

Московский Государственный Университет
имени М.В. Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦИНА

Атомный практикум

Опыт Франка и Герца

Лабораторная работа № 1

**Московский Государственный
Университет им. М.В. Ломоносова**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦИНА**

Атомный практикум

Опыт Франка и Герца

Лабораторная работа № 1

*Москва
2013*

УДК 539.18

ББК 22.28

Горяга Г.И., Дегтерёва В.В., Красильников С.С.,
Красильникова Н.А.
АТОМНЫЙ ПРАКТИКУМ. Опыт Франка и Герца.
Лабораторная работа № 1.
Под редакцией Красильникова С.С.
Учебное пособие.
М. Издательский отдел УНЦ ДО , 2005 . – 15 стр.

ISBN 5-211-03287

Лабораторная работа из цикла «Атомный практикум» физического факультета МГУ по общему курсу «Атомная физика».
Для студентов физического факультета МГУ.

ISBN 5-211-03287

© Горяга Г.И., Дегтерёва В.В.,
Красильников С.С., Красильникова Н.А.

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА.

Эксперимент Франка и Герца является прямым подтверждением постулатов Бора о том, что:

1. Атом может находиться лишь в определенных дискретных состояниях и иметь внутреннюю энергию, соответствующую состоянию, в котором он находится.

2. Изменение внутренней энергии атома может происходить лишь при переходе между состояниями и равно разности энергии этих состояний (энергии перехода).

Идея эксперимента состоит в анализе энергий электронов, претерпевших столкновения с атомами; при этом можно убедиться в том, что электроны передают атомам энергию лишь порциями, равными энергии переходов. Следует различать два типа столкновений: *упругие* и *неупругие*.

При *упругих* столкновениях сохраняется суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц, а изменение кинетической энергии каждой из них зависит от соотношения масс. Например, при упругом столкновении электрона с покоящимся атомом кинетическая энергия электрона W_e может измениться лишь на величину ΔW_e порядка

$$\Delta W_e \approx W_e \frac{m}{M} \quad (1)$$

где m и M - массы электрона и атома, соответственно. Внутренние энергии частиц при упругом соударении не меняются.

При *неупругом* столкновении кинетическая энергия сталкивающихся частиц изменяется на величину, равную изменению внутренних энергий частиц. Например, при неупругом столкновении электрона с атомом, атом может перейти из одного энергетического состояния в другое, изменив таким образом свою внутреннюю энергию. Разность энергий конечного и начального состояний атома ΔE называется *энергией перехода*.

Изменение кинетической энергии электрона равно энергии перехода (здесь и далее тяжелый и медленный, по сравнению с электроном, атом считаем покоящимся *до* и *после* столкновения) :

$$W_{до} = W_{после} + \Delta E \quad (2)$$

Возбуждение атома (увеличение его внутренней энергии) может произойти лишь тогда, когда кинетическая энергия относительного движения электрона и атома будет превышать энергию перехода. В противном случае столкновение будет упругим, а изменение кинетической энергии - ничтожным. При соударении электрона с возбужденным атомом может произойти обратный процесс: атом переходит в состояние с меньшей внутренней энергией, а энергия электрона увеличивается на величину, равную энергии перехода; такое соударение называется *неупругим соударением второго рода*. Число таких столкновений пропорционально числу возбужденных атомов и в условиях эксперимента Франка и Герца мало. Ниже они не учитываются.

Таким образом, если в объем, заполненный некоторым газом, влетает электрон с энергией W_e , превышающей энергии переходов в атоме, то после столкновений электроны должны разделиться по энергиям на группы:

1. Электроны, столкнувшиеся с атомами только **упруго** и почти не потерявшие энергии.

2. Электроны, столкнувшиеся с атомами **неупруго**, т.е. возбуждившие атомы на различные энергетические уровни и имеющие энергии

$$W_n = W_e - E_n \quad (3)$$

E_n -- энергия перехода из основного энергетического состояния в энергетическое состояние с номером n (при не слишком высоких температурах, согласно распределению Больцмана, почти все атомы находятся в основном состоянии).

В эксперименте Франка и Герца [1] наблюдается возбуждение самого нижнего (из возбужденных) уровня, далее называемого *резонансным*. Потенциал, соответствующий энергии возбуждения этого уровня, называется **резонансным потенциалом**.

В лабораторной работе для наблюдения возбуждения резонансного уровня используется трехэлектродная лампа, заполненная парами исследуемого элемента.

Электрическая схема эксперимента представлена на рис.1. Электроны, испущенные катодом, ускоряются электрическим полем между сеткой и катодом и испытывают столкновения с атомами. По мере продвижения от катода к сетке изменяется их энергия, численно равная (в электрон - вольтах) пройденной от катода разности потенциалов (в вольтах) за вычетом энергии, потерянной при столкновениях с атомами.

Тормозящее поле между сеткой и анодом является анализатором энергетического спектра электронов, пропуская к аноду лишь те электроны, энергия которых превышает тормозящую разность потенциалов.

Если потенциал сетки относительно катода не превышает резонансного потенциала атома, то нигде в лампе не может происходить неупругих столкновений

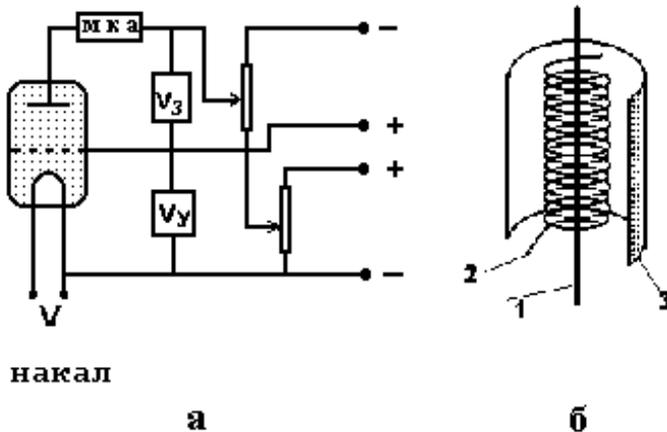


Рис. 1. Электрическая схема опыта Франка и Герца:
 а) -- электрическая схема; б) -- конструкция лампы;
 1 -- катод прямого накала; 2 -- сетка; 3 -- анод.

По мере повышения ускоряющего потенциала при постоянном тормозящем, в районе сетки возникает первая зона столкновений. Медленные (после неупругих столкновений) электроны, неспособные преодолеть задерживающий потенциал, не доходят до анода - попадают на сетку - анодный ток падает. При дальнейшем росте ускоряющего потенциала зона неупругих столкновений отодвигается от сетки к катоду и на оставшемся до сетки пути электроны набирают энергию, достаточную для преодоления тормозящего поля между сеткой и анодом - анодный ток вновь возрастает. Как только потенциал сетки относительно катода превысит удвоенный потенциал возбуждения уровня, картина повторится, появится вторая зона неупругих соударений в районе сетки, второй минимум тока и т.д. (В экспериментах со ртутью, выполненных Франком и Герцем, наблюдалось до пяти минимумов анодного тока).

Движение электронов в лампе имеет характер переноса - дрейфа - вдоль электрического поля, сопровождающегося диффузией из-за частых упругих столкновений. Энергия электрона, дрейфующего от катода к сетке, определяется только пройденной от катода разностью потенциалов; на расстоянии r от катода энергия электрона равна

$$E(r) = e [U(r) - U(0)]$$

Полагая потенциал катода равным нулю $U(0) = 0$, (потенциал падает вдоль катода на величину, равную напряжению накала.) определим радиус, за которым начинается зона неупругих столкновений, соотношением

$$E(r_1) = eU(r_1) = E_1$$

E_1 - энергия возбуждения резонансного уровня.

Если энергия электрона превышает порог возбуждения резонансного уровня, то среднее время, в течение которого произойдет неупругое столкновение (возбуждение атома), определится соотношением

$$\tau_{неупр} = 1 / N v \sigma_{неупр} \quad (4)$$

здесь N - плотность атомов, $\sigma_{неупр}$ -- сечение неупругого столкновения, v - скорость электрона. **За это время электрон, дрейфуя вдоль электрического поля и продолжая набирать энергию, не должен достичь порога возбуждения следующего за резонансным уровня E_2 :**

$$E_1 + e\mathcal{E} v_{др} \tau_{неупр} < E_2 ; \quad (5)$$

здесь - \mathcal{E} - электрическое поле, $V_{др}$ - скорость дрейфа; второй член в левой части - энергия, набранная электроном в дрейфовом движении вдоль поля за время, необходимое для одного неупругого столкновения. Поскольку электрон после каждого (в среднем) упругого столкновения теряет направленную скорость, скорость дрейфа можно считать величиной порядка скорости, набираемой электроном на одном свободном пробеге за время τ

$$V_{др} = \frac{e\mathcal{E}}{m} \tau = \frac{e\mathcal{E}}{m} \frac{1}{N v \sigma_{унр}} \quad (6)$$

Если выполняется условие (5), то скорость электрона в соотношениях (4) и (6) можно считать не сильно превышающей порог возбуждения резонансного уровня и оценить величиной $v_1 = \sqrt{2E_1/m}$. Подставив теперь (4) и (6) в (5), получим оценку величины сечения неупругого столкновения - возбуждения атома:

$$\sigma_{неунр} > \sigma_{унр} \frac{(e\mathcal{E}\lambda)^2}{E_1(E_2 - E_1)}$$

$$\lambda = \frac{1}{N \sigma_{унр}} \quad (7)$$

λ -- длина свободного пробега электрона.

Условие (5), обеспечивающее возбуждение **только резонансного уровня**, требует для своего выполнения достаточно высокой плотности атомов. Электрическое поле в цилиндрической лампе в районе сетки равно

$$\mathcal{E} = \frac{V_{сет}}{R \ln(R/r)}$$

здесь R - радиус сетки, r - радиус нити катода, $V_{сет}$ потенциал сетки относительно катода. Если в районе сетки расположена зона неупругих столкновений, то можно положить

$$e\mathcal{E} = \frac{E_1}{R \ln(R/r)} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получаем оценку величины эффективного сечения возбуждения атома:

$$\sigma_{неупр} > \sigma_{упр} \frac{E_1}{E_2 - E_1} \left(\frac{\lambda}{R \ln(R/r)} \right)^2 \quad (9)$$

Измерению подлежат зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения при постоянном задерживающем (*анодные характеристики*) и от задерживающего при постоянном ускоряющем (*характеристики задержки*). Типичный вид анодных характеристик и характеристик задержки изображен на рис. 2, 3 и 4.

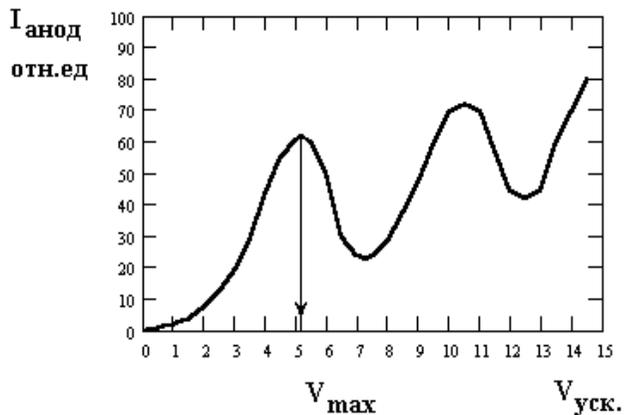


Рис . 2. Анодная характеристика .

Глубина минимума на анодной характеристике и сдвиг его относительно максимума тока (рис. 2) зависит от величины задерживающего потенциала. Необходимо отметить, что начало отсчета потенциалов не является определенным из-за влияния различных факторов: контактной разности потенциалов, распределения потенциала вдоль катода.

Кроме того, поскольку измеряется интегральный ток на всю поверхность анода, диффузия электронов вдоль оси лампы также эффективно приводит к сдвигу начала отсчета потенциалов. Поэтому потенциал первого максимума V_{max} анодного тока не определяет резонансного потенциала атома, **разность же потенциалов двух соседних максимумов тока равна разности потенциалов между началами зон неупругих столкновений, т.е. равна резонансному потенциалу с точностью до разности потенциалов между началом и концом зоны неупругих столкновений, определяемой соотношением (5).**

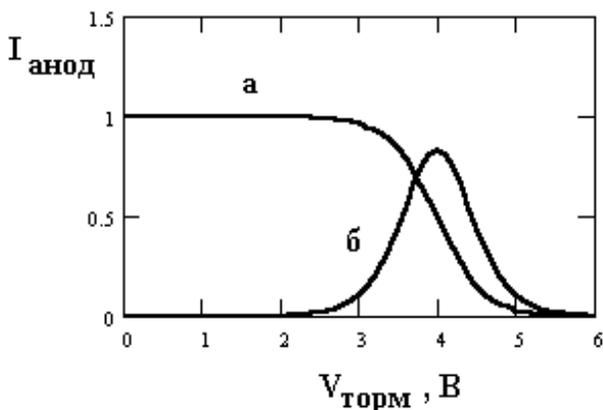


Рис. 3. Характеристика задержки (а) и распределение электронов по энергиям (б) в случае упругих столкновений, $V_{\text{уск}} = \text{const} < V_{\text{max}}$

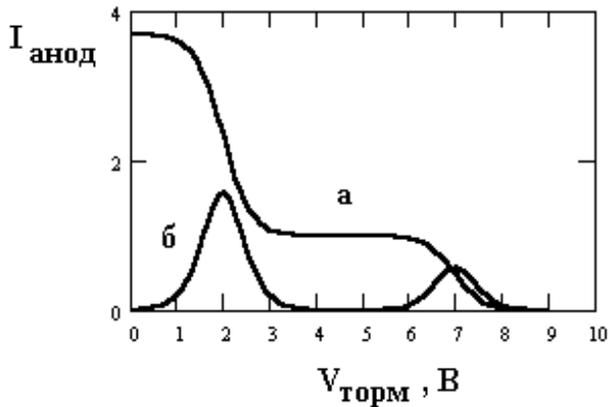


Рис. 4. Характеристики задержки (а) и распределение электронов по энергиям (б) в случае неупругих столкновений, $V_{\text{уск}} = \text{const} > V_{\text{max}}$

Дифференцирование (кривая "б" на рис. 3,4) характеристики задержки (кривая "а") дает представление о распределении электронов по энергиям в лампе.

Задача эксперимента заключается в подборе режима (давления, тока накала, ускоряющего и задерживающего потенциалов), обеспечивающего получение наилучших анодных характеристик и характеристик задержки ламп. Лампы наполнены парами ртути или инертным газом. Простота регулирования давления насыщенных паров ртути путем нагрева позволяет наблюдать токовые характеристики при различных соотношениях длины свободного пробега электрона и радиуса сетки.

ЗАДАНИЕ.

1. Снять анодную характеристику и характеристику задержки ртутной лампы при комнатной температуре (при $V_{\text{уск}} > V_{\text{рез}}$).

ВНИМАНИЕ! При работе с ртутной лампой анодный ток не должен превышать 1 мкА.

2. Подобрать режим (изменяя величину тормозящего потенциала и ток накала), снять анодные характеристики лампы с инертным газом при двух задерживающих потенциалах и определить резонансный потенциал. Давление газа 1,2 мм рт. ст.

ВНИМАНИЕ! При работе с гелиевой лампой анодный ток не должен превышать 10 мкА .

3. Снять характеристики задержки лампы с инертным газом при двух ускоряющих потенциалах:

а) немного меньше V_{\max} (на 3 – 4 В)

б) немного больше V_{\max} (на 3 – 4 В).

Увеличением задерживающего потенциала добиться $I_{\text{анод}} = 0$

4. Снять те же характеристики (пункты 2 и 3) горячей

~ 100 °С ртутной лампы (см. Приложение) :..

а) немного меньше V_{\max} (на 1 – 2 В)

б) немного больше V_{\max} (на 1 – 2 В).

Увеличением задерживающего потенциала добиться $I_{\text{анод}} = 0$

5. Оценить сечения возбуждения резонансного уровня атомов ртути и инертного газа электронами. Сечения упругого рассеяния считать равными:

$$\sigma_{\text{упр}}(\text{Hg}) \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$$

$$\sigma_{\text{упр}}(\text{He}, \text{Ne}) \approx 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$$

6. Получить анодные характеристики лампы с инертным газом на экране осциллографа. Схема включения лампы изображена на рис.5.

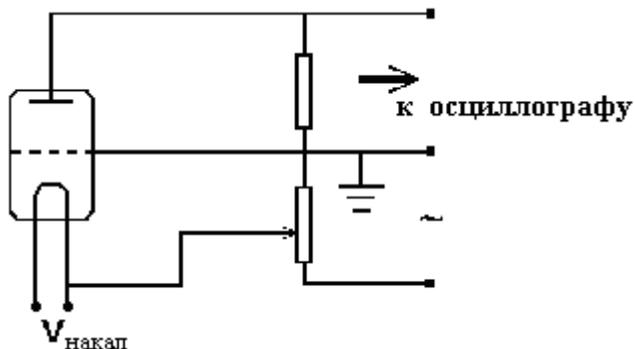


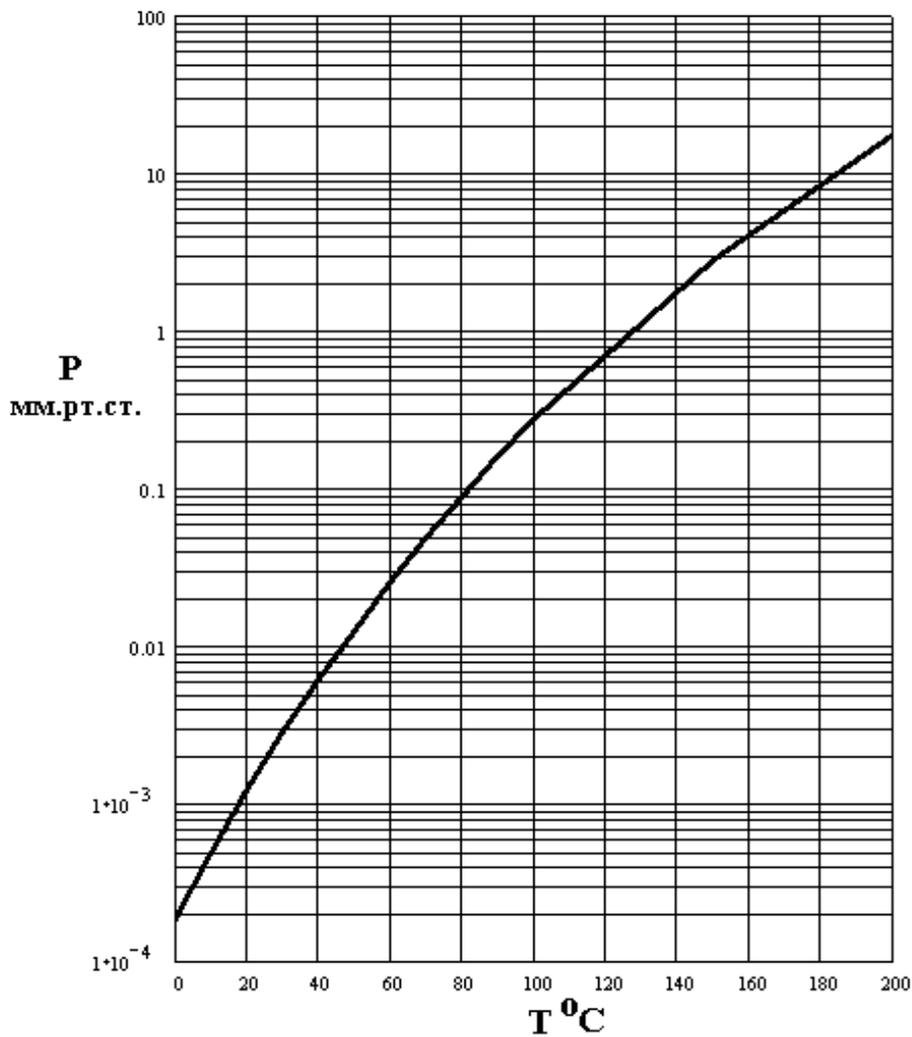
Рис. 5. Схема подключения лампы к осциллографу.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Шпольский Э.Ф. Атомная физика.-- М.: Наука, 1974, т.1. гл.VII.
2. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. - М.-Л.: Физматгиз,1963.
3. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике.--М.: Мир, 1974.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Зависимость давления насыщенного пара ртути от температуры



Учебное издание

**Горяга Г.И. , Дегтерева В.В.Красильников С. С.,
Красильникова Н.А.**

Опыт Франка и Герца

Лабораторная работа № 1

Методическое пособие для студентов 3-го курса физиче-
ского факультета МГУ

Редактор: Красильников С.С.