

**Лабораторная работа**

**Опыт Франка-Герца**

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## опыт Франка-Герца

### Введение

#### ДИСКРЕТНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Классическая и квантовая частицы в потенциальной яме. Согласно классической физике, движение частицы происходит лишь в ограниченной области пространства (финитно), если она находится в потенциальной яме, определяемой физической природой взаимодействия частиц. Иными словами, потенциальная яма есть область, в которой на частицу действует сила притяжения. Термин «потенциальная яма» происходит от вида графика, изображающего зависимость потенциальной энергии частицы от координат, и применяется как в классической, так и в квантовой теории. Основное свойство потенциальной ямы — удерживать частицу, энергия которой меньше глубины ямы; Такая частица внутри потенциальной ямы будет находиться в связанном состоянии.

Связанное состояние — это состояние системы частиц, при котором относительное движение частиц происходит в ограниченной области пространства (является финитным) в течение длительного времени по сравнению с характерными для данной системы периодами. В природе существует огромное число связанных систем: от звездных скоплений и макроскопических тел до микрообъектов — молекул, атомов, ядер.

В классической механике попавшая в потенциальную яму частица с энергией меньше глубины ямы не сможет из нее выйти и будет двигаться внутри ямы; положение частицы на дне ямы отвечает устойчивому равновесию и соответствует нулевой кинетической энергии. Если же энергия частицы превышает глубину потенциальной ямы, то частица преодолевает действие сил притяжения и свободно покидает яму. Примером может служить движение упругого шарика, находящегося в поле сил земного притяжения, в обычной яме с жесткими стенками (рис. 1).

В отличие от классической механики, в квантовой механике энергия, которой может обладать частица, находящаяся в потенциальной яме в связанном состоянии, принимает не непрерывные, а дискретные значения, причем наинизший (основной) уровень лежит выше дна ямы. Действительно, вследствие квантовомеханического соотношения неопределенностей между координатой  $x$  и импульсом  $p$  частицы  $\Delta p \Delta x \sim \hbar$  локализация частицы ( $\Delta p \rightarrow 0$ ) вблизи минимума потенциала приводит к большому значению средней кинетической энергии частицы (из-за большого разброса в значениях импульса  $p \sim \hbar/\Delta x$ ). С другой стороны, уменьшение степени локализации частицы ( $\Delta x \neq 0$ ) приводит к увеличению средней потенциальной энергии, так как частица проводит значительное время в области пространства, где потенциал превышает минимальное значение. Энергия основного состояния соответствует наименьшей возможной

полной энергии квантовомеханической системы, совместимой с соотношением неопределенностей.

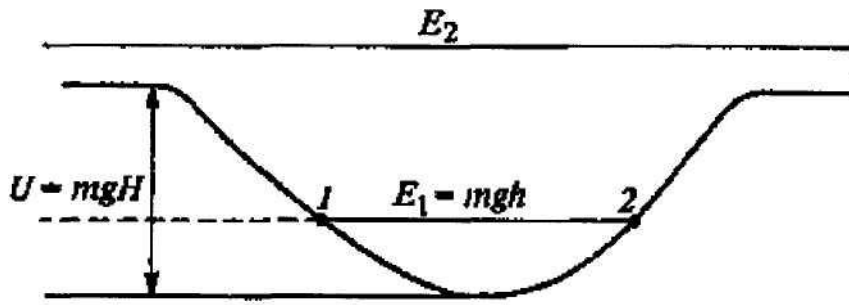


Рис. 1. Шарик массой  $m$  с энергией  $E_1 < U$  не может покинуть потенциальную яму глубиной  $U = mgh$  (здесь  $g$  — ускорение силы тяжести, а  $H$  — высота ямы (обычной), в которую попал шарик) и будет совершать колебания между точками 1 и 2 (если пренебречь трением), поднимаясь лишь до высоты  $h = E_1/mg$ . Если же энергия шарика  $E_2 > U$ , то он покинет яму и уйдет на бесконечность с постоянной скоростью  $v$ , определяемой из соотношения  $mv^2/2 = E_2 - U$ .

Исходя из этих соображений, легко оценить энергию основного состояния частицы в прямоугольной яме шириной  $a$  с бесконечными стенками. В данном случае  $\Delta x \sim a$ , а потому импульс частицы  $p \sim \Delta p \sim \hbar/a$ . Если отсчитывать, как это принято, энергию частицы от дна ямы, то ее минимальная энергия будет равна:

$$E = \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{2ma^2} \quad (1)$$

Это означает, что основное состояние частицы в яме будет соответствовать не дну ямы, как в классике, когда  $E = 0$ , а определяться выражением (1).

Чтобы найти возможные (разрешенные) уровни энергии

частицы в заданном потенциале, надо решить стационарное уравнение Шредингера, которое в одномерном случае имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + U(x)\psi = E\psi \quad (2)$$

Физический смысл имеют лишь конечные, однозначные, непрерывные решения этого уравнения. В соответствии с граничными условиями в одномерной потенциальной яме с бесконечными стенками возможные уровни энергии частицы определяются соотношением

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad n = 1, 2, 3... \quad (3)$$

Как видно, частица, «запертая» в потенциальной яме, может иметь только дискретные, квантованные значения энергии, которые называются уровнями энергии частицы в заданном потенциале.

Если частица находится в прямоугольной потенциальной яме с одной из стенок конечной высоты  $U_0$ , а другой бесконечной, то минимальное значение её энергии (нулевая энергия) равно

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8ma^2} \quad (4)$$

Стационарные уровни в такой яме возникают лишь в том случае, если  $E < U_0$ , т. е. при условии

$$U_0 a^2 > \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m} \quad (5)$$

В левой части этого неравенства стоят параметры потенциальной ямы, а в правой — только масса частицы и

универсальные константы. Если полученное нами условие не выполнено (потенциальная яма слишком узкая или слишком мелкая), в ней не помещается ни одного энергетического уровня. Иными словами, это значит, что, несмотря на то, что потенциал является для частицы притягивающим, связанного состояния не образуется. Такая ситуация встречается довольно часто. Например, силы взаимодействия между двумя нейтронами являются силами притяжения, однако ядра, состоящего из двух нейтронов, в природе не существует.

Все сказанное о связанном состоянии частицы в одномерной яме с одной бесконечной стенкой (при  $x = 0$ ) относится и к трехмерной яме, ибо именно в сферически симметричной трехмерной конечной яме получается точно такое же уравнение.

А вот в одно- и двумерной яме (в которых поле есть функция только от одной или двух координат) всегда имеются уровни отрицательной энергии, т. е. даже при условии

$$|U_0| < \frac{\hbar^2}{ma^2} \quad (6)$$

Так, например, в сколь угодно мелкой одномерной яме шириной  $a$  и глубиной  $U$  энергия связанного состояния равна

$$E = \frac{mU^2a^2}{2\hbar^2} < U \quad (7)$$

Задача об уровнях энергии в одномерной и двумерной ямах не является чисто академической, а имеет практические приложения. Например в длинных нитях движение

квазиодномерное, в пленках — квазидвумерное.

Следует отметить еще одно отличие классического и квантового поведения частицы в потенциальной яме. Согласно квантовой механике, частица, находящаяся в потенциальной яме со «стенками» конечной толщины (типа кратера вулкана), в результате туннельного эффекта может покинуть потенциальную яму даже в том случае, если ее энергия меньше высоты стенок потенциальной ямы. В таком случае говорят, что уровни энергии частицы являются квазистационарными, так как частица «живет» в таком состоянии конечное время. О таких уровнях также говорят как о метастабильных. Все уровни частицы в потенциале со стенками конечной толщины имеют конечную ширину, зависящую, естественно, от энергии состояния и формы потенциала.

Форма потенциальной ямы и ее размеры (глубина и ширина), определяемые физической природой взаимодействия частиц, могут быть различными. Два частных случая формы потенциальных ям имеют очень большое значение в физике:

1. кулоновская потенциальная яма ( $U \propto \frac{1}{r}$ ) — описывающая притяжение атомного электрона ядром;
2. потенциал гармонического осциллятора ( $U = kx^2/2$ ), являющийся одной из моделей ядерного потенциала и играющий важную роль в физике твердого тела, электромагнитного излучения, колебательных спектров молекул.

Дискретность энергетических уровней микрочастицы, находящейся в потенциальной яме, отчетливо проявляется в спектрах излучения и поглощения атомов, молекул, ядер. Ярким подтверждением дискретности атомных уровней являются эксперименты по возбуждению и ионизации атомов электронным ударом, впервые проведенные в 1913 г. Д. Франком и Г. Герцем.



## Опыт Франка-Герца

Методом электронного возбуждения измеряется энергия первого уровня атома гелия в динамическом и статическом режимах.

Одним из простых опытов, подтверждающих существование дискретных уровней энергии атомов, является эксперимент, известный под названием опыта Франка и Герца. Схема опыта изображена на рис. 2.

Разреженный одноатомный газ (в нашем случае — гелий) заполняет трехэлектродную лампу. Электроны, испускаемые разогретым катодом, ускоряются в постоянном электрическом поле, созданном между катодом и сеткой лампы. Передвигаясь от катода к сетке, электроны сталкиваются с атомами гелия. Если энергия электрона, налетающего на атом, недостаточна для того, чтобы перевести его в возбужденное состояние (или ионизовать), то возможны только упругие соударения, при которых электроны почти не теряют энергии, так как их масса в тысячи раз меньше массы атомов.

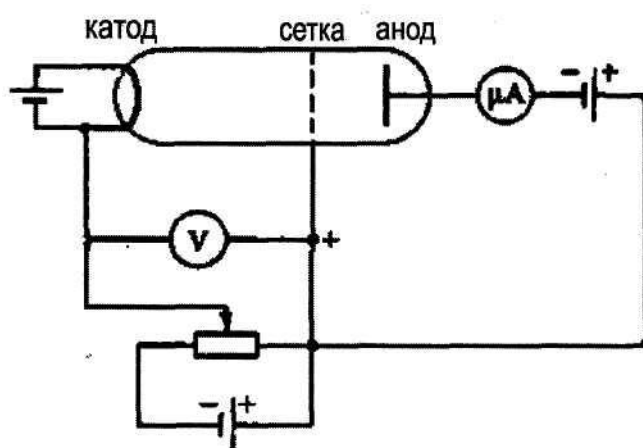


Рис. 2. Схема опыта Франка и Герца

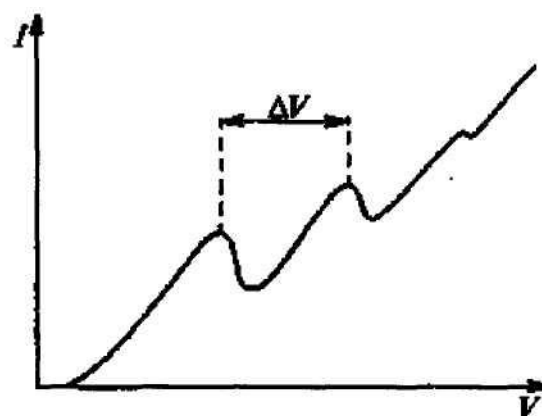


Рис. 3. Схематический вид зависимости тока анода от напряжения катод-сетка

По мере увеличения разности потенциалов между сеткой и катодом энергия электронов увеличивается и, в конце концов, оказывается достаточной для возбуждения атомов. При таких — неупругих — столкновениях кинетическая энергия налетающего электрона передается одному из атомных электронов, вызывая его переход на свободный энергетический уровень (возбуждение) или совсем отрывая его от атома (ионизация).

Третьим электродом лампы является анод. Между ним и сеткой поддерживается небольшое задерживающее напряжение (потенциал анода меньше потенциала сетки). Ток анода, пропорциональный числу электронов, попадающих на него за секунду, измеряется микроамперметром.

При увеличении потенциала сетки ток в лампе вначале растет, подобно тому, как это происходит в вакуумном диоде

(рис. 3). Однако когда энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов, ток анода резко уменьшается. Это происходит потому, что при неупругих соударениях с атомами электроны почти полностью теряют свою энергию и не могут преодолеть задерживающего потенциала (около 3 В) между сеткой и анодом. При дальнейшем увеличении потенциала сетки, ток анода вновь возрастает: электроны, испытавшие неупругие соударения, при дальнейшем движении к сетке успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала.

Следующее замедление роста тока происходит в момент, когда часть электронов неупруго сталкивается с атомами два раза, затем три и т.д. Таким образом, на кривой зависимости тока анода от напряжения сетки имеется ряд максимумов и минимумов, отстоящих друг от друга на равные расстояния  $\Delta U$ ; эти расстояния равны энергии первого возбужденного состояния.

При тщательной постановке опыта можно увидеть и тонкую структуру кривой спада тока, содержащую ряд минимумов, соответствующих возбуждению других уровней и ионизации атома гелия. Для этого нужны лампы специальной конструкции. В нашей постановке опыта эта тонкая структура не видна.

## Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 4.

Внешний вид передней панели прибора показан на рис. 5.

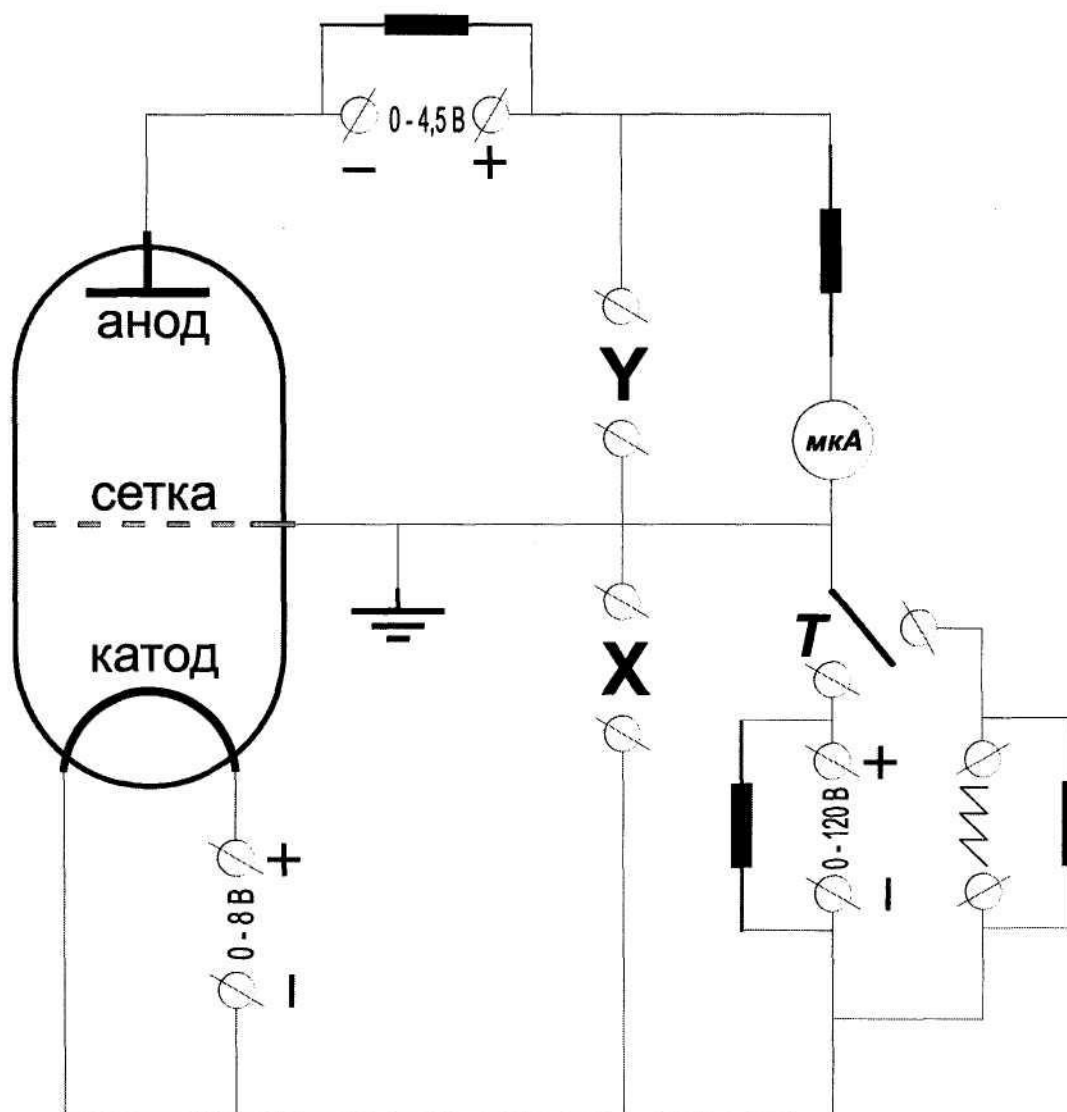


Рис. 4. Общая схема прибора.

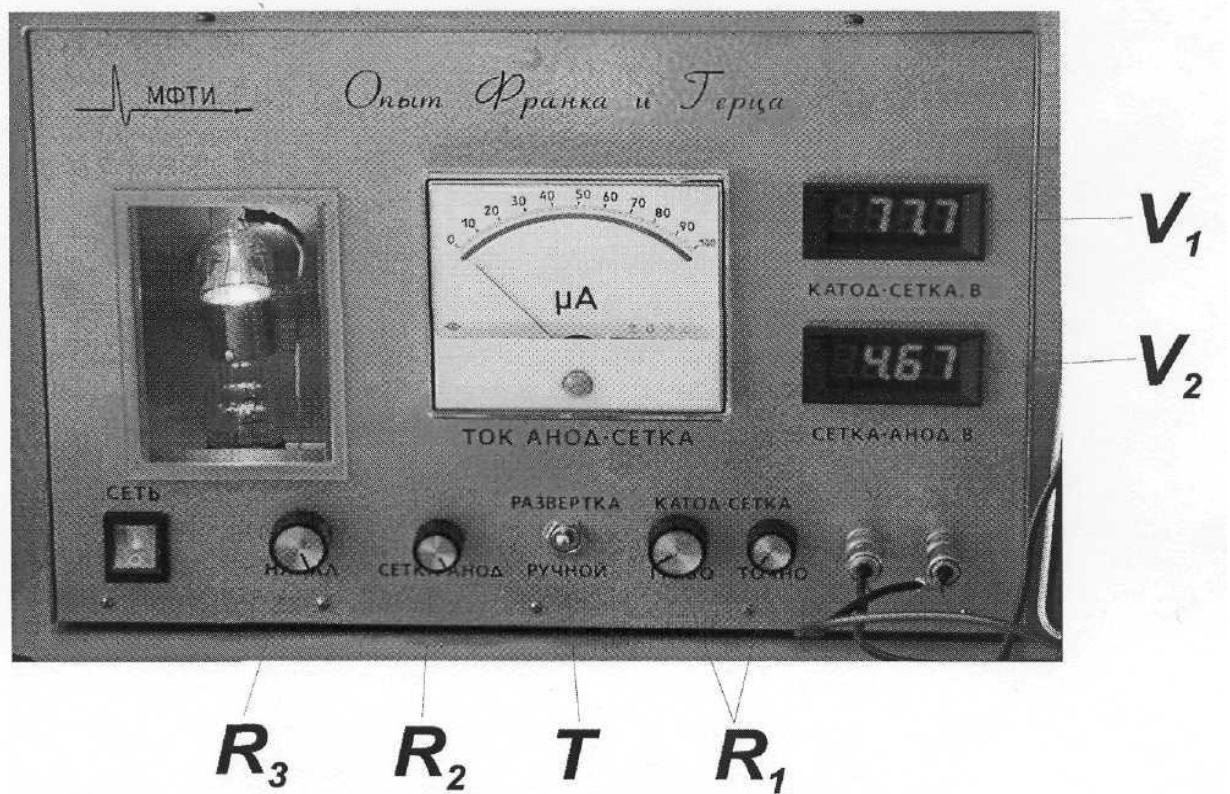


Рис. 5. Внешний вид передней панели прибора.

Для опыта используется серийная лампа ионизационного манометра ЛМ-2, заполненная гелием при давлении  $\sim 1$  Торр. Источником электронов является вольфрамовый катод, нагреваемый постоянным током. Для ускорения электронов, эмитированных катодом, используется сетка лампы — тонкая спираль расположенная вокруг катода. Анод представляет собой полый цилиндр, окружающий и сетку и катод.

Схема может работать в двух режимах: статическом и динамическом. Переключение режимов работы осуществляется тумблером  $T$ . В статическом режиме разность потенциалов между катодом и сеткой постоянна, но может регулироваться вручную потенциометром  $R_1$  в интервале от 0 до 120 В. В динамическом режиме между катодом и сеткой существует переменное напряжение частотой 50 Гц (или пилообразно

меняющееся в зависимости от типа установки), амплитуду которого можно регулировать тем же потенциометром  $R_1$ , что и в статическом режиме. Динамический режим используется для наблюдения на экране осциллографа зависимости тока анода от разности потенциалов между катодом и сеткой. Статический же режим нужен для записи этой зависимости по точкам. В этом случае напряжение между катодом и сеткой измеряется вольтметром  $VI$ , а ток анода — микроамперметром  $мкА$ . В обоих режимах работы между сеткой и анодом поддерживается запирающая разность потенциалов, измеряемая вольтметром  $V_2$ , величину которой можно регулировать потенциометром  $R_2$  в интервале от 0 до 4,5 В.

Напряжение накала катода регулируется потенциометром  $R_3$ .

## Задание

Перед включением установки в сеть проверьте правильность соединения приборов. Переключите осциллограф в режим  $X-Y$  и установите точку в правом нижнем углу экрана. Входы  $X$  и  $Y$  должны быть открыты, т.е. пропускать постоянную составляющую сигнала.

Тумблером  $T$  переведите схему в динамический режим измерений. Регулируя потенциометром  $R_1$  амплитуду горизонтальной развёртки наблюдайте вольтамперную характеристику  $I_a = I_a(V_1)$  лампы. Проследите за ее поведением при изменениях запирающего напряжения и накала.

Тумблером  $T$  переведите схему в статический режим измерений и потенциометром уменьшите до нуля ускоряющее напряжение. Потенциометром  $R_2$  установите задерживающий потенциал  $V_2 = 3$  В. Увеличивая ускоряющее напряжение, проследите за показаниями микроамперметра. Отметьте те значения напряжения, при которых наблюдается уменьшение тока. Постройте график зависимости тока анода от ускоряющего напряжения. По графику определите энергию возбуждения первого уровня атома гелия. Оцените ошибку измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. — М.: Наука, 1983. §110.
2. Гольдин Л. Л., Новикова Г. И. Введение в атомную физику. — М.: Наука, 1988. § 14.