

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

«21» 04 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3-13

**ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА И ПОСТОЯННОЙ
РИДБЕРГА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы 3-13
«Изучение спектра атома водорода и определение постоянной
Ридберга» по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и
специальностей

Томск 2016

УДК 53 (076.5)

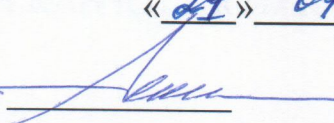
Изучение спектра атома водорода и определение постоянной Ридберга,
Методические указания к выполнению лабораторной работы 3-13 по
курсу «Общая физика» по теме «Оптика» для студентов всех
направлений и специальностей, 15 с.

Составитель: Т.Н. Мельникова

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию
методическим семинаром кафедры общей физики ТПУ

«21» 04 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ, А.М. Лидер



ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА И ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Цель работы: исследование спектра излучения атома водорода в видимой области спектра (серия Бальмера), нахождение постоянной Ридберга и постоянной Планка.

Приборы и принадлежности: гониометр с голографической дифракционной решеткой, набор спектральных ламп с источником питания.



Макс Карл Эрнст Людвиг Планк — немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики.

Научные труды Планка посвящены термодинамике, теории теплового излучения, квантовой теории, специальной теории относительности, оптике.

Он сформулировал второе начало термодинамики в виде принципа возрастания энтропии и использовал его для решения различных задач физической химии. Применив к проблеме равновесного теплового излучения методы электродинамики и термодинамики. Планк получил закон распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела (формула Планка) и обосновал этот закон, введя представление о квантах энергии и кванте действия.

Это достижение положило начало развитию квантовой физики, разработкой различных аспектов которой он много занимался в последующие годы («вторая теория» Планка, проблема структуры фазового пространства, статистическая механика квантовых систем и так далее). Планк впервые вывел уравнения динамики релятивистской частицы и заложил основы релятивистской термодинамики. Ряд работ Планка посвящён историческим, методологическим и философским аспектам науки.

Йоханнес Роберт РИДБЕРГ — шведский физик. Основные работы посвятил изучению периодической системы Менделеева и атомных спектров и, в конечном итоге, увязал периодическую систему со строением атомов. Показал, что расположение линий в атомных эмиссионных спектрах может быть описано формулами, аналогичными формуле Бальмера для



спектра водорода. Постоянная, входящая в эти формулы, названа именем Ридберга.



Нильс Хенрик Давид Бор — датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики.

Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Он также внёс значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Согласно квантовой теории излучение света атомами вещества связано с изменением их энергетического состояния. Атом, излучающий квант света (фотон) частоты ν уменьшает свою энергию на величину $h\nu$.

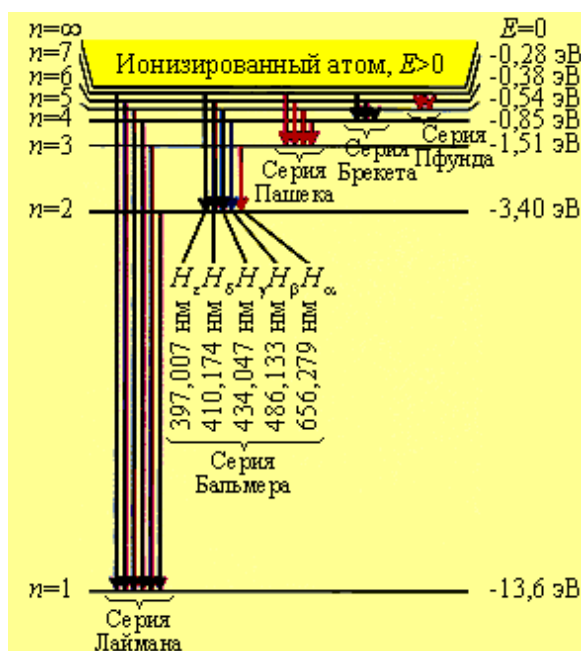
Величина h называется постоянной Планка и является одной из мировых универсальных констант.

По теории Бора, переход атома водорода из одного энергетического состояния в другое связан с переходом электрона атома с одной орбиты на другую. Орбиты электрона в атоме квантованы и поэтому энергия атома водорода не может иметь любое произвольное значение. Дозволенные значения энергии E_1, E_2, \dots в совокупности образуют линейчатый энергетический спектр. По теории Бора дозволенные значения энергии атома водорода рассчитывают по формуле (1), в которую входят h – постоянная Планка, R – постоянная Ридберга, c – скорость распространения света в вакууме, n – номер энергетического состояния атома (номер уровня)

$$E = -Rhc \frac{1}{n^2}; \quad n = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Число n одновременно указывает номер орбиты, отсчитываемой от ядра, на которой находится электрон в данном энергетическом состоянии атома. При $n = 1$ атом водорода обладает наименьшей энергией (электрон при этом находится на орбите, ближайшей к ядру). Такое состояние атома называется нормальным. Состояния, для которых $n = 2, 3, \dots$ являются возбужденными. Атом водорода, находясь в этих состояниях, обладает большими значениями энергий. Энергетический спектр атома водорода, рассчитанный по формуле (1) и переходы, соответствующие линиям *серии Бальмера*, показаны на рис. 1.

При переходе электрона с более удаленной орбиты на более низкую излучается квант света частоты ν , уносящий с собой энергию



$$h\nu = E_n - E_k. \quad (2)$$

Рис. 1.

В формуле (2) E_n и E_k представляют энергии атома в начальном и последующих состояниях. Эти энергии можно вычислить из (1), если известны числа n_n и n_k .

В спектре атома водорода одна из групп спектральных линий соответствует переходам электрона на вторую орбиту ($n = 2$) с более удаленных от ядра высоких орбит ($n_n = 3, 4, \dots$). Эти линии образуют серию Бальмера и имеют частоты, соответствующие видимой области оптического спектра. Частоты и длины волн в спектре излучения атома водорода можно рассчитать, используя формулы (1) и (2). Для линий серии Бальмера

$$h\nu = Rhc \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } n = 3, 4, \dots \quad (3)$$

так как

$$E_n = -Rhc \frac{1}{n^2}, \quad \text{при } n > 2$$

$$E_k = -Rhc \frac{1}{2^2}, \quad \text{при } n = 2.$$

Вместо (3) можно записать (4), если учесть, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4)$$

По теории Бора постоянная

$$R = \frac{e^4 \cdot m}{8\epsilon_0^2 h^3 c}, \quad (5)$$

где: e – заряд электрона, $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл,
 m – масса покоя электрона, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг,
 c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с,
 ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Из (4) и (5) находим h :

$$h = \sqrt[3]{\frac{e^4 m \lambda}{8\epsilon_0^2 \cdot c} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad \text{при } n > 2 \quad (6)$$

Удобнее это соотношение привести к виду (7), обозначив постоянный множитель через A , который удобнее заранее вычислить

$$A = \sqrt[3]{\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 c}},$$
$$h = A \sqrt[3]{\lambda \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что для определения постоянной Планка нужно измерить длины волн спектра излучения атомов водорода, соответствующих переходам электрона:

c уровня 3 на уровень 2 (**красная линия спектра**);
 c уровня 4 на уровень 2 (**голубовато-зеленая линия**);
 c уровня 5 на уровень 2 (**фиолетовая линия**).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Постоянная Ридберга рассчитывается по формуле (5), постоянная Планка – по формуле (7). Для определения постоянной Планка необходимо измерить длины волн спектра атома водорода в серии Бальмера (красной линии, голубовато-зеленой линии и фиолетовой линии).

Чтобы измерить длины волн спектральных линий неизвестного спектра с помощью гониометра, необходимо, прежде всего, знать постоянную дифракционной решетки, используемой в данной работе. Для этого надо измерить углы дифракции, под которыми будут наблюдаться спектральные линии известного спектра, например, спектра излучения ртутной лампы. Постоянная решетки находится из условия усиления света при дифракции

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (8)$$

где d – постоянная решетки, φ – угол дифракции, k – порядок спектра, λ – длина волны монохроматического света. Зная постоянную решетки и, заменив ртутную лампу на водородную, определяют углы дифракции, под которыми наблюдаются линии водородного спектра, а затем, пользуясь формулой (8), определяют длины волн наблюдаемых линий в спектре излучения атомов водорода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Гониометр-спектрометр является оптическим контрольно-измерительным прибором лабораторного типа высокой точности, который позволяет, в частности, производить измерения углов дифракции спектральных линий в видимой области спектра, полученного с помощью дифракционной решетки.

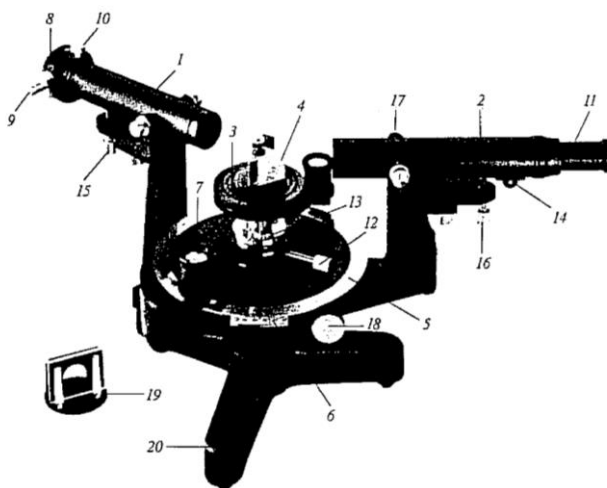


Рис. 2

Спектрометр-гониометр (рис. 2) состоит из следующих основных компонентов: коллиматорной трубки (1), окулярной трубки (2), призмного столика (3) и дисковой шкалы (5). Коллиматорная трубка жестко укреплена на основании, в то время как дисковая шкала,

призменный столик и окулярная трубка могут поворачиваться независимо вокруг оси основания.

1. Коллиматорная трубка.
2. Окулярная трубка.
3. Призменный столик.
4. Призма из оптического стекла в призмодержателе.
5. Дисковая шкала с делениями.
6. Верньерная шкала.
7. Увеличительные стекла.
8. Щель.
9. Винт регулировки ширины щели.
10. Винт точной юстировки коллиматора.
11. Смотровое стекло со встроенной шкалой с делениями от 0 до 100.
12. Фиксирующий винт дисковой шкалы.
13. Винт регулировки положения призмы.
14. Регулировочный винт окулярной трубки.
15. Винт регулировки высоты коллиматорной трубки.
16. Винт регулировки высоты окулярной трубки.
17. Точки крепления коллиматорной и окулярной трубки.
18. Винт тонкой настройки положения окулярной трубки и верньерной шкалы.
19. Оправа для решетки Роуланда.
20. Треножное основание.

Коллиматорная трубка, как упоминалось выше, жестко прикреплена к основанию и имеет щель на свободном конце, то есть который обращен в сторону, противоположную призменному столику. Ширина и высота щели может регулироваться при помощи винта регулировки ширины щели (9) и подвижной заслонки. Ослабив регулировочный винт коллиматора (10), можно передвигать трубку, на которой установлена щель, вдоль коллиматорной трубки, изменяя длину коллиматора. Линза установлена на другом конце коллиматорной трубки (фокусное расстояние коллиматорной линзы $f = 160$ мм). Расстояние между линзой и щелью можно регулировать относительно фокусного расстояния коллиматорной линзы.

Горизонтальное положение призменного столика (3) можно регулировать при помощи регулировочных винтов (13). Призма из оптического стекла, которая идет в комплекте с прибором, должна помещаться на призменном столике в призмодержателе (4). Все остальные призмы размещаются на призменном столике без

призмодержателя. Призмальный столик фиксируется в определенном положении, при помощи юстировочного винта. Как и коллиматорная трубка, окулярная трубка имеет три точки крепления. При установке трубок необходимо, чтобы боковые точки крепления (17) вошли в углубления на стенках трубок.

Окулярная трубка установлена на консоли, которая вращается вокруг оси основания и может фиксироваться в определенных положениях при помощи бокового регулировочного винта. С другого конца трубки, направленного к призмальному столику, находится линза с фокусным расстоянием $f = 160$ мм, а на другом конце регулируемое смотровое окошко со встроенной шкалой с делениями 0-100 (11). После фиксации окулярной трубки в надлежащем положении, можно выполнять тонкую регулировку окулярной трубки при помощи юстировочного винта (18).

Верньер, предназначенный для измерений угла на дисковой шкале с точностью до минуты, крепится на окулярной трубке (6). Увеличительное стекло (7) облегчает чтение данных измерений.

Диск (5) отградуирован от 0° до 360° и может вращаться вокруг оси основания прибора. Он может быть зафиксирован в любом положении при помощи стопорного винта (12).

Призму с призмодержателем (4) можно заменить на оправу для решетки Роуланда (19). Оправа для решетки Роуланда входит в комплект прибора.

ЗАДАНИЕ

Ознакомьтесь с работой гониометра – спектрометра.

1. Определите постоянную дифракционной решетки, используемой в гониометре в качестве спектрального прибора.
2. Измерьте спектр излучения атома водорода.
3. Рассчитайте *постоянную Планка* и *постоянную Ридберга*.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

I. Определение постоянной дифракционной решетки.

1. Установите против выходного отверстия осветителя перед входной щелью гониометра *ртутную* лампу.
2. Включите ртутную лампу.
3. Установите на столик гониометра дифракционную решетку.
(Пункты 1 - 3 выполняются инженером лаборатории.)
4. Наблюдайте через окуляр гониометра линии спектра излучения ртути.

5. Измерьте показания оптического микрометра гониометра для каждой спектральной линии в спектре излучения атома ртути для спектра 1-го, 2-го, 3-го порядков слева и справа от центрального максимума. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

Номер линии	Цвет линии	Длина волны	Угол дифракции (град)						
			1-ый порядок		2-ой порядок		3-й порядок		
			слева	справа	слева	справа	слева	справа	
	фиолетовая								
	голубая								
	зеленая								
	желтая 1								
	желтая 2								

6. Определите, используя формулу (8)

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

постоянную дифракционной решетки d , используя дифракции для всех наблюдаемых линий в измерении атомов ртути слева и справа от центрального максимума для 1-го, 2-го и 3-го порядков и вычислите среднеарифметическое значение d_{cp} .

II. Измерение длин волн спектра излучения атомов водорода с помощью гониометра-спектрометра и дифракционной решетки и определение постоянной Планка и постоянной Ридберга

1. Установите против выходного отверстия осветителя перед входной щелью гониометра водородную лампу и зажгите в ней разряд.
2. Измерьте показания оптического микрометра гониометра для каждой спектральной линии в спектре излучения атомов водорода для спектров 1-го, 2-го и 3-го порядков. Результаты измерений запишите в таблицу 2, аналогичную таблице 1. (Таблицу 2 составьте самостоятельно).
3. Определите, используя формулу (8) $d \sin \varphi = k\lambda$, длину волны для каждой спектральной линии в спектрах 1-го, 2-го и 3-го порядков; среднеарифметическое значение длины волны для каждой спектральной линии и, именно эти значения запишите в таблицу 2.

4. Рассчитайте по формуле (7) $h = A\sqrt[3]{\lambda\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$ постоянную Планка,
а по формуле (5) $R = \frac{e^4 \cdot m}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$ постоянную Ридберга.
5. Оцените погрешность в определении постоянной Планка.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое спектральная серия?
2. На основе каких опытов и кем была предложена ядерная модель атома? Сформулируйте основной результат этих опытов.
3. В чем состоит несоответствие ядерной модели атома с классической электродинамикой?
4. Сформулируйте первый постулат Бора – постулат о стационарных состояниях атома.
5. Сформулируйте правило квантования боровских орбит и напишите формулу, выражающую это правило.
6. Сформулируйте второй постулат Бора – постулат частот и напишите формулу, выражающую этот постулат.
7. Какая физическая величина называется волновым числом? В каких единицах она измеряется?
8. Как называется и в каких единицах измеряется постоянная, входящая в сериальную формулу Бальмера, записанную для волновых чисел?
9. Каким рядом чисел выражается отношение энергий спектра атома водорода в различных состояниях?
10. Какие спектральные серии линий, кроме серии Бальмера, существуют в спектре излучения водорода? Каким переходам электрона соответствуют линии этих серий?
11. Как называется и в каких единицах измеряется постоянная, входящая в сериальную формулу Бальмера, записанную для частот электронных переходов в атоме?
12. Напишите формулу Бальмера для ультрафиолетовой серии в спектре излучения атома водорода.
13. Какая физическая величина называется спектральным термом? Что дает разность термов при переходе атома из одного стационарного состояния в другое?
14. Напишите формулу Бальмера для инфракрасной серии Пашена в спектре излучения атома водорода.
15. Какое состояние атома называется основным? Какие состояния атома называются возбужденными?

16. Какое состояние атома называется ионизированным? Какую элементарную частицу представляет ионизированный атом водорода?
17. Какие квантовые числа, описывающие состояние электрона в атоме, Вам известны и что характеризует каждое из них?
18. Сформулируйте принцип Паули.
19. Что такое кратность вырождения уровня энергии?
20. Если E_1 – энергия электрона в основном состоянии атома водорода, то какова энергия электрона в атоме, находящемся в стационарном состоянии с главным квантовым числом n ?
21. Если r_1 – радиус самой близкой к ядру орбиты в атоме водорода, то каков радиус орбиты электрона в атоме, находящемся в стационарном состоянии с главным квантовым числом n ?
22. Каковы успехи и недостатки теории Бора?
23. Перечислите способы возбуждения атомов. Какой способ возбуждения свечения используется в данной работе?
24. В чем состоит комбинационный принцип? Что называют спектральными термами?
25. На рис. 1 найдите самую коротковолновую и самую длинноволновую линию. Каким переходам они соответствуют?
26. Как формулируется комбинационный принцип Ритца? Какова его связь с условием частот Бора?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.5. – М.: наука, 1998. – 368с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1975. – 927с.
3. Фриш С.Э., Тимофеева А.В. Курс общей физики, М.:Физматгиз, 1970 г.
4. Сивуэшин Д.В. Курс общей физики. Том 3. М.:Физматлит, 2005.
5. Матвеев А.Н, Атомная физика, М.: Высшая школа, 1989 г.
6. Савельев И.В. Курс Физики, т. 3, М.: Наука, 1990.

ГЛОССАРИЙ

1. Алидада — приспособление для измерения углов (вращающаяся часть) в астрономических, геодезических и физических угломерных инструментах — таких, как астролябия, секстант и теодолит.

Роль алидады выполняют специальные оптические системы — отсчётные устройства. Алидада вращается вокруг своей оси относительно неподвижного лимба вместе с верхней частью прибора; при этом отсчёт по горизонтальному кругу изменяется. Если закрепить

зажимной винт и открепить лимб, то алидада будет вращаться вместе с лимбом и отсчёт изменяться не будет.

2. Верньер — в измерительной технике устаревшее название нониуса. Пьер Верньер — французский учёный и изобретатель.

3. Виды спектров. Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три типа: непрерывные (или сплошные), линейчатые, полосатые.

4. Гониометр — прибор для точных измерений углов. Гониометр состоит из коллиматора, зрительной трубы, предметного столика, лимба и оптического отсчетного устройства, смонтированного внутри подвижного основания — алидады. Все элементы установлены на массивном основании. Алидада вместе со зрительной трубой может поворачиваться вокруг оси прибора (вручную, при отпущенном стопорном винте, и плавно, с помощью винта 6 при зажатом винте 7).

5. Квантование — процедура построения чего-либо с помощью дискретного набора величин, например, целых чисел, в отличие от построения с помощью непрерывного набора величин.

6. Коллиматор формирует параллельный пучок света. Источник света S освещает входную щель 1. Ширина щели регулируется винтом 2. Перемещением одной из линз объектива 3 с помощью винта 14 добиваются того, чтобы щель оказалась в фокальной плоскости объектива. Винтом 13 можно изменить наклон оси коллиматора.

7. Комбинационный принцип Ритца — основной закон спектроскопии, установленный эмпирически Вальтером Ритцем в 1908 году. Согласно этому принципу всё многообразие спектральных линий какого-либо элемента может быть представлено через комбинации неких величин, получивших название *термы*. Спектроскопическое волновое число (не следует путать с волновым вектором k) каждой спектральной линии можно выразить через разность двух термов:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = T_{n1} - T_{n2}.$$

Если зафиксировать n_1 и перебирать все возможные значения n_2 , то получится набор линий, именуемый *спектральной серией*. Из комбинационного принципа следует, что разность волновых чисел двух спектральных линий одной и той же серии атома даёт волновое число спектральной линии какой-то другой серии того же атома

8. Лимб — стеклянный диск с делениями вдоль окружности в виде *двойных штрихов*. Цена деления шкалы 20 угловых минут (20′). Через каждые три деления шкала оцифрована от 0° до 360°. Изображения двойных штрихов диаметрально противоположных участков освещенного лимба через перископическую систему передаются в оптический микрометр и отсчетный микроскоп. Окуляр микроскопа ОК находится под окуляром зрительной трубы.

9. Постоянная Планка (квант действия) — основная константа квантовой теории, коэффициент, связывающий величину энергии кванта электромагнитного излучения с его частотой так же, как и вообще величину кванта энергии любой линейной колебательной физической системы с её частотой. Впервые упомянута Планком в работе, посвящённой тепловому излучению, и потому названа в его честь. Обычное обозначение — латинское h .

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с};$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}.$$

Часто применяется величина:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} :$$

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с};$$

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с},$$

называемая редуцированной (иногда рационализированной или приведённой) постоянной Планка или постоянной Дирака.

10. Постоянная Ридберга — величина, введённая Йоханнесом Робертом Ридбергом в 1890 году и входящая в уравнение для уровней энергии и спектральных линий при изучении спектров излучения атомов.

$$R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1},$$

$$R' = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

11. Орбита — траектория движения материальной точки в заданной системе пространственных координат для заданной в этих координатах конфигурации поля сил, которые на неё действуют.

12. Отсчетное устройство состоит из лимба, перископической системы призм и линз и отсчетного микроскопа с оптическим микрометром.

13. Спектр — распределение значений физической величины (обычно энергии, частоты или массы). Графическое представление такого

распределения называется спектральной диаграммой. Обычно под спектром подразумевается электромагнитный спектр — спектр частот (или то же самое, что энергий квантов) электромагнитного излучения.

14. Спектрометр — прибор, в котором измерения и регистрация осуществляются спектральным сканированием и преобразованием оптического излучения в электрические сигналы приемниками излучения.

15. Решетка Роуланда. Роуланд изобрел вогнутую отражательную решетку, которая сама (без линзы) фокусирует дифракционные спектры. В 1882 г. Роуланд предложил совместить фокусирующие свойства вогнутого зеркала с диспергирующими свойствами нарезанной на его поверхности дифракционной решетки. Такие решетки получили название *вогнутых* и широко сейчас применяются. Вогнутая решетка позволяет до предела упростить схему спектрального прибора за счет исключения специальной фокусирующей оптики.

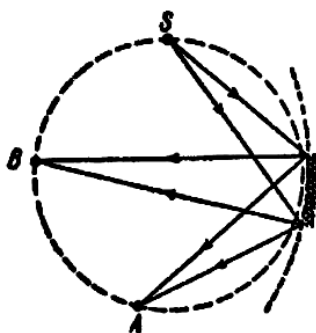


Рис. 3. Вогнутая решетка Роуланда.