

Министерство образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Я.С. ГРИНБЕРГ, М.Г. НОПШЕ,
С.В. СПУТАЙ

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

Утверждено
Редакционно-издательским
советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2003

УДК 535.14(075.8)
Г 85

Рецензенты: д-р техн. наук *О.И. Потатуркин*;
канд. физ.-мат. наук, доц. *И.И. Суханов*

Работа подготовлена на кафедре прикладной
и теоретической физики
для студентов I и II курсов ФТФ и РЭФ
дневного и заочного отделений

Гринберг Я.С., Ноппе М.Г., Спугай С.В.
Г 85 Квантовая оптика. Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во
НГТУ, 2003. – 76 с.

Пособие включает в себя вопросы и задачи по квантовой оптике в рамках курса общей физики, предусмотренных Государственным образовательным стандартом для направлений 510400 «Физика» и 553100 «Техническая физика».

УДК 535.14(075.8)

© Новосибирский государственный
технический университет, 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Законы излучения	5
Давление излучения. Квантовая природа света.....	31
Фотоэлектрический эффект	44
Эффект Комптона	61
Приложение	71
Таблица вариантов	72

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие охватывает небольшую, но очень важную с методической и методологической точек зрения часть курса общей физики – квантовую оптику. Традиционно к этому относятся проблемы, которые были успешно решены в начале XX века и которые лежат в основе современной квантовой физики. Речь идет о законах излучения абсолютно черного тела, фотоэффекте, эффекте Комптона, давлении излучения. Каждой из этих проблем в пособии посвящен отдельный раздел, начинающийся с короткого теоретического введения, где приводятся основные сведения о рассматриваемом явлении и соответствующие формулы. Затем подробно разбирается характерный для данного явления пример, после чего следуют вопросы, как правило, не требующие вычислений, но правильные ответы на которые предполагают хорошее понимание физики явления. Затем помещаются задачи, большинство из которых по степени трудности соответствуют известному курсу общей физики И.В. Савельева. Большая часть задач требует проведения конкретных вычислений для получения численного ответа.

Везде, где это было возможно, обозначения и определения выдержаны в соответствии с курсом общей физики И.В. Савельева. Поскольку в первом разделе не все задачи относятся к видимому диапазону, мы отошли от его традиционного названия «Законы теплового излучения». По этой же самой причине в этом разделе всюду использованы энергетические единицы определения фотометрических величин (энергетическая светимость, освещенность и т. д.). Для перехода к фотометрическим единицам, основанным на восприятии света глазом (кандела, люмен и др.), нужно умножить значения соответствующих величин на фактор видности, зависящий от длины световой волны.

В настоящем пособии нет традиционного разбиения задач по вариантам. Внутри каждого раздела задачи никак не сгруппированы. Это дает возможность преподавателю выбирать задачи и составлять задания по произвольной схеме. Одной из таких воз-

возможных схем является использование датчика случайных чисел, который имеется практически во всех прикладных пакетах, применяемых на персональных компьютерах. Для удобства в конце пособия помещена таблица 100 вариантов, составленная с помощью датчика случайных чисел. Каждый вариант состоит из 12 задач: по 3 задачи из каждого раздела.

Всего в пособии содержится около 100 вопросов и 300 задач. Пособие предназначено для самостоятельной и аудиторной работы студентов I–II курсов физико-технического факультета и факультета РЭФ дневной и заочной форм обучения.

Авторы выражают благодарность И.И. Суханову, внимательно просмотревшему рукопись и сделавшему ряд полезных замечаний, которые были приняты во внимание.

При написании пособия в основном была использована следующая литература:

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука, 1998.

2. *Чертов А.Г., Воробьев А.А.* Задачник по физике. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: ВШ, 1988.

3. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. – 3-е изд., перераб. – М.: ВЛАДИС, 1977.

4. *Савельев И.В.* Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Наука, 1982.

5. *Иродов И.Е.* Задачи по квантовой физике. – Изд., испр. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

6. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

7. *Горбунова О.И., Зайцева А.М., Красников С.Н.* Задачник-практикум по общей физике. Оптика и атомная физика. – М.: Просвещение, 1977.

8. *Halliday D., Resnick R., Krane Physics K. V.* 1, 2, 4-th edition, John Wiley & Sons, Inc. 1992.

9. *Селиванова Э.Б., Родникова Л.М., Клягина Н.В.* Квантовая оптика. Варианты задач индивидуальных заданий. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997.

ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Интенсивность излучения (или плотность потока световой энергии) $I(n, t)$ представляет собой энергию, переносимую светом за единицу времени через единичную площадь, ориентированную нормально к направлению излучения n . Таким образом, энергия dW , переносимая за время dt через площадку dS_n , ориентированную нормально к направлению излучения есть: $dW = I(n, t) dt dS_n$. Размерность интенсивности – Вт/м².

Интенсивность облучения элемента поверхности (или освещенность) E_e определяется как: $E_e = I(n, t) \cos \theta$, где θ – угол между нормалью к облучаемой поверхности и направлением падающего излучения.

Энергетической светимостью элемента излучающей поверхности называется энергия, излучаемая в единицу времени единицей площади этой поверхности по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π). Размерность энергетической светимости – Вт/м². Таким образом, мощность, излучаемая площадкой dS_R излучающей поверхности, есть $dP = R dS_R$. Энергетическая светимость зависит от температуры тела: $R \equiv R(T)$. Если энергетическая светимость одинакова по всей поверхности излучающего тела, то полная мощность излучения $P = R(T) S_R$. Эта величина представляет собой количество энергии, излучаемое в единицу времени с единицы поверхности тела, находящегося при термодинамической температуре T .

Количество энергии, излучаемое равномерно нагретым телом в элемент телесного угла $d\Omega$ есть: $dW_\Omega = R(T) S_R d\Omega / 4\pi$. Если размеры источника излучения много меньше расстояния r до облучаемой поверхности (точечный источник), то количество энергии, падающее в единицу времени на облучаемую поверхность, есть:

$$W = \frac{R(T) S_R}{4\pi r^2} S_a \cos \theta \equiv E_e S_a.$$

Испускательной способностью элемента излучающей поверхности называется отношение доли энергетической светимости dR_ω , приходящейся на малый частотный интервал $d\omega$, к величине самого этого интервала: $r(\omega, T) = dR_\omega/d\omega$. По определению

$$R(T) = \int dR_\omega = \int_0^\infty r(\omega, T) d\omega.$$

Таким образом, испускательная способность представляет собой *спектральную плотность* энергетической светимости. Размерность испускательной способности есть джоуль/метр в квадрате (Дж/м²).

Поглощательной способностью элемента поверхности тела $a(\omega, T)$ называется отношение энергии, поглощенной этим элементом в малом частотном интервале $d\omega$, к падающей на этот элемент поверхности энергии в этом же частотном интервале. По определению величина $a(\omega, T)$ является безразмерной и не может быть больше единицы.

Абсолютно черным телом называется такое тело, которое поглощает все падающее на него излучение и ничего не отражает. С другой стороны, абсолютно черное тело само является источником излучения. Следует подчеркнуть, что термин абсолютно черное тело не имеет ничего общего с его цветом, который воспринимается глазом.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела зависит от термодинамической температуры тела следующим образом: $R(T) = \sigma T^4$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана [$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴)].

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны или от частоты дается *формулой Планка*:

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1},$$

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}.$$

Величины $r(\lambda, T)d\lambda$, $r(\nu, T)d\nu$ – представляют собой количество энергии, испускаемое в единицу времени с единицы поверхности

абсолютно черного тела соответственно, в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, и в частотном интервале от ν до $\nu + d\nu$; c – скорость света в вакууме; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка. Если интервалы $d\lambda$ и $d\nu$ относятся к одному участку спектра, то $r(\lambda, T)d\lambda = r(\nu, T)d\nu$.

Законы Вина. Эти законы описывают некоторые свойства излучательных способностей $r(\lambda, T)$, $r(\nu, T)$ как функций соответственно длины волны λ , частоты ν и температуры. Обозначим через λ_{\max} длину волны, при которой излучательная способность $r(\lambda, T)$ является максимальной. Тогда λ_{\max} обратно пропорциональна термодинамической температуре абсолютно черного тела: $\lambda_{\max} = b_1/T$, где $b_1 = 2,90 \times 10^{-3}$ м К. Аналогичным образом, если обозначить через ν_{\max} частоту, при которой излучательная способность $r(\nu, T)$ является максимальной, то ν_{\max} будет пропорциональна термодинамической температуре абсолютно черного тела: $\nu_{\max} = b_2 T$, где $b_2 = 5,87 \times 10^{10}$ Гц/К.

Максимальное значение излучательной способности $r(\lambda, T)$ пропорционально пятой степени температуры: $[r(\lambda, T)]_{\max} \equiv r(\lambda_{\max}, T) = c_1 T^5$, где $c_1 = 1,30 \times 10^{-5}$ Вт/(м³ К⁵).

Максимальное значение излучательной способности $r(\nu, T)$ пропорционально третьей степени температуры: $[r(\nu, T)]_{\max} \equiv r(\nu_{\max}, T) = c_2 T^3$, где $c_2 = 5,8 \times 10^{-19}$ Вт/(м² Гц К³).

Равновесная плотность энергии излучения $u(\nu, T)$ связана с излучательной способностью абсолютно черного тела следующим образом: $r(\nu, T) = u(\nu, T)c/4$, где c – скорость света.

Излучение реальных тел таково, что на любой длине волны они излучают меньше энергии, чем находящееся при той же температуре абсолютно черное тело. Излучение реальных тел подчиняется закону Кирхгофа: $r_R(\lambda, T) = a(\lambda, T)r(\lambda, T)$, где $r_R(\lambda, T)$ – испускательная способность реального тела, $a(\lambda, T)$ – его поглощательная способность или коэффициент поглощения. Коэффициент поглощения $a(\lambda, T)$ представляет собой отношение энергии, поглощенной телом, к энергии, падающей на тело. Поэтому всегда $a(\lambda, T) < 1$. Для некоторых тел величина $a(\lambda, T)$ слабо зависит от длины волны: $a(\lambda, T) \equiv a(T)$. Такие тела называются серыми, а величина $a(T)$ иногда называется коэффициентом серости. Для многих серых тел величина a растет с увеличением температуры. Очевидно, что энергетическая светимость серого тела есть $R_R(T) = a(T)\sigma T^4$.

Пример

Электрический ток, текущий через спираль электролампочки, равен $I = 160$ мА. Напряжение на ее зажимах равно $V = 1,52$ В. Поверхностная площадь вольфрамовой спирали $S = 1$ мм². Считая, что вся подводимая мощность идет на излучение и лампочка излучает как серое тело с коэффициентом серости $a = 0,25$, определить: а) температуру спирали; б) время, через которое после выключения тока температура спирали уменьшится вдвое. Масса вольфрамовой нити $m = 2,5$ г, теплоемкость вольфрама $c = 0,134$ Дж/г °С.

Решение

а) Температура спирали T_0 будет неизменной только в том случае, если вся подводимая к спирали мощность $P = IV$ отводится посредством излучения. Поэтому температура спирали определяется из условия равенства подводимой и излучаемой мощности:

$$\alpha\sigma T_0^4 S = IV . \quad (1)$$

Из (1) следует

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{IV}{\alpha\sigma S}} . \quad (2)$$

Подставляя в (2) данные из условия задачи, получаем $T_0 = 2035$ К.

б) При охлаждении спирали на величину dT ее внутренняя энергия уменьшается на величину dU :

$$dU = cmdT . \quad (3)$$

Это уменьшение внутренней энергии происходит за счет энергии dE , которая излучается во внешнее пространство за время dt :

$$dE = \alpha\sigma T^4 S dt . \quad (4)$$

Поэтому

$$dE = -dU . \quad (5)$$

Знак « \rightarrow » в правой части (5) появляется потому, что по определению dE величина положительная, а dU – отрицательная.

Подставляя в (5) выражения (3) и (4), получаем дифференциальное уравнение для температуры T :

$$\frac{dT}{T^4} = -\frac{\alpha\sigma S dt}{cm}. \quad (6)$$

Решая это дифференциальное уравнение, получаем:

$$\frac{1}{T^3} - \frac{1}{T_0^3} = \frac{3\alpha\sigma S}{cm} t. \quad (7)$$

Это уравнение определяет зависимость текущей температуры спирали от времени охлаждения. Подставляя в (7) $T = T_0/2$, получаем:

$$t = \frac{7cm}{3\alpha\sigma S T_0^3}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) данные из условия задачи и T_0 из решения п. «а» будем иметь $t = 110$ мин.

ВОПРОСЫ

1. Исходя из закона излучения Планка показать, что мощность излучения абсолютно черного тела в интервале очень длинных волн пропорциональна абсолютной температуре тела.

2. Исходя из закона излучения Планка показать, что мощность излучения абсолютно черного тела в интервале длин волн, соответствующих максимуму спектральной плотности энергетической светимости, пропорциональна пятой степени абсолютной температуры тела.

3. Сформулировать закон смещения Вина. Показать, что этот закон следует из формулы Планка.

4. Сформулировать закон излучения Стефана. Показать, что этот закон следует из формулы Планка.

5. В каком диапазоне длин волн и частот лежит видимая область электромагнитного спектра?

6. Изобразить качественно шкалу электромагнитных волн и покажите на этой шкале области видимого спектра, микроволнового излучения, радиоволн, инфракрасного и ультрафиолетового излучения, рентгеновского и гаммаизлучения.

7. Объяснить, почему излучение из небольшого отверстия, просверленного в стенке замкнутой нагретой полости, имеет свойства излучения абсолютно черного тела.

8. Дать определение абсолютно черного тела.

9. Сформулировать Закон Кирхгофа.

10. Сформулировать закон смещения Вина.

11. Сформулировать закон Стефана-Больцмана.

12. Спектральный состав излучения из небольшого отверстия, просверленного в стенке замкнутой нагретой полости, не зависит от материала, из которого выполнена оболочка полости. Почему?

13. Два шарика разного диаметра и выполненные из одного и того же материала, нагреты до одинаковой температуры, так что часть их спектра излучения находится в видимом диапазоне. Шарик находится на одинаковом расстоянии от наблюдателя. Какой шарик (большой или меньший) будет виден лучше и почему?

14. Если смотреть внутрь полости, температура стенок которой поддерживается постоянной, то внутри нельзя рассмотреть никаких деталей. Почему?

15. Бетельгейзе – звезда в созвездии Орион – имеет температуру поверхности значительно ниже солнечной. Однако эта звезда излучает в пространство значительно больше энергии, чем Солнце. Объясните, как это может быть.

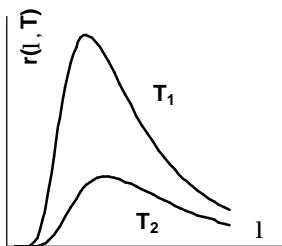
16. Электрическая лампочка мощностью 100 Вт излучает в видимом диапазоне всего несколько процентов своей энергии. Куда девается остальная энергия? Каким образом можно увеличить энергию излучения в видимом диапазоне?

17. Любое тело, абсолютная температура которого не равна нулю, излучает энергию, тем не менее в темноте не все тела видны. Почему?

18. Какие допущения сделал Планк при решении проблемы черного излучения?

19. Подчиняются ли все раскаленные тела закону: $R(T) = k\sigma T^4$, где коэффициент k зависит от материала тела и от его температуры?

20. Проблема черного излучения заключалась в том, что при некоторых параметрах излучения расхождение между экспериментом и классической теорией было очень велико. В чем конкретно заключалось это расхождение?

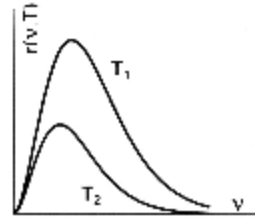


К вопросу 22

21. Мощность теплового излучения тела человека составляет примерно 1 кВт. Почему тогда в темноте человек не виден?

22. На рисунке приведены две зависимости $r(\lambda, T)$ для двух разных температур T_1 и T_2 . Какая из этих температур больше и почему?

23. На рисунке приведены две зависимости $r(\nu, T)$ для двух разных температур T_1 и T_2 . Какая из этих температур больше и почему?



К вопросу 23

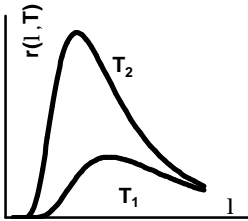
24. Два одинаковых тела имеют одну и ту же температуру, но одно из них находится в окружении более холодных тел, чем другое. Будут ли при таких условиях равны мощности излучения этих тел?

25. Почему цвет тела при нагревании меняется?

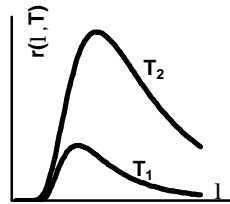
26. Как изменится длина волны, соответствующая максимуму испускательной способности абсолютно черного тела, если это тело окружить абсолютно поглощающей оболочкой с большей поверхностью, чем у тела, но излучающей такую же мощность, как и тело?

27. Как величина светового потока в определенном спектральном интервале связана с испускательной способностью тела?

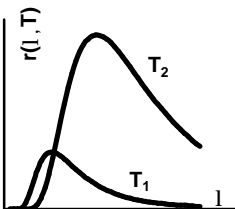
28. Какой из приведенных ниже рисунков правильно описывает распределение энергии в спектре абсолютно черного тела для двух температур $T_2 > T_1$?



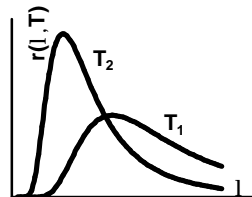
К вопросу 28



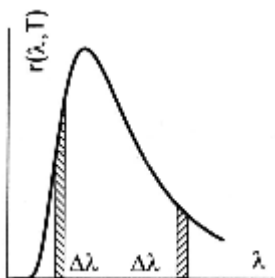
К вопросу 28



К вопросу 28



К вопросу 28



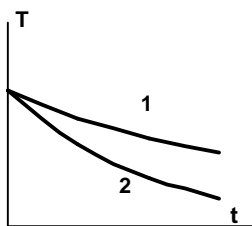
К вопросу 29

29. На графике спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела выделены два участка, имеющие одинаковую ширину $\Delta\lambda$ (см. рисунок). Равны ли мощности излучения, приходящиеся на соответствующие интервалы длин волн $\Delta\lambda$?

30. Во сколько раз изменится энергетическая светимость абсолютно черного тела, если его температуру увеличить в два раза?

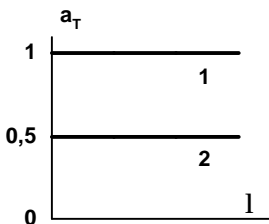
31. Во сколько раз изменится мощность излучения абсолютно черного тела, если площадь его поверхности увеличить в два раза?

32. Два тела одинаковой формы и размеров, но обладающие разной поглощательной способностью, нагреты до одинаковой температуры и помещены в вакуум. В результате излучения эти тела остывают. На рисунке изображена зависимость температуры тел от времени в процессе остывания. Какая из этих зависимостей относится к телу с большей поглощательной способностью, ка-кая – с меньшей?



К вопросу 32

33. Длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, уменьшилась в два раза. Как при этом изменится площадь, ограниченная кривой, описывающей зависимость испускательной способности от длины волны излучения? Эта площадь: а) уменьшится? б) увеличится? Во сколько раз?



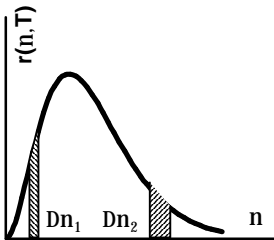
К вопросу 34

34. На рисунке показаны зависимости поглощательной способности некоторых тел, имеющих одинаковую температуру, от длины волны излучения. Изобразите зависимости испускательной способности от длины волны для этих тел при той же температуре. Сравнить энергетические светимости этих тел.

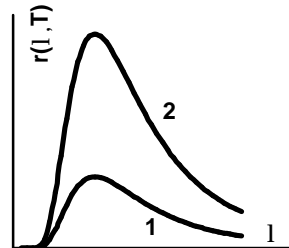
35. На графике (см. рисунок), представляющем зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от частоты,

выделены два узких участка, площади которых равны. Одинаковы ли на указанных частотах ν_1 и ν_2 : а) испускательная способность; б) энергетическая светимость?

36. На графике (см. рисунок) представлены две зависимости испускательной способности от частоты для двух тел, одно из которых является абсолютно черным. Температура тел одинакова. Все ординаты нижнего графика в три раза меньше ординат второго. Изобразить зависимости поглощательных способностей этих тел от длины волны.

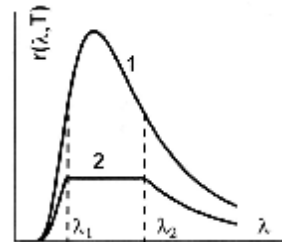


К вопросу 35



К вопросу 36

37. На графике (см. рисунок) представлены две зависимости испускательной способности от частоты для двух тел, одно из которых (кривая 1) является абсолютно черным. Температура тел одинакова. Все ординаты кривой 2 вдвое меньше ординат кривой 1 на участках $\lambda < \lambda_1$ и $\lambda > \lambda_2$, а на участке $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ остаются постоянными. Изобразить зависимость поглощательной способности второго тела от длины волны.

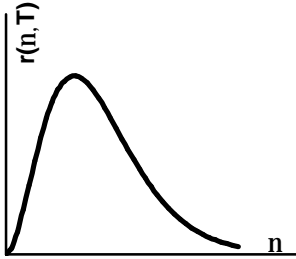


К вопросу 37

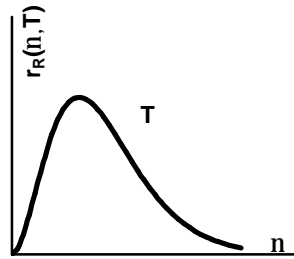
38. На графике (см. рисунок) представлена зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от частоты. Как, пользуясь этим графиком, определить: а) энергетическую светимость абсолютно черного тела; б) энергетическую светимость серого тела, имеющего ту же температуру и поглощательную способность α .

39. На графике (см. рисунок) представлена зависимость испускательной способности серого тела от частоты, имеющего при

данной температуре поглощательную способность α . Как, пользуясь этим графиком, определить энергетическую светимость абсолютно черного тела при той же температуре?

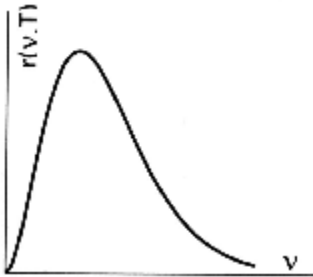


К вопросу 38



К вопросу 39

40. Как изменится общее количество энергии излучения абсолютно черного тела, если одну его половину охладить в два раза, а температуру второй половины понизить в два раза?

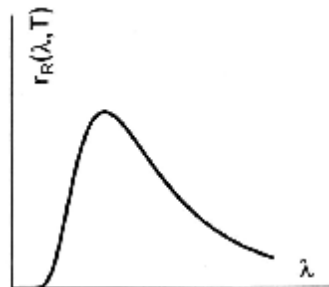


К вопросу 41

41. На рисунке показан график универсальной функции Кирхгофа. Изобразить на этом же рисунке; а) зависимость от частоты испускательной способности абсолютно черного тела; б) зависимости от частоты испускательной способности серого тела, поглощательная способность которого постоянна и равна 0,2.

42. На рисунке показана зависимость от длины волны испускательной способности для некоторого серого тела, имеющего поглощательную способность $\alpha = 0,3$. Изобразить аналогичную зависимость для абсолютно черного тела при той же температуре. Как отличаются энергетические светимости этих тел?

43. Для некоторого тела его испускательная способность отлична от нуля только в диапазоне длин волн $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$. Найти энергетическую светимость тела, если в указанном

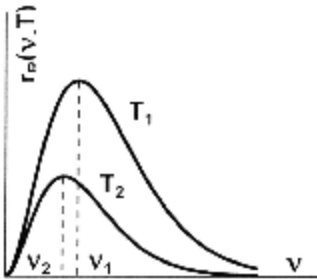


К вопросу 42

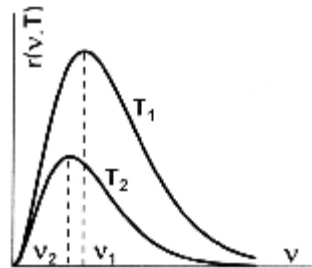
диапазоне испускательная способность тела равна постоянной величине ϵ .

44. На рисунке показаны зависимости испускательной способности серого тела от частоты излучения при двух разных температурах T_1 , T_2 . Изобразить аналогичные графики для абсолютно черного тела при тех же температурах. Сравнить энергетические светимости этих тел при указанных температурах.

45. На рисунке показаны зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от частоты излучения при двух разных температурах T_1 , T_2 . Сравнить температуры T_1 и T_2 . Изобразить аналогичные зависимости для серого тела при тех же температурах.



К вопросу 44



К вопросу 45

ЗАДАЧИ

1. Гелий-неоновый лазер, генерирующий на волне 632,8 нм, имеет ширину линии излучения 0,01 нм. Вычислить: а) ширину линии в частотных единицах; б) максимальную и минимальную энергию фотона в лазерном пучке.

2. Аргоновый лазер, генерирующий на волне 514,5 нм, имеет выходную мощность 3,85 кВт. Расходимость пучка лазера составляет 0,88 мкрад. В одном из экспериментов луч этого лазера был направлен на Луну. Определить интенсивность освещения (освещенность) Лунной поверхности. Расстояние от Земли до Луны 382000 км.

3. Гелий-неоновый лазер, генерирующий на волне 632,8 нм, имеет выходную мощность 3.1 мВт. Расходимость пучка лазера равна 172 мкрад. Найти интенсивность пучка лазера на расстоянии 38,2 м. Какова должна быть мощность точечного изотропно-

го источника, дающего ту же самую интенсивность на таком же расстоянии?

4. Современный неодимовый лазер может генерировать импульсы длительностью 10^{-9} с мощностью в 10^{10} Вт на длине волны 0,26 мкм. Чему равна энергия излучения в одном импульсе? Сколько фотонов излучается в одном импульсе? Чему равен разброс длин волн в импульсе?

5. Для управления с Земли беспилотным автоматическим аппаратом, спускаемым на Марс, использовался передатчик мощностью 960 кВт. В этот момент расстояние от Земли до Марса было равно 80 млн км. Чему равна интенсивность посланного сигнала на Марсе?

6. Человек находится на некотором расстоянии от уличного фонаря, висящего на высоте 15 м. После того как он прошел 162 м по направлению к фонарю, освещенность возросла в 1,5 раза. На каком расстоянии от фонаря находился человек в начальный момент?

7. Во время испытания радара, излучающего на частоте 12 ГГц с выходной мощностью 183 кВт, подлежащий обнаружению истребитель находился на расстоянии 88,2 км. Истребитель имел очень маленькую эффективную площадь отражения радарного сигнала, равную $0,222 \text{ м}^2$. Считая, что излучение радара изотропно в верхней полусфере и пренебрегая поглощением в атмосфере, найти интенсивность отраженного от цели излучения принимаемого радаром.

8. Самолет, находящийся на расстоянии 11,3 км от радиопередатчика, принимает сигнал интенсивностью $7,83 \text{ мкВт/м}^2$. Определить выходную мощность передатчика, считая, что он излучает одинаково по всем направлениям.

9. Радиотелескоп, созданный для поиска внеземных цивилизаций, имеет диаметр приемной антенны 305 м. Какова должна быть чувствительность радиотелескопа, чтобы зафиксировать сигнал из космоса, мощность которого, падающая на всю поверхность Земли, составляет всего один пиковатт (10^{-12} Вт). Радиус Земли равен 6400 км. Чему должна быть равна выходная мощность источника сигнала, располагающегося в центре нашей Галактики, находящемся от Земли на расстоянии 23000 световых лет?

10. Черное тело нагрето до температуры $T = 1000 \text{ К}$. На какой длине волны мощность излучения максимальна?

11. Черное тело нагрето до температуры $T = 1000 \text{ К}$. На какой частоте мощность излучения максимальна?

12. Шарик радиусом $R = 1$ см нагрет до температуры $T = 1000$ К. Считая излучение шарика черным, определить полную мощность, излучаемую этим шариком в пространство.

13. Тонкий диск радиусом $R = 1$ см нагрет до температуры $T = 1000$ К. Считая излучение диска черным, определить полную мощность, излучаемую этим диском в пространство.

14. Шарик радиусом $R = 1$ см нагрет до температуры $T = 1000$ К. Считая излучение шарика черным, определить, какую мощность будет поглощать такой же шарик, находящийся от нагретого на расстоянии $l = 10$ м.

15. Тонкий диск радиусом $R = 1$ см нагрет до температуры $T = 1000$ К. Считая излучение диска черным, определить, какую мощность будет поглощать такой же диск, находящийся от нагретого на расстоянии $l = 10$ м так, что их оси совпадают, а плоскости параллельны.

16. Считая Солнце и Землю абсолютно черными телами, определить, до какой температуры нагреется Земля под действием солнечных лучей. Температуру поверхности Солнца принять равной $T = 6000$ К, расстояние от Солнца до Земли $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м. Радиус Земли $R_3 = 6,4 \times 10^6$ м. Влиянием земной атмосферы пренебречь.

17. В верхних слоях атмосферы интенсивность солнечного излучения составляет $1,37 \times 10^3$ Вт/м². Пренебрегая влиянием атмосферы и считая, что Земля излучает как абсолютно черное тело, определить температуру, до которой нагреется Земля под действием солнечной радиации.

18. Интенсивность солнечного света вблизи поверхности Земли составляет около $0,1$ Вт/см². Радиус Земной орбиты $R_3 = 1,5 \times 10^8$ км. Радиус Солнца $R_C = 6,96 \times 10^8$ м. Найти температуру поверхности Солнца.

19. Интенсивность прошедшей сквозь атмосферу солнечной радиации летом составляет примерно 130 Вт/м². На каком расстоянии нужно стоять от электронагревателя мощностью 1 кВт, чтобы почувствовать такую же интенсивность облучения? Считать, что электронагреватель излучает одинаково по всем направлениям.

20. Солнце излучает энергию со скоростью $3,9 \times 10^{26}$ Дж/с. Чему равна интенсивность солнечного излучения вблизи поверхности Земли? Расстояние от Земли до Солнца равно 150 млн км.

21. В 1983 г. инфракрасный телескоп, установленный на спутнике, обнаружил вокруг звезды Вега облако твердых частиц, максимальная мощность излучения которых приходилась на длину волны 32 мкм. Считая излучение облака черным, определить его температуру.

22. В физике низких температур широко используются хладагенты: жидкий гелий, температура которого 4,2 К и жидкий азот, имеющий температуру 77 К. На какие длины волн приходится максимальная мощность теплового излучения полостей, заполненных этими жидкостями? К какой области электромагнитного спектра относятся эти излучения?

23. Вычислить длину волны, на которую приходится максимальная мощность излучения, и определить область электромагнитного спектра: а) для фонового космического излучения, имеющего температуру 2,7 К; б) тела человека, имеющего температуру 34 °С; в) электрической лампочки, вольфрамовая нить которой нагрета до 1800 К; г) Солнца, температура поверхности которого равна 5800 К; д) термоядерного взрыва, происходящего при температуре 10^7 К; е) Вселенной сразу после Большого взрыва при температуре 10^{38} К.

24. На какую частоту надо настроить приемный контур радиотелескопа, чтобы детектировать фоновое космическое излучение, температура которого равна 2,7 К?

25. В полости, стенки которой нагреты до температуры 1900 К, просверлено небольшое отверстие диаметром 1 мм. Чему будет равен поток энергии излучения через это отверстие?

26. Чему равна мощность теплового излучения тела, нагретого до температуры 500 °С, излучательная способность которого равна 0,9, площадь излучающей поверхности равна $0,5 \text{ м}^2$?

27. Чему равна мощность теплового излучения тела человека, находящегося при нормальной температуре 34 °С? Площадь поверхности тела равна $1,8 \text{ м}^2$.

28. Мощность теплового излучения тела, находящегося при некоторой температуре, равна 12 мВт. Какова станет мощность излучения этого же тела, если его температуру увеличить в два раза?

29. Максимум спектральной мощности излучения абсолютно черного тела приходится на длину волны 25 мкм. Затем температуру тела увеличивают таким образом, чтобы полная мощность излучения тела удвоилась. Найти: а) новую температуру тела;

б) длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения.

30. Электрическая лампочка мощностью 100 Вт имеет вольфрамовую нить диаметром 0,42 мм и длиной 32 см. Эффективная поглощательная способность вольфрамовой нити равна 0,22. Найти температуру нити.

31. Температура вольфрамовой нити в электрической лампочке обычно равна примерно 3200 К. Считая, что нить излучает как абсолютно черное тело, определить частоту, на которую приходится максимум спектральной мощности излучения.

32. Температура вольфрамовой нити в электрической лампочке обычно равна примерно 3200 К. Считая, что нить излучает как абсолютно черное тело, определить мощность излучения лампочки. Диаметр вольфрамовой нити 0,08 мм, ее длина 5 см.

33. Космическое пространство нашей Вселенной заполнено фоновым космическим излучением, оставшимся от Большого взрыва. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности этого излучения, равна 1,073 мм. Найти: а) температуру этого излучения; б) мощность этого излучения, которое падает на Землю.

34. Определить радиус далекой звезды по следующим данным: интенсивность излучения этой звезды, достигающая Земли, равна $1,7 \times 10^{-12}$ Вт/м², расстояние до звезды равно 11 световых лет, температура поверхности звезды равна 6600 К.

35. Печь, внутри которой температура равна 215 °С, находится в комнате, в которой поддерживается постоянная температура 26,2 °С. В печи сделано небольшое отверстие площадью 5,2 см². Чему равна мощность излучения из этого отверстия?

36. Из медицины известно, что участки кожи человека, пораженные раком, имеют несколько большую температуру, чем температура здоровой кожи (34 °С). На этом эффекте основан термограф – прибор, измеряющий мощность излучения отдельных участков кожи и позволяющий обнаруживать пораженные участки. Обозначим через $I(T)$ интегральную мощность излучения. Вывести приближенную формулу для величины $\Delta I/I = [I(T + \Delta T) - I(T)]/I$, представляющую относительную разность интенсивности излучения между соседними участками кожи, которые немного различаются по температуре. Чему равна эта величина, если разность температур составляет 1,3 °С?

37. Спираль электролампочки мощностью 100 Вт представляет вольфрамовую нить диаметром 0,28 мм и длиной 1,8 м. Считая излучение спирали черным, вычислить: а) рабочую температуру нити; б) время, через которое нить охладится до 500 °С после выключения лампочки. Удельный вес вольфрама равен 19,3 г/см³, его теплоемкость равна 0,134 Дж/г °С.

38. Спектральная плотность излучения абсолютно черного тела на длине волны 400 нм в 3,5 раза больше, чем на длине волны 200 нм. Определить температуру тела.

39. Спектральная плотность излучения абсолютно черного тела на длине волны 400 нм в 3,5 раза меньше, чем на длине волны 200 нм. Определить температуру тела.

40. Нагретая до 2500 К поверхность площадью 10 см² излучает за 10 с 6700 Дж. Чему равен коэффициент поглощения этой поверхности?

41. Спираль электролампочки мощностью 25 Вт имеет площадь 0,403 см². Температура накала 2177 К. Чему равен коэффициент поглощения вольфрама при этой температуре?

42. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током в 1 А до температуры 1000 К. Какой нужно пропустить через нить ток, чтобы ее температура стала 3000 К? Потерями энергии вследствие теплопроводности и изменением линейных размеров нити пренебречь.

43. Термостат потребляет от сети мощность 0,5 кВт. Температура его внутренней поверхности, определенная по излучению из открытого круглого отверстия диаметром 5 см, равна 700 К. Какое количество потребляемой мощности рассеивается внешней поверхностью термостата?

44. Вольфрамовая нить диаметром $d_1 = 0,1$ мм соединена последовательно с другой такой же нитью. Нити накаляются в вакууме электрическим током, так что первая нить имеет температуру $T_1 = 2000$ К, а вторая $T_2 = 3000$ К. Чему равен диаметр второй нити?

45. Мощность излучения абсолютно черного тела $P = 100$ кВт. Чему равна площадь излучающей поверхности тела, если длина волны, на которую приходится максимум излучения, равна 700 нм?

46. Вследствие изменения температуры тела максимум его спектральной энергетической светимости переместился с длины волны $\lambda_1 = 2,5$ мкм до $\lambda_2 = 0,125$ мкм. Считая тело абсолютно

черным, определить, во сколько раз изменилась: а) температура тела; б) максимальное значение спектральной энергетической светимости; в) интегральная энергетическая светимость.

47. Максимальная спектральная энергетическая светимость абсолютно черного тела $[\varepsilon(\lambda, T)]_{\max} = 4,16 \times 10^{11} \text{ Вт/м}^2$. На какую длину волны она приходится?

48. Вычислить спектральную энергетическую светимость черного тела нагретого до 3000 К для длины волны 500 нм.

49. Принимая положительный кратер электрической дуги за абсолютно черное тело, определить отношение мощности излучения в диапазоне длин волн от 695 нм до 705 нм к полной мощности излучения. Температура кратера дуги равна 4000 К.

50. Мощность излучения, измеренная в интервале $\Delta\lambda_1 = 0,5 \text{ нм}$ вблизи длины волны, соответствующей максимуму излучения λ_{\max} , равна мощности излучения в интервале $\Delta\lambda_2$ вблизи длины волны $\lambda = 2\lambda_{\max}$. Определить ширину интервала $\Delta\lambda_2$.

51. Определить значения спектральных мощностей излучения абсолютно черного тела для следующих длин волн: $\lambda_1 = \lambda_{\max}$, $\lambda_1 = 0,75\lambda_{\max}$, $\lambda_1 = 0,5\lambda_{\max}$, $\lambda_1 = 0,25\lambda_{\max}$. Температура тела 3000 К.

52. Мощность P излучения шара радиусом $R = 10 \text{ см}$ при некоторой постоянной температуре T равна 1 кВт. Найти эту температуру, считая шар серым телом с коэффициентом поглощения $\alpha = 0,25$.

53. Имеются два абсолютно черных источника теплового излучения. Температура одного из них $T_1 = 2500 \text{ К}$. Найти температуру другого источника, если длина волны, отвечающая максимуму его испускательной способности, на $\Delta\lambda = 0,50 \text{ мкм}$ больше длины волны, соответствующей максимуму испускательной способности первого источника.

54. Какое количество энергии излучает Солнце за 1 мин? Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8 \text{ м}$.

55. Абсолютно черное тело находится при температуре $T_1 = 2900 \text{ К}$. В результате остывания этого тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на $\Delta\lambda = 9 \text{ мкм}$. До какой температуры T_2 охладилось тело?

56. Спутник в форме шара движется вокруг Земли на такой высоте, что поглощением солнечного света можно пренебречь. Диаметр спутника $d = 40$ м. Принимая, что поверхность спутника полностью отражает свет, определить силу давления F солнечного света на спутник. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м. Расстояние от Земли до Солнца $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Температура поверхности Солнца $T = 6000$ К.

57. При увеличении температуры абсолютно черного тела его интегральная энергетическая светимость увеличилась в 5 раз. Во сколько раз при этом изменилась длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения?

58. Температура T абсолютно черного тела равна 2 К. Определить: 1) спектральную плотность потока излучения $r(\lambda, T)$ для длины волны $\lambda = 600$ нм; 2) плотность мощности излучения R_e в интервале длин волн от $\lambda_1 = 590$ нм до $\lambda_2 = 610$ нм. Принять, что средняя спектральная плотность потока излучения в этом интервале равна значению, найденному для длины волны $\lambda = 600$ нм.

59. Мощность излучения абсолютно черного тела равна 34 кВт. Найти температуру этого тела, если известно, что поверхность его равна $0,6 \text{ м}^2$.

60. Найти, какое количество энергии с 10 см^2 поверхности за 1 мин излучает абсолютно черное тело, если известно, что максимальная спектральная плотность его энергетической светимости приходится на длину волны в 4840 А.

61. Найти температуру печи, если известно, что из отверстия в ней размером $6,1 \text{ см}^2$ излучается в 1 мин 50 Дж. Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

62. Температура T верхних слоев звезды Сириуса равна 10000 К. Определить поток энергии Φ , излучаемый с поверхности площадью $S = 1 \text{ км}^2$ этой звезды.

63. Температура T верхних слоев Солнца равна 5300 К. Считая Солнце абсолютно черным телом, определить: а) длину волны λ_{max} , которой соответствует максимальная спектральная плотность излучения $r(\lambda_{\text{max}}, T)$; б) величину $r(\lambda_{\text{max}}, T)$.

64. Определить температуру T , при которой энергетическая светимость R абсолютно черного тела равна 10 кВт/м^2 .

65. Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно черного тела, для которого мак-

симум испускательной способности приходится на длину волны 0,48 мкм. Найти температуру поверхности Солнца.

66. Определить относительное увеличение $\Delta R/R$ мощности излучения абсолютно черного тела при увеличении его температуры на 1 %.

67. Определить энергию W , излучаемую за время $t = 1$ мин из смотрового окошка площадью $S = 8 \text{ см}^2$ плавильной печи, если ее температура $T = 1200 \text{ К}$.

68. Определить температуру T абсолютно черного тела, при которой максимум спектральной плотности излучения $r(\lambda_{\text{max}}, T)$; приходится на красную границу видимого спектра ($\lambda_1 = 750 \text{ нм}$).

69. Средняя величина энергии, теряемой вследствие лучеиспускания 1 см^2 поверхности Земли в течение 1 мин, равно $5,4 \times 10^{-8} \text{ Дж}$. Какую температуру должно иметь абсолютно черное тело, излучающее такое же количество энергии?

70. Температура волоска электролампочки мощностью 15 Вт, питаемой переменным током, колеблется так, что разница между наибольшей и наименьшей температурами накала вольфрамовой нити равна $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз изменяется общая мощность излучения вследствие колебания температуры, если ее среднее значение равно 2300 К ? Принять, что вольфрам излучает как черное тело.

71. Муфельная печь потребляет мощность $P = 0,5 \text{ кВт}$. Температура ее внутренней поверхности при открытом отверстии диаметром $d = 5 \text{ см}$ равна $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Какая часть потребляемой мощности рассеивается стенками?

72. При работе радиоламп происходит разогревание анода вследствие бомбардировки его электронами. Считая, что рассеяние энергии анодом происходит только в виде излучения, определить допустимую силу анодного тока в лампе, работающей под напряжением 400 В. Никелевый анод имеет форму цилиндра длиной 4 см и диаметром 1 см. Допустимая температура, до которой можно нагреть анод, равна 1000 К . При этой температуре никель излучает только 20 % мощности излучения абсолютно черного тела.

73. Колосниковая решетка площадью 2 м^2 окружена железными стенками. Температура угля на колосниковой решетке равна 1300 К , температура стенок 600 К . Коэффициенты поглощения угля и окисленного железа можно считать равными 0,9. Вычис-

лить количество теплоты передаваемое лучеиспусканием от решетки к стенкам за 1 час.

74. Внутри солнечной системы на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля, находится частица сферической формы. Принимая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой 6000 К и что температура частицы во всех ее точках одинакова, определить ее температуру, если частица имеет свойства серого тела. Расстояние от Солнца до Земли равно $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м.

75. Внутри солнечной системы на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля, находится частица сферической формы. Принимая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой 6000 К и что температура частицы во всех ее точках одинакова, определить ее температуру, если частица поглощает и излучает только лучи с длиной волны 500 нм. Расстояние от Солнца до Земли равно $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м.

76. Внутри солнечной системы на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля, находится частица сферической формы. Принимая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой 6000 К и что температура частицы во всех ее точках одинакова, определить ее температуру, если частица поглощает и излучает только лучи с длиной волны 5 мкм. Расстояние от Солнца до Земли равно $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м.

77. Проходя афелий, Земля находится от Солнца на 3,3 % дальше, чем когда она проходит перигелий. Принимая землю за серое тело со средней температурой 288 К, определить разность температур, которые Земля имеет в афелии и перигелии.

78. В электрической лампочке вольфрамовая нить диаметром $d = 0,05$ см накаливается при работе до температуры $T_1 = 2700$ К. Через какое время после выключения тока температура нити упадет до $T_2 = 600$ К? При расчете принять что нить излучает как серое тело с коэффициентом поглощения $A = 0,3$. Удельный вес вольфрама равен $19,3 \text{ г/см}^3$, его теплоемкость равна $0,134 \text{ Дж/г}^\circ\text{С}$.

79. Электрическая лампочка, потребляющая мощность 25 Вт заключена в бумажный абажур, имеющий форму шара радиусом $R = 15$ см. До какой температуры нагреется абажур? Считать, что

вся потребляемая лампой мощность идет на излучение и абажур излучает как серое тело.

80. Электрическая лампочка, потребляющая мощность 100 Вт заключена в бумажный абажур, имеющий форму шара. Какого минимального радиуса должен быть абажур, чтобы бумага не загорелась? Считать, что вся потребляемая лампой мощность идет на излучение и абажур излучает как серое тело. Температура возгорания бумаги равна 250 °С.

81. Определить мощность излучения 1 см² поверхности абсолютно черного тела для длин волн, отличающихся от длины волны, соответствующей максимуму излучения на 1 %. Температура тела равна 2000 К.

82. Определить отношение мощностей излучения 1 см² поверхности абсолютно черного тела в диапазоне длин волн от 695 до 705 мкм (участок красного цвета) и от 395 до 405 мкм (участок фиолетового цвета). Температура тела равна 4000 К.

83. Лучи Солнца собираются посредством линзы диаметром $d = 3$ см на маленькое отверстие полости, стенки которой внутри зачернены, а снаружи блестящие. Отверстие полости находится в фокусе линзы. Определить температуру внутри полости. Считать, что интенсивность прошедшей сквозь атмосферу солнечной радиации составляет примерно 130 Вт/м²

84. Имеются два черных излучателя с температурами $T_1 = 1000$ К и $T_2 = 500$ К. Чему равны: а) отношение длин волн $\lambda_{\max,1}/\lambda_{\max,2}$, на которые приходится максимум в спектре излучения; б) отношение максимальных излучательных способностей двух тел $r(\lambda_{\max,1}, T_1)/r(\lambda_{\max,2}, T_2)$. Изобразить на одном графике качественную зависимость $r(\lambda, T)$ для двух излучателей.

85. При увеличении термодинамической температуры T абсолютно черного тела в 2 раза длина волны λ_{\max} , на которую приходится максимум спектральной плотности излучательности, изменилась на $\Delta\lambda = 400$ нм. Определить начальную и конечную температуры T_1 и T_2 .

86. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током в 1 А до температуры 1000 К. Какой нужно пропустить через нить ток, чтобы ее температура стала 3000 К? Коэффициенты поглощения вольфрама и его удельные сопротивления, соответствующие температурам T_1 и T_2 равны $\alpha_1 = 0,136$, $\alpha_2 = 0,356$, $\rho_1 = 24,93 \times 10^{-6}$ Ом см, $\rho_2 = 92,04 \times 10^{-6}$ Ом см.

87. Расстояние между Солнцем и планетами Венера и Земля соответственно равны $R_B = 1,1 \times 10^8$ км, $R_3 = 1,5 \times 10^8$ км. Рассматривая Землю и Венеру как абсолютно черные тела, лишенные атмосферы, определить, до какой температуры нагреется Венера под действием солнечных лучей, если Земля нагревается до 20°C .

88. Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно черного тела, для которого максимум испускательной способности приходится на длину волны $\lambda = 0,48$ мкм. Найти массу, теряемую Солнцем каждую секунду за счет излучения. Оценить время, за которое масса Солнца уменьшится на 1 %.

89. Определить длину волны, на которую приходится максимальное значение испускательной способности абсолютно черного тела, равное 6×10^{11} Вт/м³.

90. Пластина с черной поверхностью помещена перпендикулярно падающим лучам в вакууме. Определить энергию E , поглощаемую 1 см² поверхности пластины за 1 мин, если температура поверхности пластины установилась равной 500 К.

91. Тело массой $m = 10$ г и поверхностью $S = 200$ см², имеющее температуру $T_0 = 600$ К, помещено в вакуум. Определить до какой температуры T охладится тело за время $t = 30$ с, если поглощательная способность поверхности тела $\alpha = 0,4$, а удельная теплоемкость $C = 350$ Дж/кгК.

92. Длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности излучения для Полярной звезды и звезды Сириус, равны соответственно: $\lambda_{\text{П}} = 0,35$ мкм, $\lambda_{\text{С}} = 0,29$ мкм. Вычислить температуру поверхностей этих звезд и отношение их интегральных и спектральных (в максимуме) мощностей излучения с единичной поверхности этих звезд, считая их абсолютно черными телами.

93. Диаметр вольфрамовой спирали в электрической лампочке равен $d = 0,3$ мм, длина спирали $l = 5$ см. При напряжении 127 В через лампочку течет ток силой $0,31$ А. Чему равна температура спирали, если энергия теряется только за счет теплового излучения? Коэффициент поглощения вольфрама $\alpha(T) = \beta T$, где $\beta = 1,47 \times 10^{-4}$.

94. Найдите солнечную постоянную I , т.е. количество лучистой энергии, посылаемой Солнцем в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно солнечным лучам и находящуюся на таком же расстоянии от Солнца,

ца, как и Земля. Температура поверхности Солнца $T = 5800$ К. расстояние от Земли до Солнца равно $L = 1,5 \times 10^{11}$ м.

95. Вычислить установившуюся температуру абсолютно черной пластины, находящейся в вакууме и расположенной перпендикулярно потоку лучистой энергии, $1,4 \times 10^3$ Вт/м². Определить на какую длину волны приходится максимум спектральной плотности излучения при найденной температуре.

96. Считая Солнце абсолютно черным телом, найти уменьшение массы Солнца за 1 год вследствие излучения. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

97. Найти максимальное значение испускательной способности абсолютно черного тела, если оно соответствует длине волны $\lambda = 1,45$ мкм.

98. Определить, за какое время медный шар, помещенный в вакуум, охладится с $T_1 = 500$ К до $T_2 = 300$ К. Радиус шара $R = 1$ см, поглощательная способность поверхности $\alpha = 0,8$, удельная теплоемкость меди $C = 0,39$ Дж/гК, удельный вес меди $\rho = 8,93$ г/см³.

99. Температура абсолютно черного тела возросла от $T_1 = 500$ К до $T_2 = 1500$ К. Во сколько раз при этом изменилась: а) энергия, испускаемая единицей поверхности тела в единицу времени; б) энергетическая светимость; в) максимальное значение испускательной способности; г) длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения; д) частота, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения?

100. Вычислить истинную температуру T раскаленной вольфрамовой спирали, если радиационный пирометр показывает температуру $T_R = 2500$ К. Коэффициент поглощения вольфрама не зависит от частоты и равен $\alpha = 0,35$.

101. Вычислить истинную температуру T раскаленной вольфрамовой спирали, если радиационный пирометр показывает температуру $T_R = 2500$ К. Коэффициент поглощения вольфрама $\alpha(T) = \beta T$, где $\beta = 1,47 \times 10^{-4}$.

102. Внутри Солнечной системы на таком же расстоянии от Солнца, как и Земля, находится небольшой плоский диск радиусом $R = 0,1$ м. Считая диск абсолютно черным телом и принимая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело с температурой 6000 К, определить температуру диска. Расстояние от Солнца до Земли равно $L = 1,5 \times 10^{11}$ м. Радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м.

103. Температура абсолютно черного тела равна 2000 К. Оценить, какая доля излучаемого потока энергии приходится на видимую часть спектра (от 400 до 700 нм).

104. До какой величины понизилась бы температура Земли за 100 лет, если бы на Землю перестала поступать солнечная энергия? Радиус Земли 6400 км; удельная теплоемкость 200 Дж/кгК, плотность 5500 кг/м³; средняя температура поверхности 280 К, коэффициент поглощения 0.8.

105. Энергетическая светимость абсолютно черного тела равна 3 Вт/см². Определить температуру тела и длину волны, на которую приходится максимум испускательной способности тела.

106. Через какое время масса Солнца уменьшилась бы вдвое за счет теплового излучения, если бы мощность его оставалась постоянной? Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К и считать Солнце абсолютно черным телом.

107. Во сколько раз изменится энергетическая светимость абсолютно черного тела в небольшом интервале длин волн вблизи $\lambda = 5$ мкм при повышении температуры тела от 1000 до 2000 К?

108. Абсолютно черное тело имеет температуру 2000 К. До какой температуры охладилось тело и насколько изменилось максимальное значение испускательной способности тела, если длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности, изменилась на 9 мкм?

109. Шарик диаметром $d = 1,5$ см, нагретый до температуры $T_0 = 300$ К, поместили в сосуд, из которого откачан воздух. Температура сосуда поддерживается равной 77 К. Считая поверхность шарика абсолютно черной, найти, через какое время его температура уменьшится в два раза. Плотность материала шарика $\rho = 700$ кг/м³, теплоемкость $C = 300$ Дж/кгК.

110. Найти температуру вольфрамовой нити лампы накаливания мощностью 25 Вт, если площадь излучающей поверхности нити $S = 0,4$ см², а коэффициент поглощения вольфрама $\alpha(T) = \beta T$, где $\beta = 1,47 \times 10^{-4}$ К⁻¹.

111. Волосок лампы накаливания, рассчитанной на напряжение $U = 2$ В, имеет длину $l = 10$ см и диаметр $d = 0,03$ мм. Полагая, что волосок излучает как абсолютно черное тело, определить температуру нити и длину волны, на которую приходится максимум в спектре излучения. Удельное сопротивление материала волоска $\rho = 5,5 \times 10^{-8}$ Ом·м. Потерями вследствие теплопроводности пренебречь.

112. Определить энергетическую светимость абсолютно черного тела в интервале длин волн, соответствующем видимой части спектра (от 0,4 мкм до 0,8 мкм). Температура тела равна 1000 К. Принять, что спектральная плотность излучения в этом диапазоне не зависит от длины волны и равна своему значению при $\lambda = 0,6$ мкм.

113. Определить поглощательную способность серого тела α_T , для которого температура, измеренная радиационным пирометром, $T_p = 1400$ К, тогда как истинная температура $T = 3200$ К.

114. Какую мощность нужно подводить к свинцовому шарикому радиусом 4 см, чтобы поддерживать его температуру при $t_1 = 27$ °С, если температура окружающей среды равна $t_2 = 23$ °С? Поглощательная способность свинца равна 0,6. Считать, что энергия теряется только вследствие излучения.

115. Электрический ток, текущий через спираль электролампочки, равен $I = 160$ мА. Напряжение на ее зажимах $V = 1,52$ В. Зависимость сопротивления спирали от температуры дается следующим выражением: $R(T) = (\alpha T - \beta)R_0$, где $\alpha = 6,8 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\beta = 2,2$, $R_0 = 0,8$ Ом. Поверхностная площадь спирали электролампочки $S = 1 \text{ мм}^2$. Считая, что вся подводимая мощность идет на излучение и лампочка излучает как серое тело с коэффициентом серости $a = 0,25$, определить по приведенным выше данным величину постоянной Стефана-Больцмана σ .

116. Между электролампочкой и фотоэлементом помещен светофильтр, который пропускает излучение в диапазоне длин волн от 0,99 до 1,01 мкм. При температуре спирали электролампочки 1500 К ток через фотоэлемент равен 20 мА. Считая, что ток через фотоэлемент пропорционален мощности падающего на него излучения, определить, во сколько раз изменится этот ток, если температуру спирали электролампочки увеличить до 2000 К.

117. Оценить, какая доля мощности 100 ваттной электролампочки приходится на видимую часть спектра (от 400 до 700 нм). Температуру нити электролампочки принять равной 2500 К и считать, что лампочка излучает как абсолютно черное тело.

118. Электромагнитное излучение внутри вашего глаза состоит из двух компонентов: а) черное излучение при температуре 310 К и б) видимый свет, в виде фотонов проникающий в глаз через зрачок. Оценить: а) полную энергию черного излучения в глазу; б) энергию видимого излучения в глазу, поступающую от 100-ваттной лампочки, если вы находитесь от нее на расстоянии

2 метров. Площадь зрачка равна $S = 0,1 \text{ см}^2$, диаметр глазного яблока $d = 3 \text{ см}$. Электролампочка излучает только 2 % своей мощности в видимом диапазоне (от 400 до 700 нм).

119. Вычислить допустимую длительность работы радиотелефона в режиме передатчика, если предельно допустимая величина энергетической нагрузки на биологические ткани головы человека на частоте 900 МГц равна 2 Вт ч/м^2 . Мощность излучения радиотелефона $P = 0,5 \text{ Вт}$. Минимальное расстояние от антенны радиотелефона до головы равно $r = 5 \text{ см}$. Считать, что антенна равномерно излучает по всем направлениям. (*Задача предоставлена И.И. Сухановым.*)

ДАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА

1. Давление, производимое светом при падении на плоскую поверхность, есть $P = \frac{E_e}{c}(\alpha + 2\rho)\cos\theta$, где E_e – интенсивность облучения поверхности (или освещенность), c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме; α – доля падающей энергии, поглощаемая телом (коэффициент поглощения); ρ – доля падающей энергии, отражаемая телом (коэффициент отражения); θ – угол между направлением излучения и нормалью к облучаемой поверхности. Если тело не является прозрачным, т.е. все падающее излучение отражается и поглощается, то $\alpha + \rho = 1$.

В этом случае $P = \frac{E_e}{c}(1 + \rho)\cos\theta$. Для прозрачных тел всегда $\alpha + \rho < 1$.

2. Импульс, передаваемый облучаемому телу при падении на плоскую поверхность, есть $\Delta p = \frac{E_e S_a t}{c}(\alpha + 2\rho)\cos\theta = WS_a t(\alpha + 2\rho)\cos\theta$, где S_a – площадь облучаемой поверхности; t – время облучения; W – объемная плотность энергии электромагнитного излучения.

3. Скорость испускания фотонов N (N – число фотонов, испускаемых в единицу времени) связана с мощностью W монохроматического источника (λ – длина волны, ν – частота) соотношением: $N = W/h\nu = W\lambda/hc$ [с⁻¹]

4. Плотность потока фотонов $n(\nu, T)$, $n(\lambda, T)$, испускаемых в единицу времени с единицы поверхности черного тела соответственно в единичном частотном интервале и в единичном интервале длин волн, связана со спектральными излучательными способностями абсолютно черного тела, $\varepsilon(\lambda, T)$, $\varepsilon(\nu, T)$ следующим образом: $n(\nu, T) = \varepsilon(\nu, T)/h\nu$; $n(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)\lambda/hc$:

$$n(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1},$$

$$n(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}.$$

Пример

Комета, состоящая из частиц космической пыли, проходит на расстоянии $R_K = 5 \times 10^{10}$ м от Солнца. Радиус частиц, поглощающих все упавшие на них лучи, $r = 10^{-2}$ см. Максимум испускательной способности Солнца (которое примем за абсолютно черное тело) приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 547$ нм. Радиус Солнца $R_C = 6,95 \times 10^8$ м.

Найти: а) солнечную постоянную кометы К; б) массу частицы, для которой сила давления солнечного света уравновешивается силой притяжения частицы со стороны Солнца ($M_C = 1,98 \times 10^{30}$ кг – масса Солнца; $\gamma = 6,67 \times 10^{-11}$ м³/кгс² – гравитационная постоянная).

Примечание. Солнечная постоянная кометы – это световая энергия, падающая в единицу времени от Солнца на площадку размером 1 м², расположенную на поверхности кометы перпендикулярно лучам Солнца.

Решение:

а) Энергия, излучаемая Солнцем во все пространство в единицу времени, равна

$$W = R_e S_C = \sigma T^4 4\pi R_C^2 \quad (1)$$

где S_C – площадь поверхности Солнца; R_C – радиус Солнца.

Солнечная постоянная кометы по определению есть:

$$K = W / 4\pi R_K^2 = \frac{\sigma T^4 R_C^2}{R_K^2} \quad (2)$$

Температуру Солнца найдем из закона Вина:

$$T = b_1/\lambda_{\max} = 2,90 \times 10^{-3} \text{ м К} / 5,47 \times 10^{-7} \text{ м} = 5300 \text{ К} \quad (3)$$

Подставив в (2) найденное значение температуры Солнца и величины R_C и R_K из условия задачи, найдем $K = 8644 \text{ Вт/м}^2$.

б) На кометную частицу действуют две противоположно направленные силы: сила гравитационного притяжения частицы к Солнцу и сила светового давления, которая отталкивает частицу от Солнца. Условие равновесия этих сил запишем в виде

$$\gamma \frac{mM_c}{R_K^2} = P\pi r^2 \quad (4)$$

где P – давление, производимое светом на частицу.

При условии, что частица поглощает все лучи, давление равно:

$$P = \frac{K}{c}, \quad (5)$$

где K – солнечная постоянная кометы, найденная в п. «а».

Подставив (5) в (4), получим для массы частицы:

$$m = \frac{\sigma T^4 R_C^2}{\gamma M_C c} \pi r^2 \quad (6)$$

Интересно отметить, что эта масса не зависит от расстояния частицы от Солнца. Это связано с тем, что как гравитационное притяжение, так и световое давление одинаковым образом зависят от расстояния до Солнца. Подставляя данные задачи, получим $m = 1,7 \times 10^{-12}$ кг. Частицы меньшей массы будут уноситься от Солнца световым давлением, а частицы большей массы будут притягиваться к Солнцу.

ВОПРОСЫ

1. Можно ли объяснить причину давления света с волновой точки зрения? Если да, то как?

2. Объяснить причину давления света с корпускулярной точки зрения.

3. Чему равны импульс и энергия фотона в монохроматическом пучке света с длиной волны λ ?

4. Чему равны импульс и энергия фотона в монохроматическом пучке света с частотой ν ?

5. Совпадают ли формулы для давления, производимого светом при нормальном падении на поверхность, выведенные на ос-

нове квантовых представлений и полученные на основе волновой картины в теории Максвелла? Из приведенных ниже ответов выбрать правильный: а) совпадают частично; б) не совпадают; в) совпадают полностью; г) существует резкое различие.

6. В каком случае давление света больше? При падении (выбрать правильный ответ): а) на черную поверхность; б) белую поверхность; в) зеркальную поверхность.

7. Во сколько раз давление синего света ($\lambda_1 = 400$ нм) больше давления красного света ($\lambda_2 = 700$ нм), если число фотонов обоих излучений, упавших на одну и ту же поверхность, одинаково?

8. Чему равен импульс, который получает тело, поглотившее некоторое количество световой энергии U ?

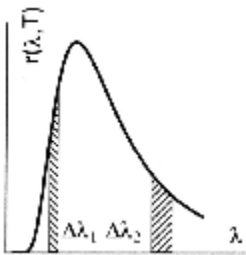
9. Как связано световое давление с импульсом, которое получает тело при поглощении света?

10. Когда вы включаете фонарик, то испытывает ли он действие какой либо силы в момент включения?

11. Некоторый объект испытывает световое давление под действием источника монохроматического излучения. Изменится ли величина давления, если источник будет двигаться с большой скоростью (например, 0,1 с) по направлению или от объекта?

12. Считается, что радиационное давление налагает верхний предел на массу звезды (примерно 100 солнечных масс). Объяснить, почему.

13. На рисунке, на котором представлена зависимость спектральной плотности излучения абсолютно черного тела от длины волны, выделены два участка, площади которых равны. Одинаково ли число квантов, испускаемых в указанных интервалах частот?



К вопросу 13

14. Имеются два параллельных пучка монохроматического света с разными длинами волн, но одинаковой интенсивности. Показать, что отношение числа фотонов, пересекающих единицу площади сечения каждого пучка в единицу времени равно отношению их длин волн.

15. Показать, что при одинаковой интенсивности падающего на поверхность излучения производимое им давление не зависит от его спектрального состава.

16. Фотон падает на зеркальную поверхность шара. Как зависит импульс, переданный шару, от расстояния между вектором импульса фотона и осью шара?

17. Совпадают ли формулы для давления, производимого светом при нормальном падении на поверхность, выведенные на основе квантовых представлений и полученные по теории Максвелла? Из приведенных ниже ответов выбрать правильный: а) совпадают частично; б) не совпадают; в) совпадают полностью; г) существует резкое различие.

18. В каком случае давление света больше? При падении света (из перечисленных ниже вариантов указать правильный): а) черную поверхность; б) белую поверхность; в) зеркальную поверхность; г) прозрачную поверхность. Указать также, в каком порядке изменяется давление: от меньшего к большему.

19. Во сколько раз давление синего света ($\lambda_1 = 400$ нм) больше давления красного света ($\lambda_2 = 700$ нм), если число фотонов, упавших на одну и ту же поверхность, одинаково?

ЗАДАЧИ

1. Чему равен импульс, который получает человек, загорающий на солнце 2,5 часа? Интенсивность солнечного света $1,1$ кВт/м², площадь облучаемой поверхности $1,3$ м². Считать, что лучи падают на тело человека под прямым углом и тело поглощает все падающие на него лучи.

2. Для сжатия горячей плазмы с помощью радиационного давления применяют мощные импульсные лазеры. Чему равно световое давление на плазму лазерного луча диаметром $1,3$ мм² и мощностью в импульсе $1,5 \times 10^9$ Вт? Коэффициент отражения плазмы принять равным единице.

3. Солнце излучает энергию со скоростью $3,9 \times 10^{26}$ Дж/с. Чему равно давление этого излучения на полностью поглощающую излучение пластинку? Расстояние от Земли до Солнца равно 150 млн км.

4. Интенсивность солнечного излучения вблизи Земли составляет $1,38$ кВт/м². Предполагая, что Земля – плоский диск радиусом 6400 км, который поглощает все падающие на него лучи, определить силу, с которой солнечный свет давит на Землю.

5. Вычислить давление излучения электрической лампочки мощностью 500 Вт на поверхность, расположенную на расстоянии 1,5 м от лампы. Считать, что поверхность поглощает все падающие лучи.

6. Излучение интенсивностью I падает нормально на поверхность, которая поглощает некоторую часть f падающей энергии, а остальное отражает. Чему равно давление излучения?

7. Показать, что вне зависимости от того, какую часть падающей энергии отражает поверхность, давление излучения на нее в точности равно плотности энергии излучения вблизи поверхности.

8. Небольшой космический корабль массой 1500 кг находится в свободном полете. В некоторый момент времени космонавт включает лазер мощностью 10 кВт. Какое приращение скорости получит корабль через 12 ч после включения лазера?

9. Гелий – неоновый лазер для лабораторных исследований имеет выходную мощность 5 мВт на волне 633 нм. С помощью линзы луч лазера сфокусирован на пятно диаметром в 2,1 длины волны. Вычислить: а) интенсивность излучения в сфокусированном пучке; б) радиационное давление на идеально поглощающую пластинку, помещенную в фокус линзы; в) силу, действующую на эту пластинку, если ее диаметр совпадает с размером пятна.

10. Выходная мощность лазера 4,6 Вт, диаметр пучка 2,6 мм. Если луч лазера направить вертикально, то чему будет равна высота H полностью отражающей цилиндрической частицы, которая под действием давления излучения будет неподвижно висеть в поле тяжести Земли? Плотность вещества частицы $1,2 \text{ г/см}^3$. Ось цилиндрической частицы параллельна лучу лазера.

11. Частица в солнечной системе находится под действием двух сил: гравитационного притяжения со стороны Солнца и радиационной силы из-за давления солнечных лучей. Предположим, что частица представляет собой сферу с плотностью $1,00 \text{ г/см}^3$ и что она поглощает все падающие на нее лучи. Показать, что все такие частицы, у которых радиус меньше некоторого критического радиуса R_0 , будут под действием солнечного излучения выброшены из солнечной системы. Вычислить величину этого радиуса.

12. В одном из своих романов писатель-фантаст Артур Кларк описал солнечную яхту, двигающуюся в межпланетном пространстве под действием солнечного ветра – радиационного давления

солнечного излучения. Вычислить силу, с которой солнечное излучение будет действовать на такую яхту, если ее парус, выполненный из полностью отражающего материала, имеет площадь $3,1 \text{ км}^2$. Расстояние от яхты до Солнца равно 150 млн км.

13. Определить давление P солнечного излучения на зачерненную пластинку, расположенную перпендикулярно солнечным лучам и находящуюся на расстоянии от Солнца, равном расстоянию Земли от Солнца. Расстояние от Земли до Солнца: $L = 1,5 \times 10^{11}$ м, температура поверхности Солнца $T_C = 6000^\circ \text{ К}$, радиус Солнца $R_C = 7 \times 10^8$ м.

14. Определить световое давление на зачерненный кружок, если каждую минуту на него падает поток лучистой энергии $W = 6,3$ Дж. Диаметр кружка 5 мм. Чему равен импульс, передаваемый кружку светом?

15. Интенсивность параллельного монохроматического светового потока $I = 30$ Дж/($\text{м}^2 \text{ с}$). Определить, пользуясь квантовыми представлениями, импульс, переносимый данным потоком за время $\tau = 5$ с через площадку $S = 100 \text{ см}^2$.

16. На поверхность площадью 100 см^2 ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Найти величину светового давления в случаях, когда поверхность: 1) полностью отражает все лучи и 2) полностью поглощает все падающие на нее лучи.

17. Монохроматический пучок света ($\lambda = 4900 \text{ \AA}$), падая нормально на поверхность, производит давление на нее, равное 5×10^{-7} Дж/м³. Сколько квантов света падает каждую секунду на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света $\rho = 0,25$.

18. Определить поверхностную плотность I потока энергии излучения, падающего на зеркальную поверхность, если световое давление P при перпендикулярном падении лучей равно 10 мкПа.

19. На зеркальце с идеально отражающей поверхностью площадью $S = 1,5 \text{ см}^2$ падает нормально свет от электрической дуги. Определить импульс p , полученный зеркальцем, если поверхностная плотность потока излучения Φ , падающего на зеркальце, равна $0,1 \text{ МВт/м}^2$. Продолжительность облучения $t = 1,5$ с.

20. Давление P монохроматического света ($\lambda = 600 \text{ нм}$) на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно $0,1$ мкПа. Определить число N фотонов, падающих за время $t = 1$ с на поверхность площадью $S = 1 \text{ см}^2$.

21. Найти величину нормального давления на плоскую поверхность при отражении параллельного светового потока с интенсивностью $I = 3,5 \times 10^3$ Дж/(м² с), если коэффициент отражения $R = 0,6$, а угол падения равен нулю.

22. Поток энергии Φ_e , излучаемый электрической лампой, равен 600 Вт. На расстоянии $r = 1,5$ м от лампы перпендикулярно падающим лучам расположено плоское круглое зеркальце диаметром $d = 2$ см. Принимая, что излучение лампы одинаково во всех направлениях и что зеркальце полностью отражает падающий на него свет, определить силу F светового давления на зеркальце.

23. Мощность точечного источника монохроматического света $P_0 = 10$ Вт на длине волны $\lambda = 500$ нм. На каком максимальном расстоянии этот источник будет замечен человеком, если глаз реагирует на световой поток 60 фотонов в секунду? Диаметр зрачка $d_{зр} = 0,5$ см.

24. Плоская световая волна с интенсивностью $I = 0,7$ Вт/см² освещает шар с зеркальной поверхностью радиусом $R = 5$ см. Коэффициент отражения равен единице. Найти с помощью корпускулярных представлений силу, которую испытывает шар.

25. Плоская световая волна с интенсивностью $I = 0,7$ Вт/см² освещает шар с зачерненной поверхностью радиусом $R = 5$ см. Коэффициент отражения шара равен нулю. Найти с помощью корпускулярных представлений силу, которую испытывает шар.

26. Параллельный пучок света длиной волны $\lambda = 500$ нм падает нормально на зачерненную поверхность, производя давление $P = 10$ мкПа. Определить: 1) концентрацию n фотонов в пучке; 2) число N фотонов, падающих на поверхность площадью 1 см² за время 10 с.

27. Поверхность площадью 100 см² каждую минуту получает 63 Дж световой энергии. Найти световое давление при нормальном падении излучения, если поверхность отражает 30 % падающей энергии, 50 % поглощает, а остальное пропускает.

28. Параллельный пучок монохроматического света лазера (длина волны $\lambda = 662$ нм, выходная мощность $P = 100$ Вт) падает на зеркальную поверхность площадью $S = 10$ мм². Определить: а) давление, производимое светом; б) плотность n фотонов в световом пучке вблизи поверхности.

29. Небольшое идеально отражающее зеркальце массой $m = 10$ мг подвешено на невесомой нити длиной $l = 10$ см. Найти

угол, на который отклонится нить, если по нормали к зеркальцу в горизонтальном направлении произвести «выстрел» коротким импульсом лазерного излучения с энергией $E = 13$ Дж.

30. Чему равна сила радиационного давления солнечного излучения на участок земной поверхности площадью $S = 0,25$ м². Считать, что поверхность полностью поглощает солнечные лучи. Вследствие атмосферного поглощения интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли составляет 130 Вт/м².

31. Интенсивность параллельного монохроматического светового потока $I = 30$ Вт/м². На пути потока помещается пластинка площадью $S = 100$ см². Пластинка отражает 30 % падающей энергии, остальное поглощает. Какой импульс будет передан этой пластинке за 5 с облучения?

32. Прибор, с помощью которого русский ученый П.Н. Лебедев проводил свои опыты по измерению давления света, представляет собой стеклянную крестовину, подвешенную на тонкой нити и заключенную в стеклянный сосуд. На концах крестовины имеется два легких кружка из платиновой фольги. Один кружок зачернен, другой оставлен блестящим. Направляя свет на один из кружков и измеряя угол поворота нити (который измеряется по отклонению светового зайчика от закрепленного на нити зеркальца), можно определить давление света. Диаметр кружков равен 5 мм. Расстояние от центра кружка до оси вращения равно 10 мм. Постоянная кручения нити $\alpha = 2,2 \times 10^{-11}$ Нм/рад. В одном из опытов блестящий кружок (коэффициент отражения $\rho = 0,5$) облучался излучением мощностью 0,5 Дж/мин. Определить угол поворота нити.

33. Прибор, с помощью которого русский ученый П.Н. Лебедев проводил свои опыты по измерению давления света, представляет собой стеклянную крестовину, подвешенную на тонкой нити и заключенную в стеклянный сосуд. На концах крестовины имеется два легких кружка из платиновой фольги. Один кружок зачернен, другой оставлен блестящим. Направляя свет на один из кружков и измеряя угол поворота нити (который измеряется по отклонению светового зайчика от закрепленного на нити зеркальца), можно определить давление света. Диаметр кружков равен 5 мм. Расстояние от центра кружка до оси вращения равно 10 мм. Постоянная кручения нити $\alpha = 2,2 \times 10^{-11}$ Нм/рад. В одном из опытов зачерненный кружок (коэффициент отражения $\rho = 0$)

облучался светом, причем угол поворота нити составил 10 угловых минут. Определить мощность падающего потока излучения.

34. Прибор, с помощью которого русский ученый П.Н. Лебедев проводил свои опыты по измерению давления света, представляет собой стеклянную крестовину, подвешенную на тонкой нити и заключенную в стеклянный сосуд. На концах крестовины имеется два легких кружка из платиновой фольги. Один кружок зачернен, другой оставлен блестящим. Направляя свет на один из кружков и измеряя угол поворота нити (который измеряется по отклонению светового зайчика от закрепленного на нити зеркала), можно определить давление света. Диаметр кружков равен 5 мм. Расстояние от центра кружка до оси вращения равно 10 мм. Постоянная кручения нити $\alpha = 2,2 \times 10^{-11}$ Нм/рад. В одном из опытов зачерненный кружок (коэффициент отражения $\rho = 0,1$) облучался светом, причем отклонение зайчика было равно 50 мм по шкале, удаленной от зеркала на 1200 мм. Определить давление света на кружок.

35. Прибор, с помощью которого русский ученый П.Н. Лебедев проводил свои опыты по измерению давления света, представляет собой стеклянную крестовину, подвешенную на тонкой нити и заключенную в стеклянный сосуд. На концах крестовины имеется два легких кружка из платиновой фольги. Один кружок зачернен, другой оставлен блестящим. Направляя свет на один из кружков и измеряя угол поворота нити (который измеряется по отклонению светового зайчика от закрепленного на нити зеркала), можно определить давление света. Диаметр кружков равен 5 мм. Расстояние от центра кружка до оси вращения равно 10 мм. Постоянная кручения нити $\alpha = 2,2 \times 10^{-11}$ Нм/рад. В одном из опытов блестящий кружок (коэффициент отражения $\rho = 0,5$) облучался светом электрической лампы. При этом отклонение зайчика составило 76 мм по шкале, удаленной от зеркала на расстоянии 1200 мм. Чему равна мощность, падающая на поверхность кружка?

36. Известно, что форму кометных хвостов можно объяснить давлением солнечных лучей. Найти, какую массу должна иметь частица в кометном хвосте, находящаяся от Солнца на таком же расстоянии, что и Земля, чтобы сила давления света на нее уравновешивалась силой притяжения частицы Солнцем. Считать, что частица отражает все падающие на нее лучи. Ее отражающую

площадь взять равной $5 \times 10^{-9} \text{ см}^2$. Солнечную постоянную для Земли принять равной $8,21 \text{ Дж/мин см}^2$.

37. Найти давление света на стенки электрической 100-ваттной лампы. Колба лампы представляет собой сферический стеклянный сосуд радиусом 5 см. Стенки колбы отражают 40 %, пропускают 50 % и поглощают 10 % падающего на них света. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение.

38. Атом поглощает фотон длиной волны 375 нм и тут же испускает другой фотон с длиной волны 580 нм. Какое количество энергии поглотил атом в этом процессе?

39. Одна из спектральных линий испускания водорода, важная в радиоастрономии, имеет длину волны 21,11 см. Какой энергии фотона это соответствует?

40. Одно время за эталон метра принималась длина, которую составляют $1650763,73$ длин волн, испускаемых источником, состоящим из атомов криптона-86. Чему равна энергия одного фотона этого излучения?

41. Околосемная атмосфера в основном формируется за счет ионизации газов солнечными лучами. Энергии ионизации лежат в диапазоне от $1,0 \times 10^{-18} \text{ Дж}$ до $1,0 \times 10^{-16} \text{ Дж}$. Какой области электромагнитного спектра Солнца соответствует этот интервал?

42. Энергию фотона в электрон-вольтах можно записать следующим образом: $E = A/\lambda$, где A имеет размерность в электрон-вольтах на нанометр (эВ×нм), а λ берется в нанометрах. Пользуясь значениями фундаментальных постоянных, найти численное значение величины A в этой формуле.

43. В идеальных условиях порог чувствительности глаза человека к излучению длиной волны 540 нм составляет 100 фотонов/с. Какой поглощаемой мощности это соответствует?

44. Панели солнечных батарей на спутниках устанавливаются так, чтобы они были перпендикулярны солнечным лучам. Предположим, что солнечная радиация состоит из монохроматического излучения на длине волны 550 нм и в месте нахождения панелей плотность энергии этого излучения составляет $1,38 \text{ кВт/м}^2$. Какова должна быть площадь панелей солнечных батарей, чтобы они поглощали «один моль (т. е. 6×10^{23}) фотонов в минуту»?

45. Ультрафиолетовая лампа, излучающая на длине 400 нм, и инфракрасная лампа, излучающая на длине волны 700 нм, имеют

каждая одинаковую мощность равную 130 Вт. Какое количество фотонов в секунду испускает каждая из этих ламп?

46. Специальная лампа излучает монохроматический свет на длине волны 630 нм. Мощность лампы равна 70 Вт и ее КПД (т.е. процент преобразования электрической энергии в световую) составляет 93.2 %. Какое количество фотонов испустит такая лампа за время своей жизни, составляющее 750 ч?

47. Лампа мощностью 100 Вт, работающая на парах натрия, испускает однородно по всем направлениям монохроматический свет на длине волны 589 нм. Найти: а) скорость испускания фотонов; б) расстояние от лампы, на котором средний поток фотонов будет равен 1 фотон/(см²с); в) расстояние от лампы, на котором средняя плотность фотонов будет равен 1 фотон/(см³); г) поток фотонов и плотность фотонов на расстоянии 2 м от лампы.

48. Лампочка накаливания мощностью $P = 150$ Вт излучает свет, средняя длина волны которого $\lambda = 1200$ нм. Найти число фотонов N , испускаемых лампочкой в единицу времени.

49. В вакууме распространяется световая волна $E = E_0 \cos(\omega t - kr)$. Выразить число фотонов n в единице объема через параметры волны.

50. Точечный изотропный источник света мощностью $P = 4,00$ Вт излучает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,60$ мкм. Найти плотность потока фотонов j на расстоянии $r = 2,00$ м от источника.

51. Найти плотность потока фотонов N в луче света с длиной волны $\lambda = 546$ нм и интенсивностью $I = 1,82$ Вт/м².

52. Импульсный лазер за время $\tau = 100$ мкс испускает луч света, имеющий диаметр $d = 0,20$ мм и энергию $E = 30,0$ Дж. Какое среднее давление оказывает такой луч на идеальное зеркало, установленное перпендикулярно направлению его распространения?

53. В вакууме распространяется электромагнитная волна $H = H_0 \cos(\omega t - kr)$. Выразить число фотонов n в единице объема через параметры волны.

54. Небольшое стеклышко массой $m = 10$ мг подвешено на невесомой нити длиной $l = 10$ см. Найти угол, на который отклонится нить, если по нормали к стеклышку в горизонтальном направлении произвести «выстрел» коротким импульсом лазерного излучения с энергией в импульсе $E = 13$ Дж. Принять, что стекло отражает 10 % и пропускает 60 % падающей на него энергии.

55. Интенсивность параллельного монохроматического светового потока $I = 30 \text{ Дж}/(\text{м}^2\text{с})$. Чему равно давление этого света на зачерненную пластинку, расположенную под углом 30° по отношению к направлению излучения?

56. Фотон с длиной волны $\lambda = 100 \text{ нм}$ падает на зеркальную поверхность шара, имеющего радиус $R = 10 \text{ см}$. Расстояние между вектором импульса фотона и осью шара $d = 5 \text{ см}$. Вычислить импульс, переданный шару.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

1. Формула Эйнштейна: $\varepsilon = h\nu = A + T$ где $\varepsilon = h\nu = \mathbf{h}\omega$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; A – работа выхода электрона из металла; T – максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона. Для подавляющего большинства металлов работа выхода не превышает нескольких электрон-вольт.

2. В общем случае скорость фотоэлектрона v связана с его максимальной кинетической энергией следующим образом:

$$T = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right), \text{ где } \beta = v/c, m_0 - \text{масса покоя электрона.}$$

Если энергия фотонов много меньше энергии покоя электрона ($h\nu = \mathbf{h}\omega \ll m_0 c^2 = 0,5 \text{ МэВ}$), то его кинетическую энергию можно определять по нерелятивистской формуле: $T = m_0 v^2 / 2$.

3. В вакуумном фотоэлементе обычно между катодом и анодом имеется контактная разность потенциалов $V_K = A_2 - A_1$, где A_2, A_1 – работы выхода фотоэлектродов. Электрод с большей работой выхода заряжается отрицательно, с меньшей – положительно. Если к тому же между катодом и анодом приложено внешнее напряжение V_0 , то формула Эйнштейна принимает вид $h\nu = A + eV_K - eV_0 + T$. При некотором отрицательном потенциале $V_0 = -V_3$ (который называют запорным) поток фотоэлектронов прекращается: $h\nu = A + eV_K + eV_3$.

4. Красная граница фотоэффекта определяется как максимальная длина волны λ_0 (или минимальная частота падающего фотона ν_0), при которых еще возможен фотоэффект: $h\nu_0 = A$, или $\lambda_0 = hc / A$.

5. Фототок вакуумного фотоэлемента I определяется как произведение заряда электрона e на число фотоэлектронов N , падающих на анод в единицу времени: $I = eN$.

Пример

Селеновый фотоэлемент облучается монохроматическим излучением с длиной волны 250 нм. Определить: а) максимальную скорость фотоэлектрона, выбитого из селеновой пластинки фотоэлемента, если работа выхода электронов из селена равна 4,72 эВ; б) число фотонов, приходящееся на один электрон, участвующий в фототоке, если чувствительность этого фотоэлемента равна 200 мкА/Вт.

Решение

а) В соответствии с формулой Эйнштейна для внешнего фотоэффекта получим:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} + A = h\omega = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

Тогда из формулы (1) следует:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)}. \quad (2)$$

Подставив в (2) данные из условия задачи, получим. $v_{\max} = 2,96 \times 10^5$ м/с.

б) Величина чувствительности фотоэлемента показывает, на сколько изменяется фототок при изменении мощности облучения. Из условия задачи следует, что при изменении мощности облучения на 1 Вт фототок изменяется на 200 мкА. Вычислим число фотонов N_{ϕ} , падающих за 1 с на фотоэлемент, при котором падающая энергия соответствует 1 Дж. Очевидно:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = N_{\phi} \frac{hc}{\lambda}. \quad (3)$$

Из (3) имеем

$$N_{\phi} = \frac{\lambda}{hc} [\text{фотонов/с}]. \quad (4)$$

Подставив в (4) данные задачи, получим $N_{\phi} = 1,25 \times 10^{18}$.

С другой стороны, фототок можно выразить через число электронов N_e , пересекающих поперечное сечение фотоэлемента за 1 с., т.е.

$$J = N_e e, \quad (5)$$

где e – заряд электрона.

Из (5) вычисляем число электронов, которому соответствует фототок в 200 мкА: $N_e = J/e = 200 \times 10^{-6} / (1,6 \times 10^{-19}) = 1,25 \times 10^{15}$. Таким образом, на один электрон, участвующий в фототоке, приходится $N_{\phi}/N_e = 1000$ фотонов.

ВОПРОСЫ

1. Нарисовать на одном графике качественную зависимость фототока от приложенного к фотоэлектроду напряжения для двух разных интенсивностей облучения P_1 и P_2 ($P_1 > P_2$) при облучении светом постоянной длины волны.

2. Нарисовать на одном графике качественную зависимость фототока от интенсивности облучения для двух разных длин волн источника облучения λ_1 и λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$).

3. Нарисовать качественную зависимость фототока от длины волны облучения, если при изменении длины волны интенсивность облучения (число фотонов, падающих на фотоэлемент за 1 с) остается постоянным. Считать, что на один электрон, участвующий в фототоке, приходится один падающий фотон.

4. Нарисовать качественную зависимость фототока от длины волны облучения, если при изменении длины волны мощность падающего на фотоэлемент облучения остается постоянной. Считать, что на один электрон, участвующий в фототоке, приходится один падающий фотон.

5. Пластина вакуумного фотоэлемента облучается электролампочкой. Прежде чем попасть на пластину фотоэлемента, свет электролампочки проходит через призму монохроматора, изменяя угол поворота которой, можно из всего спектра излучения электролампочки выделять определенную длину волны. Какой вид (качественный) будет иметь зависимость фототока от длины волны облучения?

6. Нарисовать на одном графике качественную зависимость фототока от приложенного к фотоэлектроду напряжения для двух разных длин волн источника облучения λ_1 и λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$).

7. Изобразить график зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектрона от частоты облучения монохроматическим светом.

8. Нарисовать зависимость задерживающего потенциала от частоты облучения при освещении фотокатода монохроматическим светом с различными частотами. Как по этому графику определить работу выхода электронов из металла?

9. Нарисовать зависимость задерживающего потенциала от длины волны облучения.

10. Почему согласно волновой теории величина фототока должна зависеть от интенсивности облучения, но не зависеть от длины волны?

11. Какие свойства фотоэффекта противоречат волновой теории?

12. Почему существование граничной частоты в фотоэффекте говорит в пользу фотонной теории излучения и противоречит волновой теории?

13. Нарисовать качественную зависимость фототока от длины волны облучения.

14. Нарисовать качественную зависимость фототока от частоты облучения.

15. При облучении изолированной металлической пластины ультрафиолетовым светом фотоэлектроны появляются только в начальный момент облучения и затем пропадают. Почему?

16. Почему фототок сильно зависит от структуры поверхности фотоэлемента?

17. Почему даже при монохроматическом облучении фотоэлектроны вылетают с разными скоростями?

18. Мы говорим, что при фотоэффекте вся энергия фотона передается фотоэлектрону. Почему мы пренебрегаем энергией, которая передается решетке?

19. Некоторая металлическая пластина облучается светом определенной частоты. От каких из следующих факторов зависит появление фотоэлектронов: а) интенсивности облучения; б) времени облучения; в) теплопроводности металла; г) площади пластины; д) материала пластины?

20. Каким образом с помощью фотоэффекта можно измерить постоянную Планка?

21. В каком из указанных ниже диапазонов лежат работы выхода фотоэлементов: а) 10^{-19} Дж $< A < 10^{-18}$ Дж; б) 10^{-7} Дж $< A < 10^{-5}$ Дж; в) 10^{-25} Дж $< A < 10^{-22}$ Дж?

22. Между фотокатодом и анодом приложена такая разность потенциалов, что наиболее быстрые электроны могут пролететь только половину расстояния между электродами. Смогут ли они долететь до анода, если расстояние между электродами уменьшить вдвое при той же разности потенциалов?

23. Нарисовать качественную зависимость числа вылетающих фотоэлектронов от длины волны облучения.

24. Как правило, число квантов монохроматического света, которым облучают фотокатод, гораздо больше числа электронов, участвующих в фототоке. Как это можно объяснить?

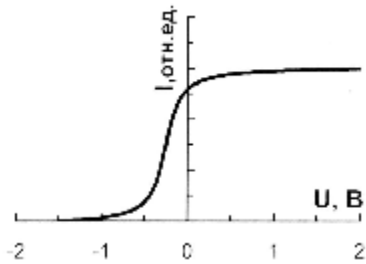
25. Почему при фотоэффекте максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона не зависит от интенсивности падающего излучения?

26. Изобразить график зависимости фототока от длины волны падающего света, если напряжение между фотоэлектродами и интенсивность излучения остаются постоянными.

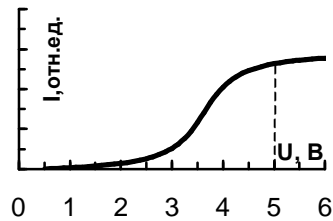
27. У двух фотоэлементов катоды изготовлены из разных материалов. Работа выхода у первого материала в два раза меньше, чем у второго. Изобразить на одном графике зависимости задерживающего потенциала от частоты облучающего света для этих двух фотоэлементов.

28. Экспериментально не наблюдается практически никакой задержки между началом облучения фотоэлемента и возникновением фототока вне зависимости от мощности источника света. Можно ли этот факт объяснить с помощью волновой теории?

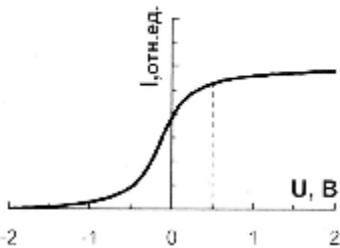
29. На рисунках показаны графики зависимости фототока от внешней разности потенциалов между катодом и анодом. Определить по этим графикам: а) величину задерживающего потенциала; б) величину контактной разности потенциалов и ее полярность.



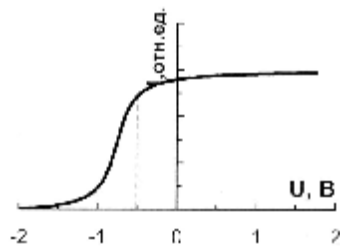
К вопросу 29



К вопросу 29



К вопросу 29

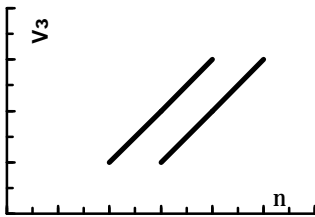


К вопросу 29

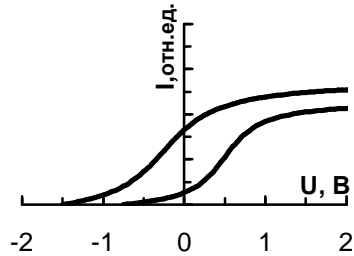
30. Из приведенных ниже утверждений относительно фотоэффекта выбрать правильные: 1) число высвобождаемых электронов прямо пропорционально интенсивности падающего излучения; 2) максимальная кинетическая энергия не зависит от частоты, а зависит от интенсивности падающего света; 3) задерживающий потенциал не зависит от работы выхода электрона; 4) существует граничная частота, ниже которой фотоэффект невозможен.

31. На рисунке показаны зависимости задерживающего напряжения для двух различных материалов фотокатода. Какая зависимость относится к фотокатоду с меньшей работой выхода?

32. Два фотокатода освещаются одним и тем же источником света. На рисунке представлены зависимости фототока от напряжения между анодом и катодом. Какая зависимость относится к фотокатоду с большей работой выхода?



К вопросу 31



К вопросу 32

ЗАДАЧИ

1. Плоский алюминиевый электрод освещается ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 83$ нм. Красная граница фотоэффекта для алюминия соответствует длине волны $\lambda_0 = 332$ нм. Найти скорость фотоэлектронов.

2. При освещении изолированного вакуумного фотоэлемента желтым светом ($\lambda_1 = 600$ нм) он заряжается до разности потенциалов $V_1 = 1,2$ В. До какой разности потенциалов зарядится фотоэлемент при освещении его фиолетовым светом ($\lambda_2 = 400$ нм)?

3. При поочередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн $\lambda_1 = 0,35$ и $\lambda_2 = 0,54$ мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в $\eta = 2$ раза. Найти работу выхода с поверхности этого металла.

4. При исследовании вакуумного фотоэлемента оказалось, что при освещении катода светом частотой $\nu_0 = 10^{15}$ Гц фототок с поверхности катода прекращается при задерживающей разности потенциалов $V_3 = 2$ В между катодом и анодом. Определить работу выхода материала катода.

5. Для измерения постоянной Планка катод вакуумного фотоэлемента освещается монохроматическим светом. При длине волны излучения $\lambda = 620$ нм ток фотоэлектронов прекращается, если в цепь между катодом и анодом включить задерживающий потенциал V_3 не меньше определенного значения. При изменении

длины волны на 25 % задерживающий потенциал оказывается на 0,4В меньше. Определить по этим данным постоянную Планка.

6. Кванты света с энергией $\epsilon = 4,9$ эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода $A = 4,5$ эВ. Найти максимальную скорость фотоэлектрона.

7. Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны λ . При отрицательном потенциале на аноде $V_1 = -1,6$ В ток в цепи прекращается. При изменении длины волны света в 1,5 раза для прекращения тока потребовалось подать на анод отрицательный потенциал $V_2 = -1,8$ В. Определить работу выхода материала катода.

8. Найти величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого равна 3300 Å. Работа выхода электронов из калия 2,15 эВ.

9. Определить красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм. Работа выхода для цинка равна 3,74 эВ.

10. Фототок, возникающий в цепи вакуумного фотоэлемента при освещении цинкового электрода электромагнитным излучением с длиной волны 262 нм, прекращается, если подключить внешнее задерживающее напряжение 1,5 В. Найти величину и полярность внешней контактной разности потенциалов данного фотоэлемента. Работа выхода для цинка равна 3,74 эВ.

11. «Красная граница» для цезия $\lambda = 6,6 \times 10^{-7}$ м. Найти: а) работу выхода электронов из цезия; б) максимальную скорость и энергию электронов, вырываемых из цезия излучением с длиной волны $\lambda = 220$ нм.

12. При освещении некоторого металла излучением с длиной волны $\lambda_1 = 279$ нм задерживающий потенциал равен 0,66 В, при длине волны $\lambda_2 = 245$ нм задерживающий потенциал становится равным 1,26 В. Считая заряд электрона и скорость света известными, определить постоянную Планка и работу выхода электрона из данного металла.

13. Плоскую цинковую пластинку освещают излучением со сплошным спектром, коротковолновая граница которого соответствует длине волны $\lambda = 30$ нм. Вычислить, на какое максимальное расстояние от поверхности пластинки может удалиться фото-

электрон, если вне пластинки имеется задерживающее однородное электрическое поле с напряженностью $E = 10 \text{ В/см}$. Работа выхода электронов из цинка равна $3,74 \text{ эВ}$.

14. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 2750 \AA . Найти: 1) работу выхода электрона из этого металла, 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волны 1800 \AA .

15. Чему равны максимальные скорости фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цезия и платины излучением с длиной волны: а) $\lambda_1 = 185 \text{ нм}$; б) $\lambda_2 = 422,7 \text{ нм}$? Работы выхода электронов из платины и цезия равны, соответственно $5,29 \text{ эВ}$ и $1,89 \text{ эВ}$.

16. Медный шарик, удаленный от других тел, облучают монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 2 \times 10^{-7} \text{ м}$. До какого максимального потенциала зарядится шарик, теряя фотоэлектроны? Работы выхода электронов из меди равна 5 эВ .

17. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 2750 \AA . Чему равно минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект?

18. Фотоэффект у некоторого металла начинается при частоте падающего света $\nu_0 = 6 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Определить частоту света, при которой освобождаемые им с поверхности металла электроны полностью задерживаются разностью потенциалов в 3 В . Найти работу выхода для данного металла.

19. Красная граница фотоэффекта для калия соответствует длине волны $\lambda_0 = 577 \text{ нм}$. Вычислить минимальную энергию кванта, необходимую для освобождения фотоэлектрона из данного металла.

20. Квант света длиной волны $\lambda = 200 \text{ нм}$ освобождает с поверхности платинового электрода фотоэлектрон. Определить импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему кванту. Работа выхода электронов из платины равна $5,3 \text{ эВ}$.

21. При облучении селенового фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 550 нм его чувствительность составила 200 мкА/Вт . Определить число фотонов, приходящихся на один электрон, участвующий в фототоке.

22. Фотопленка состоит из тонкого слоя бромистого серебра (AgBr) энергия диссоциации молекул которого составляет $0,6 \text{ эВ}$. На пленке появляется изображение, если энергия световых кван-

тов превышает эту величину. Чему равна максимальная длина волны излучения, регистрируемая такой пленкой?

23. Определить задерживающий потенциал при облучении калия светом с длиной волны 320 нм. Работа выхода для калия равна 2,15 эВ.

24. Фотон с энергией 10 эВ падает на селеновую пластинку и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластинкой, если фотоэлектрон вылетает навстречу падающему фотону и их направления перпендикулярны поверхности пластинки. Работа выхода электронов из селена равна 4,72 эВ.

25. При облучении фотоэлемента из платины монохроматическим светом с длиной волны 280 нм, на один вылетевший электрон приходится 13560 световых квантов. Какой чувствительности (в А/Вт) это соответствует?

26. Электромагнитное излучение с $\lambda = 300$ нм падает на фотоэлемент, находящийся в режиме насыщения. Соответствующая спектральная чувствительность фотоэлемента $J = 4,8$ мА/Вт. Определить число фотоэлектронов, приходящихся на один падающий фотон.

27. Вакуумный фотоэлемент состоит из двух электродов, один из которых цезиевый, а другой медный. Цезиевый электрод освещается электромагнитным излучением с длиной волны 220 нм. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, подлетающих к медному электроду, если электроды снаружи замкнуть накоротко. Работа выхода меди равна 4,47 эВ, цезия – 1,89 эВ.

28. Фототок, возникающий в цепи вакуумного фотоэлемента при освещении цинкового электрода электромагнитным излучением с длиной волны 262 нм, прекращается, если подключить внешнее задерживающее напряжение 1,5 В. найти величину и полярность внешней контактной разности потенциалов фотоэлемента.

29. Найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, вырываемых с поверхности лития электромагнитным излучением, напряженность электрической составляющей которого меняется со временем по закону $E = a(1 + \cos\omega t)\cos\omega_0 t$, где a – некоторая постоянная, $\omega = 6 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $\omega_0 = 3,6 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

30. Пластину освещают монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda = 3125 \text{ \AA}$. Известно, что наибольшее значение

импульса, передаваемого пластине одним фотоэлектроном, $p = 3,3 \times 10^{-25}$ кгм/с. Определить работу выхода электронов.

31. Плоская поверхность фотоэлемента освещается светом с длиной волны $\lambda = 1800 \text{ \AA}$. Красная граница для данного вещества $\lambda_0 = 3600 \text{ \AA}$. Непосредственно у поверхности создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,0$ мТл, линии индукции которого параллельны поверхности. На какое максимальное расстояние от поверхности смогут удалиться электроны, если они вылетают перпендикулярно поверхности?

32. Цинковую пластину освещают ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 300$ нм. На какое максимальное расстояние от поверхности смогут удалиться электроны, если вне пластины создано задерживающее однородное поле с напряженностью $E = 10$ В/см?

33. При освещении вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом в его цепи регистрируют ток насыщения силой $I_n = 3 \times 10^{-10}$ А. Оценить число электронов, вырываемых светом из катода ежесекундно, и полный заряд, протекающий через фотоэлемент за это время.

34. Катод фотоэлемента освещают светом с длиной волны $\lambda = 5000 \text{ \AA}$. Мощность излучения, падающего на катод, $P = 30$ мВт. При этом в цепи элемента сила тока $I = 1$ мА. Найти отношение числа падающих фотонов к числу выбитых электронов.

35. Катод фотоэлемента освещают светом с длиной волны $\lambda = 2 \times 10^{-7}$ м. Мощность излучения, падающего на катод, $P = 0,02$ Вт. При этом на каждые $n = 10$ квантов света приходится один выбитый фотоэлектрон. Определить силу тока насыщения фотоэлемента.

36. Оценить изменение силы давления вольфрамовой пластинки на стол, если ее облучать перпендикулярно поверхности монохроматическим светом мощностью $P = 1$ Вт с длиной волны $\lambda = 1000 \text{ \AA}$. Все электроны считать вылетающими перпендикулярно поверхности с максимальными скоростями. Работа выхода вольфрама $4,5$ эВ. Считать, что каждый падающий на пластинку фотон выбивает один электрон.

37. Плоская пластинка из вольфрама освещается светом с длиной волны $\lambda = 0,2$ мкм. Найти напряженность однородного задерживающего электрического поля вне пластинки, если фото-

электрон может удалиться от нее на расстояние 4 см. Работа выхода электрона из вольфрама равна 4,5 эВ.

38. В вакуумном фотоэлементе, освещаемом монохроматическим светом с частотой $\nu = 3 \times 10^{14}$ Гц, фототок прекратился при включении между анодом и катодом некоторого задерживающего напряжения. Определите задерживающий потенциал и нарисовать схему включения фотоэлемента. Материалом катода является алюминий.

39. При освещении цинкового фотокатода светом с длиной волны $\lambda = 250$ нм увеличивают обратное напряжение между катодом и анодом до тех пор, пока ток не станет равным нулю. Определите задерживающий потенциал и нарисовать схему включения фотоэлемента.

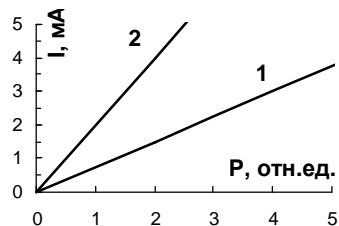
40. Изолированная металлическая пластинка освещается светом с длиной волны $\lambda = 4,5 \times 10^{-7}$ м. Работа выхода электрона из металла равна 2 эВ. До какого потенциала зарядится пластинка при непрерывном действии света?

41. Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом. При подаче на анод внешнего положительного потенциала $V_1 = 1,5$ В ток в цепи прекращается при частоте облучения $\nu = 4 \times 10^{14}$ Гц. При какой частоте облучения прекратится фототок, если на анод подать внешний отрицательный потенциал $V_2 = -1$ В? Зависит ли полученный результат от контактной разности потенциалов?

42. До какого потенциала можно зарядить удаленный от других тел серебряный шарик, облучая его ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda = 300$ нм?

43. До какого потенциала можно зарядить удаленный от других тел серебряный шарик, облучая его ультрафиолетовым излучением с длиной волны $\lambda = 250$ нм?

44. На рисунке показаны зависимости тока насыщения фотоэлемента от интенсивности монохроматического света для двух разных длин волн. Пользуясь этим графиком, оценить отношение N_1/N_2 чисел фотонов, падающих на катод фотоэлемента и вызывающих один и тот же ток насыщения в первом и во втором случаях.



45. На рисунке показаны зависимости тока насыщения фотоэлемента от интенсивности монохроматического света для двух разных материалов фотокатода. Пользуясь этим графиком, оценить отношение N_1/N_2 чисел электронов, покидающих фотокатод за единицу времени при одной и той же интенсивности облучения в первом и во втором случаях.

46. На рисунке изображена зависимость квантового выхода фотоэффекта от длины волны света для натрия. С помощью этого рисунка найти работу выхода для натрия. (Квантовый выход – это среднее количество электронов, покидающих металл под действием одного фотона.)



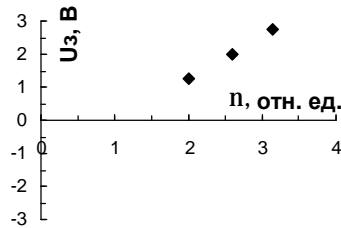
К задаче 46

47. На рисунке изображена зависимость квантового выхода фотоэффекта от энергии фотона для чистого натрия. С помощью этого рисунка найти работу выхода и длину волны, соответствующую красной границе фотоэффекта для натрия. (Квантовый выход – это среднее количество электронов, покидающих металл под действием одного фотона.)

48. На рисунке показаны несколько экспериментальных точек, полученных на фотоэлементе, для зависимости задерживающего напряжения от частоты света. Пользуясь этим рисунком, определить работу выхода электронов из металла.



К задаче 47

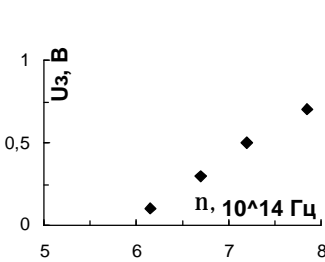


К задаче 48

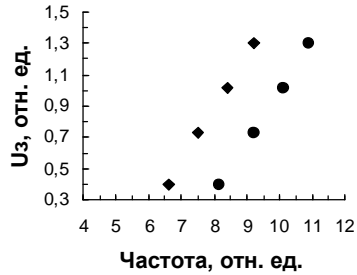
49. На рисунке показаны несколько экспериментальных точек, полученных на фотоэлементе, для зависимости задерживающего напряжения от частоты света. Пользуясь этим рисунком,

определить работу выхода электронов из металла. Ответ выразить в электрон-вольтах.

50. На рисунке показаны экспериментальные точки для зависимости задерживающего напряжения от частоты света для двух фотоэлементов. Известно, что у одного из них катод выполнен из никеля. Пользуясь рисунком и таблицей работ выхода элементов, определить элементы, которым принадлежат экспериментальные зависимости.



К задаче 49



К задаче 50

51. Вам необходимо подобрать материал для фотоэлектрических элементов, работающих в видимом диапазоне (400...700 нм). Какой из следующих материалов вы выберете: тантал, вольфрам, алюминий, барий, литий, цезий?

52. Энергия, требуемая для удаления электрона из металлического натрия, равна 2,28 эВ. Какой фототок будет зарегистрирован при облучении натриевого фотокатода красным светом с длиной волны 678 нм?

53. Спутники на околоземной орбите заряжаются частично и потому, что солнечные лучи выбивают электроны с поверхностного покрытия спутника. Каким материалом из указанных в таблице работ выхода лучше всего сделать покрытие спутника, чтобы эффект зарядки свести к минимуму?

54. Найти максимальную энергию в элеткрон-вольтах фотоэлектронов, если работа выхода материала равна 2,33 эВ, а частота облучающего света равна $3,19 \times 10^{15}$ Гц.

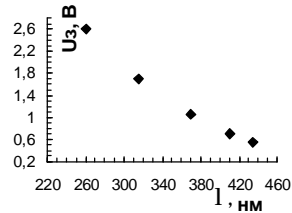
55. Фотоны, падая на поверхность натрия, вызывают фотоэффект. Когда задерживающий потенциал равен 4,92 В, фототок прекращается. Найти длину волны фотонов. Работа выхода натрия равна 2.28 эВ.

56. Фотокатод из алюминия облучается светом с длиной волны 200 нм. Работа выхода алюминия равна 4,2 эВ. Найти: а) кинетическую энергию наиболее быстрых фотоэлектронов; б) кинетическую энергию наиболее медленных фотоэлектронов; в) задерживающий потенциал; г) красную границу фотоэффекта.

57. Работа выхода материала равна 1,85 эВ. Найти: а) задерживающий потенциал для длины волны 490 нм; б) максимальную скорость фотоэлектронов.

58. При облучении фотокатода светом с длиной волны 491 нм задерживающий потенциал оказался равным 710 мВ. При облучении светом с другой длиной волны задерживающий потенциал стал равным 1,43 В. Найти: а) значение новой длины волны; б) работу выхода материала фотокатода.

59. На рисунке показаны экспериментальные точки зависимости задерживающего потенциала от длины волны, полученные американским ученым Милликеном для лития. Определить по этому графику постоянную Планка и работу выхода для лития.



К задаче 59

60. Поверхность лития, работа выхода которого равна 2,49 эВ, облучают светом с частотой $6,33 \times 10^{14}$ Гц. Выбивание электронов приводит к тому, что металл заряжается положительно. До какого потенциала зарядится металл в процессе облучения?

61. Чтобы удалить из атома молибдена электрон, находящийся на его внутренних оболочке, требуется энергия 20 кэВ. Если для этой цели использовать фотоны, то: а) какая длина волны должна быть у фотона? б) какой области спектра относится излучение, содержащее такие фотоны? в) можно ли такой процесс назвать фотоэффектом?

62. Золотая фольга облучается рентгеновскими лучами с длиной волны 71 пм, которые выбивают электроны из внутренних оболочек атома золота. Фольга помещена в однородное магнитное поле B , попадая в которое, электроны описывают окружности радиусом R . Из эксперимента известно, что произведение $R \times B = 188$ мкТл м. Найти: а) максимальную кинетическую энергию выбитых электронов; б) работу, которую необходимо затратить на удаление электронов в этом эксперименте.

63. Рассмотреть (с помощью релятивистской механики) столкновение фотона со свободным электроном и показать, что в этом случае фотон не может передать всю свою энергию электрону. Другими словами, фотоэффект не может быть осуществлен на свободных электронах, так как для этого электроны должны находиться в твердом теле или быть связаны в атоме.

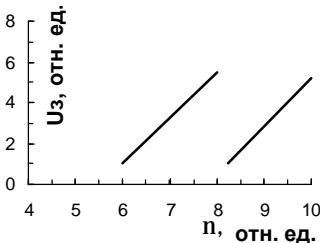


К задаче 64

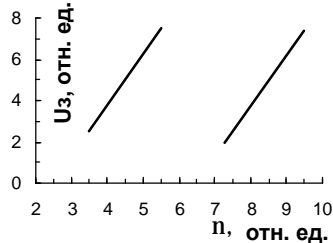
64. На рисунке показаны экспериментальные зависимости задерживающего напряжения от частоты света для двух фотоэлементов. Известно, что у одного из них катод выполнен из калия. Пользуясь рисунком и таблицей работ выхода элементов, определить элементы, которым принадлежат экспериментальные зависимости.

65. На рисунке показаны экспериментальные зависимости задерживающего напряжения от частоты света для двух фотоэлементов. Известно, что у одного из них катод выполнен из платины. Пользуясь рисунком и таблицей работ выхода элементов, определить элементы, которым принадлежат экспериментальные зависимости.

66. На рисунке показаны экспериментальные зависимости задерживающего напряжения от частоты света для двух фотоэлементов. Известно, что у одного из них катод выполнен из цезия. Пользуясь рисунком и таблицей работ выхода элементов, определить элементы, которым принадлежат экспериментальные зависимости.

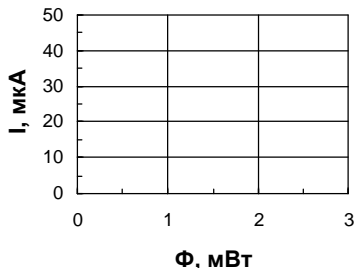


К задаче 65



К задаче 66

67. На фотоэлемент падает квазимонохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Квантовый выход фотоэлемента $J = 0,05$. Изобразить в координатах, показанных на рисунке, зависимость тока насыщения от светового потока. (Квантовый выход – это среднее количество электронов, покидающих металл под действием одного фотона.)



К задаче 67

68. Электроды вакуумного фотоэлемента (один цезиевый, другой медный) замкнуты снаружи накоротко. Цезиевый электрод освещают монохроматическим электромагнитным излучением. Найти: а) длину волны излучения, при которой появится фототок; б) максимальную скорость фотоэлектронов, подлетающих к медному электроду, если длина волны излучения равна 220 нм. Работа выхода меди равна 4,47 эВ, цезия – 1,89 эВ.

69. Электроды вакуумного фотоэлемента (один цезиевый, другой медный) замкнуты снаружи накоротко. Медный электрод освещают монохроматическим электромагнитным излучением с длиной волны 220 нм. Найти максимальную скорость фотоэлектронов, подлетающих к цезиевому электроду. Работа выхода меди равна 4,47 эВ, цезия – 1,89 эВ.

70. Катод вакуумного фотоэлемента освещается монохроматическим светом. При длине волны излучения λ ток фотоэлектронов прекращается, если в цепь между катодом и анодом включить задерживающий потенциал V_3 не меньше определенного значения. При изменении длины волны на 25 % задерживающий потенциал оказывается на 0,4 В меньше. Определить по этим данным длину волны излучения λ .

71. Катод вакуумного фотоэлемента освещается монохроматическим светом. При длине волны излучения λ ток фотоэлектронов прекращается, если в цепь между катодом и анодом включить задерживающий потенциал V_3 не меньше определенного значения. При изменении длины волны на 25 % задерживающий потенциал оказывается на 0,4 В больше. Определить по этим данным длину волны излучения λ .

72. Фотон с энергией 10 эВ падает нормально на селеновую пластинку и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластинкой, если фотоэлектрон вылетает навстречу падающему фотону под углом 30° к направлению его движения. Работа выхода электронов из селена равна 4,72 эВ.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Эффект Комптона представляет собой изменение длины волны $\Delta\lambda$ фотона при рассеянии его на свободном электроне на угол θ : $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta)$; где m – масса электрона; λ – длина падающей волны, λ' – длина отраженной волны, λ_c – комптоновская длина волны электрона: $\lambda_c = h/(mc) = 2,23 \times 10^{-12}$ м.

Пример

Гамма-квант с энергией $\varepsilon = 0,75$ МэВ рассеивается под углом $\theta = 60^\circ$ на свободно покоящемся электроне. Определить: а) кинетическую энергию электрона после соударения; б) импульс электрона; в) угол между импульсами электрона и рассеянного гамма-кванта; г) скорость электрона.

Решение

а) Энергию рассеянного фотона найдем, воспользовавшись формулой Комптона:

$$\lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta). \quad (1)$$

Длины волн λ' и λ выразим через энергии ε' и ε соответствующих фотонов ($\varepsilon = 2\pi\hbar c/\lambda$):

$$\frac{2\pi\hbar c}{\varepsilon'} - \frac{2\pi\hbar c}{\varepsilon} = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta). \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{(\varepsilon/mc^2)(1 - \cos\theta) + 1}. \quad (3)$$

Произведя вычисления, найдем энергию рассеянного гамма кванта $\varepsilon' = 0,43$ МэВ. Из закона сохранения энергии находим кинетическую энергию электрона отдачи:

$$T = \varepsilon - \varepsilon' = 0,632 \text{ МэВ} \quad (4)$$

б) Из закона сохранения импульса следует, что импульс падающего фотона P_γ равен векторной сумме импульсов рассеянного фотона P'_γ и электрона отдачи p :

$$\mathbf{P}_\gamma = \mathbf{P}'_\gamma + \mathbf{p}. \quad (6a)$$

Из (6) имеем:

$$\mathbf{P}_\gamma - \mathbf{P}'_\gamma = \mathbf{p}. \quad (6b)$$

Возведем (6б) почленно в квадрат и получим

$$p^2 = P_\gamma^2 + P_\gamma'^2 - 2P_\gamma P_\gamma' \cos\theta. \quad (7)$$

Абсолютные значения импульсов гамма кванта связаны с соответствующими энергиями: $P_\gamma = \varepsilon/c$; $P_\gamma' = \varepsilon'/c$. Таким образом,

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{\varepsilon^2 + \varepsilon'^2 - 2\varepsilon\varepsilon' \cos\theta}. \quad (8)$$

Подставив в (8) величины ε' , ε и θ , получим $p = 0,65$ МэВ/с = $3,46 \times 10^{-22}$ Джс/м.

в) Возведем (6а) почленно в квадрат:

$$P_\gamma^2 = p^2 + P_\gamma'^2 + 2pP_\gamma' \cos\alpha, \quad (9)$$

где α – угол между импульсами электрона и рассеянного гамма-кванта.

Таким образом,

$$\cos\alpha = \frac{P_\gamma^2 - P_\gamma'^2 - p^2}{2pP_\gamma'} = \frac{\varepsilon^2 - \varepsilon'^2 - p^2 c^2}{2\varepsilon' p c}. \quad (10)$$

Подставив в (10) найденные ранее значения, получим $\cos\alpha = -0,08$, $\alpha = 94,6^\circ$.

г) Поскольку кинетическая энергия электрона сравнима по величине с его энергией покоя $mc^2 = 0,5$ МэВ, скорость электрона надо находить исходя из релятивистской формулы для импульса:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (11)$$

Из (11) получим для скорости электрона:

$$v = \frac{pc}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}. \quad (12)$$

Проведя соответствующие вычисления, найдем скорость электрона: $v = 0,79 c = 2,37 \times 10^8$ м/с.

ВОПРОСЫ

1. Построить качественный график зависимости интенсивности рассеянного комптоновского излучения от длины волны, регистрируемой детектором под некоторым углом к направлению падающего излучения.

2. В явлении фотоэффекта и в явлении комптоновского рассеяния имеются налетающие фотоны и вылетевшие электроны. В чем состоит принципиальная разница между этими двумя явлениями?

3. Какие гипотезы относительно природы излучения сделал Комптон для объяснения открытого им явления?

4. Показать с помощью законов сохранения энергии и импульса, что свободный электрон не может полностью поглотить фотон.

5. Почему при комптоновском рассеянии разность между длинами волн падающего и рассеянного излучения не зависит от вещества, из которого сделано рассеивающее тело?

6. При каком угле рассеянного излучения комптоновский электрон будет иметь максимальную кинетическую энергию? Чему при этом будет равен угол между направлением движения электрона и направлением падающего излучения?

7. Чему равно максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии и под каким углом наблюдается эта длина волны?

8. Показать, что в эффекте Комптона проявляются корпускулярные свойства света.

9. Можно ли наблюдать эффект Комптона при рассеянии видимого света?

10. Существует ли отличие в характере взаимодействия фотона и электрона при фотоэффекте и эффекте Комптона? Из приведенных ниже утверждений выбрать правильные: 1) существует отличие только тогда, когда энергия фотона значительно больше энергии связи электрона в атоме; 2) не существует никакого различия в характере взаимодействия; 3) существует отличие в том, что фотон при эффекте Комптона передает частицам вещества свою энергию не полностью; 4) не существует различия, если энергии фотона и электрона сравнимы между собой.

ЗАДАЧИ

1. Определить угол θ рассеяния фотона, испытавшего соударение со свободным электроном, если изменение длины волны $\Delta\lambda$ при рассеянии равно 3,62 пм.

2. Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda_0 = 0,2 \text{ \AA}$ испытывают комптоновское рассеяние под углом 90° . Найти: 1) изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс электрона отдачи.

3. Определить максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии: 1) на свободных электронах; 2) на свободных протонах.

4. При комптоновском рассеянии энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен $\pi/2$. Найти энергию и импульс рассеянного фотона.

5. Фотон с энергией $\epsilon = 0,4 \text{ МэВ}$ рассеялся под углом $\theta = 90^\circ$ на свободном электроне. Определить длину волны рассеянного фотона и его энергию.

6. Энергия рентгеновских лучей равна 0,6 МэВ. Найти энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20 %.

7. Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda_0 = 0,708 \text{ \AA}$ испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найти длину волны рентгеновских лучей, рассеянных в направлениях: 1) $\pi/2$; 2) π .

8. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на рассеивающее вещество. При этом длины волн излучения, рассеянного под углами $\theta_1 = 60^\circ$ и $\theta_2 = 120^\circ$, отличаются друг от друга в $\eta = 2,0$ раза. Считая, что рассеяние происходит на свободных электронах, найти длину волны падающего излучения.

9. Рентгеновское излучение длиной волны $\lambda = 55,8$ пм рассеивается плиткой графита. Определить частоту света, рассеянного под углом $\theta = 60^\circ$ к направлению падающего пучка света.

10. Энергия ϵ падающего фотона равна энергии покоя электрона. Определить энергию рассеянного фотона и энергию, полученную электроном отдачи, если угол рассеяния θ равен: 1) 60° ; 2) 90° ; 3) 180° .

11. При облучении вещества фотонами с длиной волны $0,05$ Р рассеяние фотонов происходит под углом $\beta = 20^\circ$. Каков импульс электрона отдачи?

12. Фотон с энергией 250 кэВ рассеялся под углом $\theta = 120^\circ$ на первоначально покоившемся свободном электроне. Определить: а) энергию рассеянного фотона; б) кинетическую энергию отдачи электрона.

13. Фотон с энергией $\epsilon = 0,25$ МэВ рассеялся на свободном электроне. Энергия ϵ рассеянного фотона равна $0,2$ МэВ. Определить угол рассеяния θ .

14. Угол рассеяния θ фотона равен 90° . Угол отдачи ϕ электрона равен 30° . Определить энергию ϵ падающего фотона.

15. Длина волны света, падающего на вещество со свободными электронами, $\lambda = 0,003$ нм. Какую энергию приобретут электроны отдачи при рассеянии кванта под углом $\beta = 60^\circ$?

16. Фотон с длиной волны $\lambda = 6$ пм рассеялся под прямым углом на свободно покоящемся электроне. Найти частоту рассеянного фотона.

17. Фотон с энергией $0,15$ МэВ рассеялся на свободно покоящемся электроне, в результате чего его длина волны изменилась на $\Delta\lambda = 3$ пм. Найти угол, под которым вылетел комптоновский электрон.

18. При облучении вещества со свободными электронами рентгеновскими лучами с длиной волны $\lambda = 0,01$ нм было обнаружено под углом β по отношению к первоначальному излучению излучение с длиной волны $\lambda' = \lambda + 0,0024$ нм. Найти угол рассеяния β .

19. Определить импульс P электрона отдачи при эффекте Комптона, если фотон с энергией, равной энергии покоя электрона, был рассеян на угол $\theta = 180^\circ$.

20. При комптоновском рассеянии длина волны падающего излучения $\lambda = 0,003$ нм, скорость электрона отдачи равна $0,6 c$ (c – скорость света). Определить изменение длины волны фотона и угол, под которым он рассеется.

21. Какова была длина волны рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом 60° длина волны рассеянного излучения оказалась равной $2,54 \times 10^{-10}$ см?

22. Фотон с энергией 0,15 МэВ рассеялся на свободно покоящемся электроне, в результате чего его длина волны изменилась на $\Delta\lambda = 3$ пм. Найти скорость комптоновского электрона.

23. Фотон с энергией 0,15 МэВ рассеялся на свободно покоящемся электроне, в результате чего его длина волны изменилась на $\Delta\lambda = 3$ пм. Найти угол, под которым рассеялся фотон, и его энергию.

24. Фотон с импульсом $p_1 = 3,4 \times 10^{-3}$ эВс/м рассеялся на свободном электроне, в результате чего импульс электрона стал $p_2 = 7,5 \times 10^{-4}$ эВс/м. Найти: а) угол, под которым рассеялся фотон; б) кинетическую энергию электрона.

25. Рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 0,2$ пм испытывают комптоновское рассеяние. При этом изменение длины волны этих лучей при рассеянии равно $\Delta\lambda = 0,024$ пм. Найти энергию электрона отдачи.

26. Фотон с импульсом $p_1 = 1,02$ МэВ/с, где c – скорость света, рассеялся на свободном электроне, в результате чего импульс фотона стал $p_2 = 0,225$ МэВ/с. Найти: а) угол, под которым рассеялся фотон; б) кинетическую энергию электрона.

27. Фотон с энергией 0,15 МэВ рассеялся на свободно покоящемся электроне, в результате чего его длина волны изменилась на $\Delta\lambda = 0,015$ пм. Найти импульсы падающего и рассеянного фотонов.

28. В результате эффекта Комтона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол 90° . Энергия рассеянного фотона равна 0,4 Мэв. Определить энергию и длину волны фотона до рассеяния.

29. Фотон с энергией 0,50 МэВ рассеялся на свободном электроне под углом 60° . Найти: а) энергию рассеянного фотона; б) импульс электрона отдачи.

30. Фотон с длиной волны $\lambda = 6,0 \times 10^{-12}$ м рассеялся на свободном электроне. Частота рассеянного фотона $\omega = 2,2 \times 10^{20}$ с $^{-1}$. Найти кинетическую энергию электрона отдачи.

31. Фотон с длиной волны $\lambda = 700$ нм рассеивается под прямым углом на свободном покоящемся электроне. Определить: а) какую долю первоначальной энергии теряет при этом фотон; б) какую скорость приобретает электрон?

32. Определить кинетическую энергию, приобретаемой первоначально покоившейся частицей массой m при рассеянии на ней под углом θ фотона с энергией E .

33. Длина волны λ фотона равна комптоновской длине электрона λ_c . Определить энергию E и импульс p фотона.

34. Фотон с энергией 1 МэВ рассеялся на свободно покоящемся электроны. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, в результате рассеяния длина волны фотона изменилась на 25 %.

35. Гамма-квант с энергией $E = 1$ МэВ рассеивается под прямым углом на свободно покоившемся протоне. Определить кинетическую энергию и скорость протона после такого соударения.

36. Пусть E_0 – начальная энергия фотонов, испытывающих комптоновское рассеяние. Показать, что кинетическая энергия электрона отдачи определяется выражением:

$$W^k = \frac{(1 - \cos\theta)E_0}{1 - \cos\theta + mc^2/E_0}.$$

37. Найти длину волны рентгеновского излучения, если максимальная кинетическая энергия комптоновских электронов равна 0,19 МэВ.

38. Вычислить энергию, частоту и импульс рентгеновских лучей, длина волны которых равна 41,6 пм.

39. Вычислить частоту, длину волны и импульс фотона, энергия которого равна энергии покоя электрона.

40. На какую величину уменьшится скорость атома натрия после того, как он поглотит фотон с длиной волны 589 нм при лобовом столкновении?

41. Комптоновской длиной волны частицы массы m называется величина $\lambda_c = h/mc$. а) Вычислите комптоновскую длину волны электрона и протона. б) Чему равна энергия фотона, длина волны которого равна комптоновской длине волны электрона? Протона? в) Показать в общем случае, что энергия фотона, длина волны которого равна комптоновской длине волны частицы, равна энергии покоя этой частицы.

42. Фотоны с длиной волны 2,17 пм рассеиваются на свободных электронах. Найти длину волны фотонов, рассеянных под углом 35° и 115° .

43. Рентгеновские лучи с энергией 511 кэВ испытывают комптоновское рассеяние на электронах в алюминиевом образце. Найти: а) длину волны падающего излучения; б) длину волны

рассеянного излучения; в) энергию рассеянных фотонов. Угол рассеяния равен $72,0^\circ$.

44. Показать, что относительная доля энергии $\Delta E/E$, теряемой фотоном при комптоновском рассеянии, определяется выражением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\theta).$$

45. Какое относительное увеличение длины волны фотона приведет к 75 % потере энергии фотона при комптоновском рассеянии?

46. Найти максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии фотонов на свободных протонах.

47. Рентгеновские лучи с энергией 6,2 кэВ испытывают комптоновское рассеяние на электронах в образце углерода. При этом их частота изменилась на 0,010 %. Найти: а) под каким углом наблюдается это рассеяние; б) величину кинетической энергии, переданной электрону.

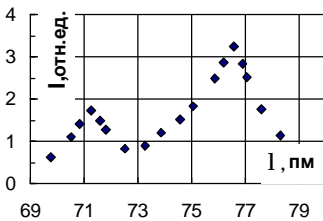
48. Фотон с длиной волны $\lambda = 9,77$ пм рассеивается на электро-не под углом 180° . Найти: а) изменение длины волны фотона; б) изменение энергии фотона; в) кинетическую энергию электрона.

49. Вычислить относительное изменение энергии фотона при комптоновском рассеянии под прямым углом для следующих спектральных областей: а) микроволновый диапазон, $\lambda = 3,00$ см; б) видимый диапазон, $\lambda = 500$ нм; в) рентгеновский диапазон, $\lambda = 0,10$ нм; г) гамма-лучи, $\lambda = 1,30$ пм. Какие выводы о важности эффекта Комптона в этих различных областях электромагнитного спектра можно сделать, исходя только из величины энергетических потерь при одном акте комптоновского рассеяния?

50. На какой угол должен рассеяться на свободном электро-не фотон с энергией 215 кэВ, чтобы он потерял 10,0 % своей энергии?

51. Найти максимальную кинетическую энергию комптоновских электронов, выбитых из тонкой медной фольги рентгеновскими лучами с энергией 17,5 кэВ.

52. Излучение с длиной волны $\lambda = 71,4$ пм рассеивается на мишени из графита. На рисунке показана зависимость интенсив-



К задаче 52

ности излучения, рассеянного под некоторым углом θ , от длины волны рассеянного излучения. Определить из рисунка, под каким углом рассеяния наблюдается такой спектр.

53. Какова длина волны λ рентгеновского излучения, если наибольшая кинетическая энергия комптоновских электронов $T_{\max} = m_e c^2$, где m_e – масса электрона?

54. Гамма-квант с энергией $\epsilon = 2m_e c^2$, где m_e – масса электрона, рассеивается на свободно покоящемся электроне и в результате теряет половину своей первоначальной энергии. Вычислить угол разлета α гамма-кванта и электрона после рассеяния.

55. Фотон рассеивается на свободно покоящемся электроне и теряет половину своей первоначальной энергии. При этом рассеянный фотон и электрон отдачи разлетаются под прямым углом. Найти энергию фотона до рассеяния.

56. Фотон с энергией 0,50 МэВ рассеялся на свободном электроне под углом 90° . Вычислить отношение импульсов p'/p фотона после и до рассеяния.

57. Фотон с энергией ϵ рассеялся на свободно покоящемся электроне, в результате чего его длина волны возросла в n раз. Найти импульс электрона отдачи.

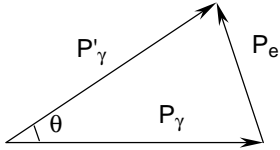
58. Рентгеновский квант с длиной волны λ рассеялся под углом θ на свободно покоящемся электроне. Определить кинетическую энергию электрона отдачи.

59. После комптоновского рассеяния на свободно покоящемся электроне первоначальная длина волны λ фотона возросла в n раз. Найти кинетическую энергию электрона отдачи.

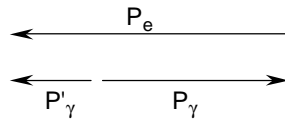
60. Фотон с энергией 511 кэВ рассеялся на свободном электроне под углом 90° . Вычислить отношение p_e'/p_γ импульса электрона после рассеяния к импульсу фотона до рассеяния.

61. Фотон с длиной волны λ рассеялся на движущемся свободном электроне, после чего электрон остановился, а фотон отклонился от первоначального направления движения на угол θ . Импульсная диаграмма рассеяния показана на рисунке. Найти изменение длины волны фотона $\Delta\lambda$.

62. Фотон с энергией ϵ рассеялся на движущемся свободном электроне, после чего электрон остановился, а фотон стал двигаться в обратном направлении. Импульсная диаграмма рассеяния показана на рисунке. Найти энергию ϵ' рассеянного фотона.



К задаче 61



К задаче 62

63. После комптоновского рассеяния на свободно покоящихся электронах под углом $\theta = \pi/2$, длина волны фотонов возросла вдвое. Какую энергию ϵ имеют при этом фотоны?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Работа выхода электронов из металла

Металл	A, эВ	Металл	A, эВ	Металл	A, эВ
Алюминий	3,74	Калий	2,15	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74
Магний	3,46	Ртуть	4,52	Рубидий	2,13
Уран	3,74	Кальций	2,76		

Некоторые внесистемные единицы

$$1 \text{ \AA} (\text{ангстрем}) = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ эВ} (\text{электронвольт}) = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Дж}$$

Некоторые фундаментальные постоянные

$$\text{Скорость света в вакууме } c = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$$

$$\text{Гравитационная постоянная } \gamma = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$$

$$\text{Ускорение свободного падения } g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$\text{Постоянная Авогадро } N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Масса электрона } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\text{Масса протона } m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\text{Постоянная Планка } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\text{Постоянная Стефана-Больцмана } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$$\text{Постоянная закона смещения Вина } b = 0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$$

$$\text{Комптоновская длина волны электрона } \lambda_c = 2,426 \times 10^{-12} \text{ м}$$

Таблица вариантов

Вариант	Номера задач			
	Излучение	Давление света	Фотоэффект	Эффект Комптона
1	31, 96, 110	24, 26, 36	16, 47, 22	20, 50, 16
2	2, 58, 31	18, 33, 16	61, 9, 55	38, 32, 28
3	45, 95, 56	47, 24, 31	9, 14, 17	10, 16, 33
4	71, 42, 37	41, 8, 30	9, 22, 55	1, 17, 7
5	73, 28, 91	28, 17, 37	62, 55, 14	60, 9, 40
6	109, 2, 89	26, 27, 16	3, 36, 60	6, 29, 4
7	102, 16, 44	8, 14, 29	60, 11, 67	49, 22, 3
8	1, 34, 46	45, 36, 15	58, 26, 8	26, 62, 12
9	60, 78, 70	32, 49, 22	33, 9, 56	52, 39, 20
10	14, 68, 49	14, 41, 11	28, 15, 41	16, 21, 13
11	24, 113, 79	6, 13, 2	31, 39, 19	40, 17, 29
12	16, 30, 106	28, 47, 24	7, 66, 29	7, 9, 18
13	9, 82, 35	3, 39, 35	60, 61, 1	23, 26, 9
14	109, 15, 92	51, 47, 56	37, 61, 59	59, 27, 55
15	47, 89, 9	37, 40, 15	53, 41, 55	13, 32, 53
16	117, 50, 103	13, 26, 6	47, 71, 15	8, 45, 18
17	16, 7, 83	44, 22, 7	58, 54, 6	7, 26, 39
18	61, 106, 96	23, 35, 39	13, 36, 51	45, 17, 18
19	85, 44, 48	13, 48, 34	62, 66, 50	42, 17, 23
20	71, 103, 43	51, 25, 44	8, 14, 42	19, 31, 11
21	57, 35, 99	28, 35, 19	68, 28, 13	32, 41, 36
22	107, 117, 8	45, 34, 40	70, 18, 49	38, 30, 24
23	53, 69, 23	25, 31, 19	18, 71, 65	25, 49, 46
24	71, 95, 1	29, 25, 40	67, 26, 18	58, 27, 9
25	71, 41, 79	50, 55, 15	1, 5, 7	56, 37, 15
26	8, 24, 28	30, 26, 44	6, 44, 15	62, 3, 45
27	75, 80, 65	39, 26, 7	38, 32, 53	27, 59, 34
28	65, 87, 93	9, 16, 45	46, 69, 54	59, 1, 52
29	73, 39, 67	3, 50, 29	50, 16, 3	22, 6, 33
30	38, 66, 90	2, 43, 38	58, 32, 27	44, 16, 45
31	50, 96, 59	38, 4, 46	18, 49, 2	31, 29, 38
32	109, 50, 4	30, 17, 28	20, 49, 65	34, 35, 40
33	18, 27, 88	53, 8, 42	25, 43, 68	57, 42, 6
34	85, 107, 74	26, 14, 5	59, 16, 32	2, 57, 16
35	98, 10, 82	54, 40, 13	20, 46, 37	35, 13, 25
36	66, 98, 109	46, 24, 2	45, 25, 33	40, 49, 25
37	5, 82, 116	3, 29, 14	70, 40, 64	16, 58, 47
38	1, 16, 7	35, 42, 51	22, 5, 19	36, 41, 14
39	17, 74, 49	48, 55, 42	31, 9, 2	15, 54, 1
40	77, 52, 7	26, 20, 40	1, 24, 43	10, 34, 21
41	102, 64, 85	38, 13, 53	22, 72, 60	47, 41, 23
42	111, 12, 118	44, 4, 21	28, 23, 45	3, 10, 48
43	41, 73, 110	6, 46, 43	28, 8, 21	14, 30, 27

Продолжение таблицы вариантов

Вариант	Номера задач			
	Излучение	Давление света	Фотоэффект	Эффект Комптона
44	56, 65, 84	32, 19, 39	34, 54, 7	15, 9, 5
45	37, 32, 41	15, 9, 56	45, 35, 54	51, 57, 25
46	17, 50, 11	31, 42, 35	12, 72, 16	38, 60, 61
47	83, 96, 80	36, 54, 6	65, 52, 30	30, 40, 61
48	28, 79, 63	19, 34, 8	37, 52, 65	50, 39, 44
49	9, 1, 76	3, 16, 35	33, 8, 4	42, 24, 5
50	15, 67, 18	42, 31, 12	5, 33, 13	3, 22, 19
51	110, 48, 54	49, 30, 22	39, 60, 18	50, 32, 6
52	36, 46, 109	10, 54, 1	31, 43, 20	54, 45, 51
53	2, 64, 39	53, 23, 8	28, 30, 59	32, 1, 51
54	118, 36, 80	55, 39, 31	66, 21, 32	35, 8, 16
55	86, 99, 45	11, 45, 22	24, 52, 33	39, 31, 17
56	68, 29, 47	11, 45, 58	46, 70, 54	17, 40, 25
57	90, 47, 102	51, 42, 21	57, 31, 12	14, 6, 26
58	12, 34, 66	49, 10, 23	25, 52, 2	5, 35, 66
59	98, 64, 117	12, 31, 22	4, 32, 17	19, 38, 27
60	4, 35, 44	53, 16, 34	68, 78, 35	40, 16, 27
61	64, 84, 92	51, 30, 15	48, 68, 7	28, 33, 43
62	31, 102, 3	27, 11, 48	8, 58, 28	29, 38, 18
63	99, 81, 101	53, 13, 63	12, 30, 50	10, 25, 37
64	45, 57, 12	27, 37, 48	39, 13, 44	50, 19, 2
65	47, 54, 68	39, 45, 56	59, 63, 19	55, 32, 65
66	56, 99, 27	3, 24, 56	19, 40, 7	52, 6, 12
67	91, 53, 46	54, 36, 47	4, 48, 12	35, 11, 28
68	31, 4, 16	30, 6, 20	46, 66, 5	1, 16, 21
69	65, 71, 58	19, 23, 38	70, 14, 48	42, 31, 65
70	49, 108, 24	28, 43, 51	6, 14, 48	62, 17, 6
71	103, 21, 79	9, 56, 32	51, 20, 69	38, 58, 3
72	5, 86, 46	56, 39, 34	19, 54, 28	12, 1, 16
73	7, 86, 107	9, 36, 3	21, 14, 67	45, 36, 55
74	87, 59, 34	18, 41, 39	65, 25, 60	15, 62, 1
75	52, 89, 33	2, 50, 27	13, 43, 30	8, 23, 47
76	66, 32, 18	20, 37, 15	44, 40, 66	12, 2, 23
77	68, 18, 107	37, 44, 29	31, 69, 48	15, 60, 25
78	54, 38, 49	7, 24, 55	58, 20, 2	23, 62, 70
79	42, 9, 108	49, 59, 25	65, 20, 57	61, 28, 39
80	46, 112, 62	14, 21, 36	24, 55, 46	17, 34, 26
81	70, 53, 88	13, 51, 56	48, 39, 17	32, 57, 44
82	53, 41, 63	31, 55, 6	23, 4, 53	51, 36, 61
83	93, 110, 54	43, 26, 15	31, 64, 57	45, 20, 38
84	14, 100, 55	38, 43, 30	43, 20, 30	11, 24, 53
85	53, 25, 93	18, 10, 49	31, 67, 58	4, 18, 38

Окончание таблицы вариантов

Вариант	Номера задач			
	Излучение	Давление света	Фотоэффект	Эффект Комптона
86	57, 36, 87	29, 38, 54	17, 57, 29	14, 45, 18
87	107, 3, 73	48, 23, 55	39, 67, 1	9, 35, 41
88	83, 1, 99	48, 56, 10	7, 38, 20	36, 1, 62
89	70, 84, 67	44, 54, 35	70, 61, 15	25, 35, 42
90	57, 16, 77	11, 31, 47	34, 46, 70	20, 37, 13
91	105, 7, 21	20, 11, 46	9, 71, 81	5, 62, 27
92	115, 45, 85	18, 35, 48	7, 24, 56	3, 62, 41
93	16, 11, 68	11, 29, 55	60, 38, 18	37, 42, 28
94	97, 16, 65	30, 13, 53	47, 11, 58	24, 62, 59
95	2, 73, 67	21, 31, 27	40, 25, 33	23, 5, 52
96	9, 94, 50	53, 4, 15	61, 53, 38	32, 44, 3
97	21, 114, 77	52, 46, 36	20, 5, 44	49, 36, 16
98	64, 57, 39	47, 2, 56	39, 44, 53	5, 19, 40
99	45, 77, 25	6, 40, 49	26, 50, 35	17, 29, 7
100	9, 67, 96	27, 42, 46	9, 72, 53	27, 37, 35