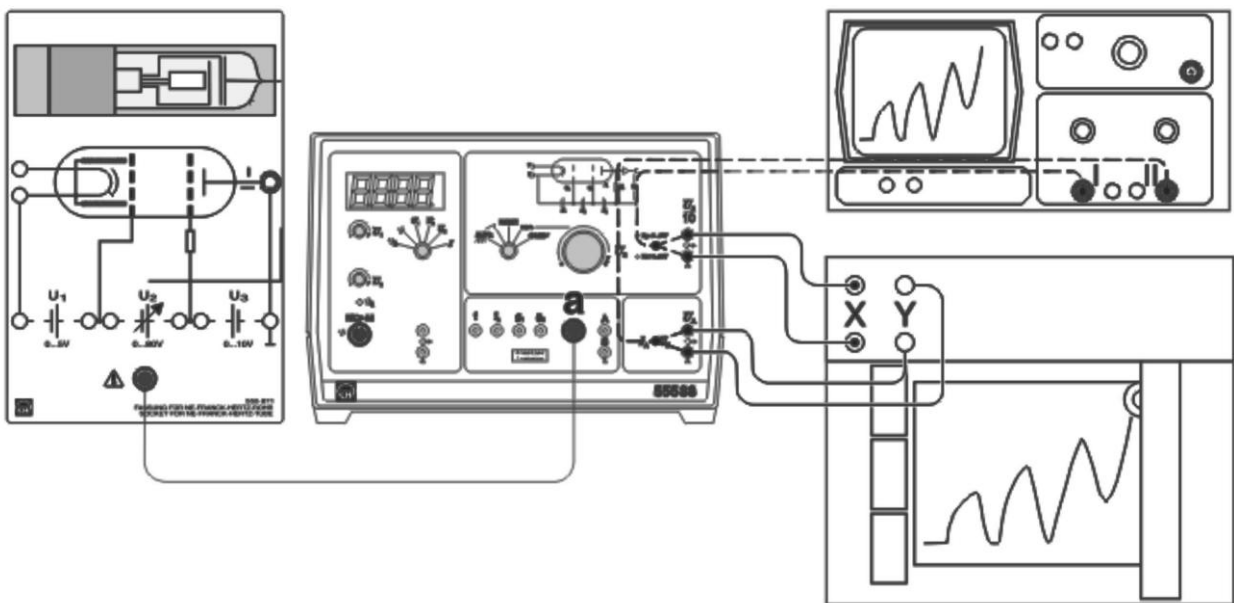


Рис. 6. Экспериментальная установка опыта Франка-Герца с неоном

4. Чтобы ввести осциллограф в XY-режим, нажмите кнопку XY на панели осциллографа.

5. Переведите переключатель блока питания и управления в положение «Пилообразный».

6. Установите Y-положение осциллографа так, чтобы верхняя часть кривой полностью помещалась на дисплее осциллографа.

7. Проведите оптимизацию кривой Франка-Герца. Для этого сначала установите переключатель режимов в положение  $U_1$  и плавно выставьте начальное значение напряжения  $U_1 = 1,5$  В. Затем аналогично установите переключатель режимов в положение  $U_3$  и ручкой плавной регулировки выставьте задерживающее напряжение  $U_3 = 5$  В. Наблюдайте кривую Франка-Герца.

#### 7.1. Оптимизация напряжения $U_1$

Если кривая Франка-Герца растет слишком круто (рис. 7а), т.е. верхний предел тока достигается при значениях ниже  $U_2 = 80$  В и вершина кривой Франка-Герца обрывается, то уменьшайте  $U_1$  до тех пор, пока крутизна кривой будет соответствовать рис. 7с.

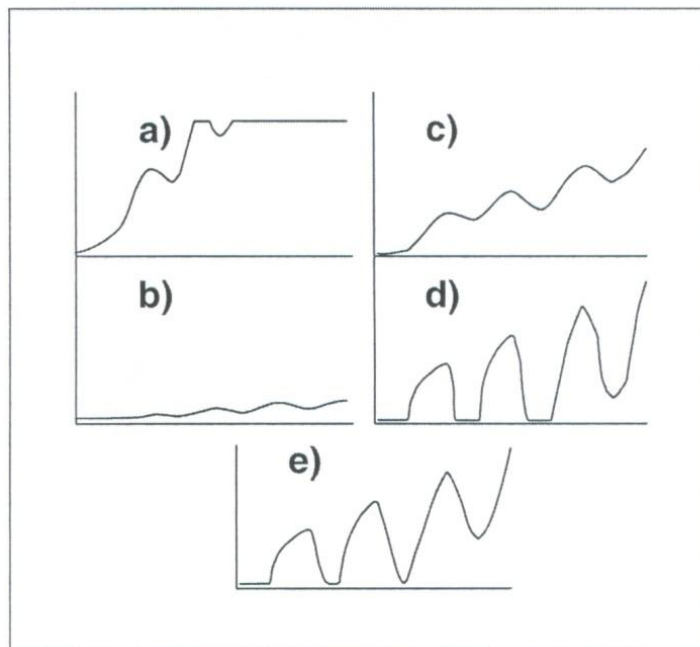


Рис. 7. Возможные варианты кривых Франка-Герца при разных значениях параметров  $U_1$  и  $U_3$

Если кривая Франка-Герца слишком ровная, т.е. ток  $I_A$  остается меньше 5 нА во всей области (см. рис. 7b), то увеличивайте  $U_1$  до тех пор, пока крутизна кривой не станет соответствовать рис. 7с.

### 7.2. Оптимизация напряжения $U_3$

Большее задерживающее напряжение  $U_3$  вызывает лучше выраженные максимумы и минимумы кривой Франка-Герца; в то же время полный ток коллектора уменьшается.

Если максимумы и минимумы кривой Франка-Герца недостаточно выражены (см. рис. 7с), то сначала увеличьте задерживающий потенциал  $U_3$  (максимум 18 В) и затем увеличивайте напряжение  $U_1$  до тех пор, пока кривая Франка-Герца не будет такой, как показано на рис. 7е.

Если минимумы кривой Франка-Герца обрезаны снизу (см. рис. 7d), то уменьшайте  $U_3$  (максимум 18 В) и затем  $U_1$  до тех пор, пока не получите форму кривой как на рис. 7е.

8. Для снятия вольт-амперной характеристики по точкам переведите выключатель в центре панели блока питания и управления в положение MAN и медленно увеличивайте ручкой напряжение  $U_2$  в интервале от 0 до 80 В с шагом 2 В. При этом снимите показания ускоряющего напряжения  $U_2$  и тока  $I_a$  с дисплея установки, пользуясь переключателем для выбора либо показаний напряжения, либо показаний тока.

9. Поверните ручки плавной регулировки в крайнее левое положение.

10. Полученные результаты оформите в виде графиков  $I_a = f(U_y)$ , из которых определите величину первого резонансного потенциала  $U_p$  атомов неона как разность абсцисс двух соседних максимумов или минимумов вольт-амперной характеристики. Найдите

среднее значение  $U_p$  по разным измерениям. Рассчитайте длину волны, соответствующую резонансному потенциалу. Оцените отношение масс  $M/m_e$  для случая атома неона.

*Регистрация и оценка данных с использованием аппаратного блока «SENSOR-CASSY 2» и программного обеспечения «CASSYLab 2»*

Для регистрации вольт-амперных характеристик подключите трубку Франка и Герца для ртути или неона так, как было указано выше. Описанные далее действия выполните для случаев ртути и неона.

1. Соедините SENSOR-CASSY 2 с компьютером через USB порт.
2. Соедините выход  $U_3$  с входом А и выход  $U_A$  с входом В на SENSOR-CASSY с помощью четырех кабелей, из которых два кабеля синие и два кабеля красные. При этом соединяются красные гнезда SENSOR-CASSY 2 с красными гнездами блока питания и управления. Аналогично синие гнезда соединяются с синими гнездами блока питания.
3. Включите компьютер.
4. Загрузите имеющийся на рабочем столе компьютера файл MERCURY в случае ртути или файл NEON в случае неона. Откроется окно программы CASSY Lab 2.
5. В открывшемся подокне CASSYs со схематическим изображением аппаратного блока SENSOR-CASSY 2 нажать кнопку «Show measuring parameters».
6. В открывшемся справа подокне просмотрите заданные для проведения эксперимента параметры и убедитесь в их соответствии параметрам, указанным выше.

7. В подокне со схематическим изображением аппаратного блока SENSOR-CASSY 2 нажать кнопку «Close».
8. Появится график вольт-амперной характеристики в качестве примера того, каким должен быть полученный в работе график зависимости  $I_a = f(U_y)$ .
9. Поверните переключатель режимов (**d**) блока питания и управления в положение RESET.
10. На блоке питания и управления установите те параметры  $U_1$  и  $U_3$ , которые были получены при оптимизации напряжений.
11. На компьютере запустите действие «Measuring time».
12. Появится предложение «Save», на которое ответьте «Нет».
13. Поверните переключатель режимов (**d**) блока питания и управления в положение « $\neg$ ».
14. Наблюдайте на экране вольт-амперную характеристику и определите первый резонансный потенциал как разность абсцисс двух соседних максимумов вольт-амперной характеристики.

### *Литература*

1. А.Н. Матвеев Атомная физика: Учеб. пособие для студентов вузов – 2-е изд.- М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2007. – 432 с.
2. Д.В. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 т. Т.V. Атомная и ядерная физика. – 2-е изд., стереот. М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2002. – 784 с.
3. LEYBOLD DIDACTIC GMBH ([www.ld-didactic.com](http://www.ld-didactic.com)).

## *Вопросы к работе «Опыты Франка и Герца»*

1. Почему электрон в атоме, вращаясь вокруг ядра по законам классической физики, должен упасть на ядро?
2. Сформулировать постулаты Н. Бора. Написать формулу для частоты излучения (поглощения).
3. Написать закон сохранения энергии для упругого и неупругого столкновений электрона с неподвижным атомом. Как изменится запись закона для движущегося атома?
4. Написать закон сохранения импульса для упругого и неупругого столкновений электрона с неподвижным атомом в векторной и скалярной форме для центрального удара. Как изменится запись закона для движущегося атома?
5. Какая доля энергии передается покоящемуся атому при упругом и неупругом соударениях?
6. Что такое первый резонансный потенциал? В каких единицах он измеряется и как связан с энергией первого возбужденного состояния атома?
7. Каково значение опытов Франка и Герца? Объяснить схему эксперимента.
8. Как будет выглядеть вольт-амперная характеристика трехэлектродной лампы при отсутствии газа в ней (вакуум)?
9. Как объяснить возникновение на вольт-амперной характеристике лампы 1-го максимума, 2-го максимума, 3-го максимума и т.д.?
10. Почему и как видоизменяется вольт-амперная характеристика лампы при увеличении задерживающего потенциала?



11. Почему в работе рекомендуется измерять первый резонансный потенциал как разность ускоряющих потенциалов 2-х соседних минимумов или максимумов, а не берется расстояние от 0 до положения 1-го максимума?
12. Какое еще физическое явление с участием атомов (помимо явления возбуждения атомов электронами) может сопровождать процесс спада тока на вольт-амперной характеристике?
13. На какую область длин волн приходится длина волны, соответствующая резонансному потенциалу ртути? Может ли человек визуально наблюдать свечение на такой длине волны?