

№ 1924

МИСиС

Ю.А. Рахштадт

Физика

Кванты. Строение и физические
свойства вещества

Учебное пособие
Часть 5

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1924

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра физики

Ю.А. Рахштадт

Физика

**Кванты. Строение и физические
свойства вещества**

Учебное пособие
Часть 5

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета

УДК 530.145
P27

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *К.Л. Косырев*
(председатель НМСН *Металлургия*)

Рахштадт Ю.А.

P27 Физика: Кванты. Строение и физические свойства вещества:
Учеб. пособие. Ч. 5. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 160 с.

Учебное пособие состоит из пяти частей, соответствующих пяти разделам курса физики. В пятой части «Кванты. Строение и физические свойства вещества» описываются корпускулярные свойства света и волновые свойства микрочастиц вещества; строение атома; электронное строение кристаллов и их электрические свойства; физическая электроника (полупроводниковые приборы и лазеры); а также субатомное вещество.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению «Металлургия».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 23. Квантовые свойства света.....	5
23.1. Корпускулярно-волновой дуализм света	5
23.2. Тепловое излучение абсолютно черного тела	6
23.3. Гравитационное смещение (эффект Эйнштейна).....	14
23.4. Эффект Комптона.....	15
23.5. Внешний фотоэффект	17
23.6. Давление света	20
Контрольные вопросы.....	21
Примеры решения задач	22
Глава 24. Волновые свойства микрочастиц.....	32
24.1. Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц	32
24.2. Основные принципы квантовой механики.....	36
24.3. Примеры применения соотношений неопределенностей.....	38
24.4. Физический смысл волн де Бройля.....	41
24.5. Движение микрочастицы в одномерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме (в одномерном потенциальном ящике).....	43
Контрольные вопросы.....	46
Примеры решения задач	47
Глава 25. Строение атома	51
25.1. Движение электрона в центрально-симметричном поле в атоме водорода.....	51
25.2. Спектр атома водорода	63
25.3. Многоэлектронные атомы. Рентгеновское характеристическое излучение.....	65
Контрольные вопросы.....	67
Примеры решения задач	68
Глава 26. Строение и физические свойства кристаллов	75
26.1. Агрегатные состояния вещества	75
26.2. Кристаллические твердые тела	76
26.3. Металлические кристаллы.....	83
26.4. Ионные кристаллы.....	85
26.5. Ковалентные кристаллы.....	86
26.6. Электропроводность кристаллов	91
26.7. Понятие о сверхпроводимости.....	95
Контрольные вопросы.....	96

Глава 27. Физическая электроника.....	98
27.1. Понятие работы выхода	98
27.2. Виды электронной эмиссии.....	100
27.3. Полупроводниковый диод	101
27.4. Транзистор.....	106
27.5. Лазеры.....	109
Контрольные вопросы.....	115
Глава 28. Субатомное вещество – ядра и элементарные частицы.....	117
28.1. Возникновение ядерной модели атома.....	117
28.2. Состав и основные характеристики атомных ядер.....	120
28.3. Радиоактивность	122
28.4. Энергия связи и устойчивость ядер	124
28.5. Ядерные реакции	126
28.6. Элементарные частицы	128
28.7. Поколения элементарных частиц.....	134
Контрольные вопросы.....	134
Примеры решения задач	135
Домашние задания.....	138
Приложение	158
Библиографический список.....	159

ГЛАВА 23. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

23.1. Корпускулярно-волновой дуализм света

Свет испускается, распространяется и поглощается в виде корпускул – фотонов, которые являются частицами электромагнитного поля и носителями квантов (порций) энергии. Величина кванта энергии определяется формулой Планка:

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad (23.1)$$

где h – постоянная Планка, называемая *квантом действия*,
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

В ряде задач квантовой оптики и квантовой механики применяется также постоянная Планка, деленная на 2π :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с.}$$

Таблица 23.1

	Фотон как частица материи	Фотон как частица электромагнитного поля
Энергия	Полная энергия $E = mc^2$ Энергия покоя $E_0 = m_0c^2 = 0$	$E = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$
Масса	Масса покоя $m_0 = 0$	$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$
Импульс	$p = \frac{E}{c}$	$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda}$

Как следует из таблицы 23.1, корпускулярные характеристики фотона (E , \vec{p} и m) дополняются волновыми характеристиками (ν , ω и λ), что подтверждает *принцип дополнительности Бора*. Согласно этому принципу, который в физике интерпретируется как проявление диалектического закона единства и борьбы противоположностей, волновые и корпускулярные свойства квантовых процессов следует рассматривать как равноправные, не сводимые друг к другу и одинаково необходимые для понимания этих процессов.

В этом состоит корпускулярно-волновой дуализм света: свет одновременно и электромагнитная волна, и частица. Фотон проявляет вол-

новые свойства при увеличении длины волны, а электромагнитная волна проявляет корпускулярные свойства при уменьшении длины волны.

23.2. Тепловое излучение абсолютно черного тела

Рассмотрим взаимодействие в вакууме двух тел A и B (рис. 23.1), находящихся при температурах T_A и T_B соответственно, в замкнутой и адиабатически изолированной полости. Так как в вакууме нет конвекции, то температура этих тел выравнивается ($T_A = T_B$) только электромагнитным излучением (радиационная теплопередача), т.е. внутри полости существует поле излучения. При отсутствии непосредственного контакта тел нет и теплопроводности. Наступает *тепловое равновесие*.

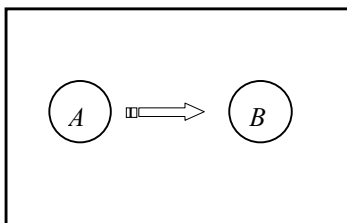


Рис. 23.1. Радиационная теплопередача ($T_A > T_B$)

В состоянии теплового равновесия атомы (молекулы) испускают и поглощают электромагнитное излучение любых длин волн. Такое электромагнитное излучение называется *равновесным тепловым излучением* и подчиняется закону Кирхгофа.

23.2.1. Закон Кирхгофа

Отношение спектральной испускательной способности $E(\omega, T)$ любых тел (в том числе и абсолютно черных) к их спектральной поглощательной способности $A(\omega, T)$ при одинаковых длинах волн и температурах есть величина постоянная, называемая *универсальной функцией Кирхгофа* $f(\omega, T)$:

$$\frac{E_1(\omega, T)}{A_1(\omega, T)} = \frac{E_2(\omega, T)}{A_2(\omega, T)} = \dots = \frac{\varepsilon(\omega, T)}{a(\omega, T)} = \text{const} = f(\omega, T), \quad (23.2)$$

где $\varepsilon(\omega, T)$ и $a(\omega, T)$ – спектральные испускательная и поглощательная способности абсолютно черного тела (АЧТ) соответственно.

Для абсолютно черного тела спектральная поглощательная способность $a(\omega, T) = 1$. Поэтому универсальная функция Кирхгофа

$$f(\omega, T) = \varepsilon(\omega, T). \quad (23.3)$$

В качестве модели абсолютно черного тела можно использовать находящуюся при постоянной температуре замкнутую полость с небольшим отверстием в стенке (проникающее в полость излучение после многократного отражения от стенок полностью не может выйти из нее).

23.2.2. Спектральная испускательная способность АЧТ $\varepsilon(\omega, T)$

График спектральной испускательной способности АЧТ $\varepsilon(\omega, T)$ представлен на рис. 23.2, где согласно формуле Планка

$$\varepsilon(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}. \quad (23.4)$$

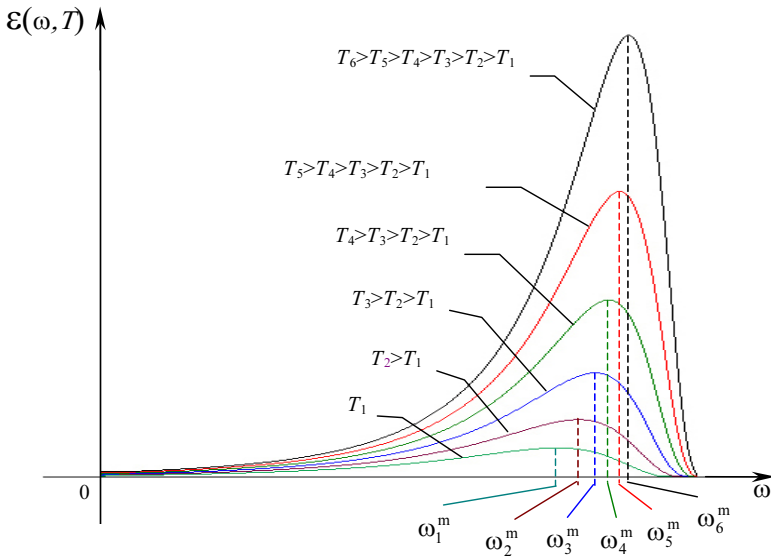


Рис. 23.2. Спектральная испускательная способность АЧТ $\varepsilon(\omega, T)$

23.2.2.1. Закон Стефана – Больцмана

Интегральная испускательная способность АЧТ находится как результат интегрирования функции Планка по всему спектру частот:

$$R_T = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \int_0^\infty \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}, \quad (23.5)$$

где $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$, а следовательно, $dx = \frac{\hbar}{kT} d\omega$. Так как $\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$, то после интегрирования получим закон Стефана – Больцмана:

$$R_T = \sigma T^4. \quad (23.6)$$

23.2.2.2. Закон Вина (закон смещения)

Частота ω^m , соответствующая максимуму спектральной испускательной способности $\varepsilon(\omega, T)$, находится из условия

$$\left[\varepsilon(\omega, T) \right]_{\omega}^{\prime} = \left[\frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \right]_{\omega}^{\prime} = 0.$$

В результате дифференцирования получим:

$$3 \left(e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1 \right) = \frac{\hbar\omega}{kT} e^{\frac{\hbar\omega}{kT}}. \quad (23.7)$$

Если ввести обозначение $x = \frac{\hbar\omega}{kT}$, то уравнение можно привести к виду

$$(3 - x) = 3e^{-x}.$$

Это трансцендентное уравнение проще всего решить графически (рис. 23.3), построив графики функций:

$$\begin{cases} y = 3 - x, \\ y = 3e^{-x}. \end{cases}$$

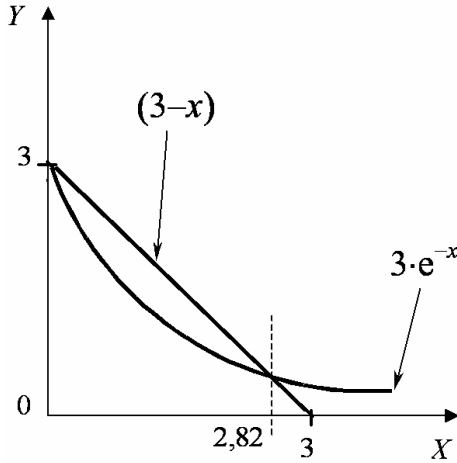


Рис. 23.3. К решению трансцендентного уравнения

Решение уравнения – абсцисса точки пересечения этих двух графиков:

$$x = \frac{\hbar\omega^m}{kT} = 2,82.$$

Отсюда следует вывод: частота излучения, соответствующая максимуму спектральной испускательной способности АЧТ, связана с соответствующей температурой АЧТ формулой закона Вина:

$$\frac{\omega^m}{T} = b^* = 3,69 \cdot 10^{11} \text{ К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (23.8)$$

23.2.2.3. Второй закон Вина

Максимальная спектральная испускательная способность АЧТ:

$$\varepsilon(T, \omega^m) = \frac{\hbar(\omega^m)^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega^m}{kT}} - 1} = \frac{\hbar(b^*)^3 T^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar b^*}{k}} - 1} = 9,55 \cdot 10^{-20} T^3 \text{ (Вт/м}^2\text{)/с.} \quad (23.9)$$

23.2.3. Спектральная испускательная способность АЧТ $\varepsilon(\lambda, T)$

Интегральная испускательная способность не зависит от формы представления функции спектральной испускательной способности АЧТ. Площади под кривыми зависимости спектральной испускательной способности от λ (рис. 23.4) и от ω (см. рис. 23.2) между собой равны, так как каждая из них равна интегральной испускательной способности АЧТ при данной температуре:

$$R_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\omega, T) d\omega = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda. \quad (23.10)$$

Поэтому

$$\varepsilon(\omega, T) d\omega = \varepsilon(\lambda, T) d\lambda, \quad (23.11)$$

и тогда спектральная (дифференциальная) испускательная способность АЧТ определяется формулой Планка:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon(\omega, T) \frac{d\omega}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{h \frac{c}{\lambda}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) = -\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}. \quad (23.12)$$

Знак "-" показывает, что с возрастанием частоты ω уменьшается длина волны λ . Поэтому формулу Планка обычно записывают в виде

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}. \quad (23.13)$$

Интегральная испускательная способность (или энергетическая светимость) АЧТ

$$R_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda$$

увеличивается с увеличением температуры T , а длина волны λ^m , соответствующая максимуму спектральной испускательной способности, уменьшается с повышением температуры (рис. 23.4).

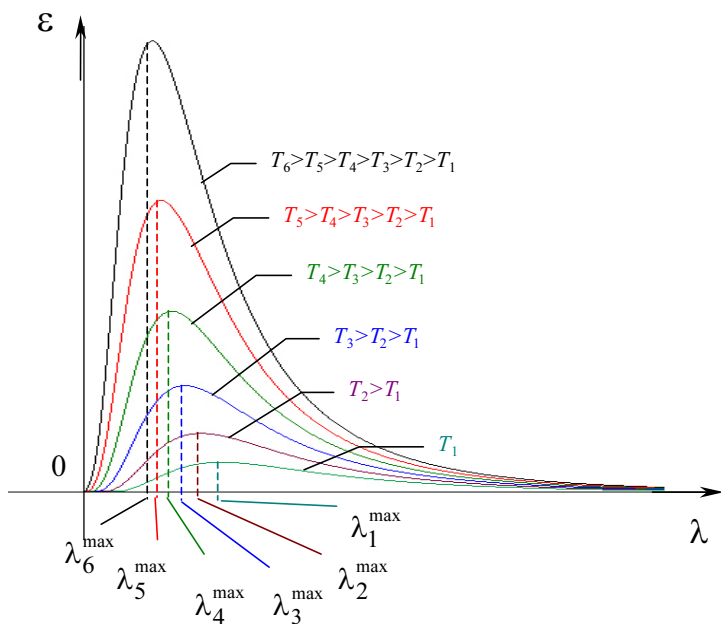


Рис. 23.4. Спектральная испускающая способность АЧТ $\varepsilon(\lambda, T)$

23.2.3.1. Закон Стефана – Больцмана

Интегральная испускающая способность АЧТ находится как результат интегрирования формулы Планка (23.12) по всем длинам волн:

$$R_T = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = -2\pi hc^2 \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{-5} d\lambda}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} = 2\pi hc^2 \left(\frac{hc}{kT} \right)^{-4} \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}, \quad (23.14)$$

где $x = \frac{hc}{kT\lambda}$;

$$dx = -\frac{kT}{hc} x^2 d\lambda.$$

Так как

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15},$$

то

$$R_r = \sigma T^4 \quad (23.15)$$

– закон Стефана – Больцмана,
где σ – постоянная Стефана – Больцмана,

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

23.2.3.2. Закон Вина (закон смещения)

Длина волны λ^m , соответствующая максимуму спектральной испускательной способности $\varepsilon(\lambda, T)$, находится из условия

$$[\varepsilon(\lambda, T)]_{\lambda} ' = \left[\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \right]_{\lambda} ' = 0.$$

В результате дифференцирования получим

$$\frac{5}{\lambda^6} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} = \frac{1}{\lambda^5} \frac{\frac{hc}{kT\lambda^2} e^{\frac{hc}{kT\lambda}}}{\left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)^2}, \quad (23.16)$$

$$5 = \frac{1}{\lambda} \frac{e^{\frac{hc}{kT\lambda}}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \frac{hc}{kT}.$$

Если ввести обозначение: $x = \frac{hc}{kT\lambda}$, то это уравнение можно записать

в виде:

$$5 = \frac{x e^x}{e^x - 1}$$

или

$$5 - x = 5e^{-x}.$$

Полученное уравнение является трансцендентным, которое проще всего решить графически (рис. 23.5), построив графики функций

$$\begin{cases} y = 5 - x, \\ y = 5e^{-x}. \end{cases}$$

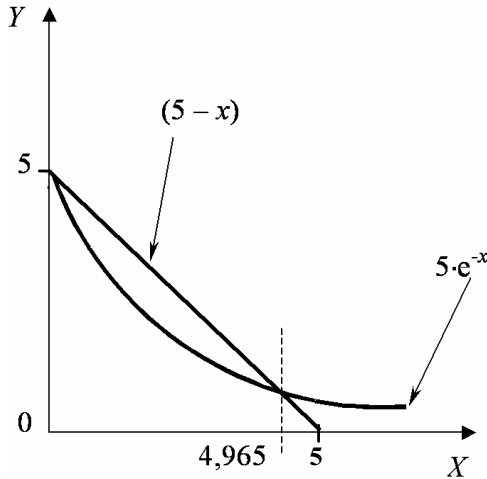


Рис. 23.5. К решению трансцендентного уравнения

Решением уравнения будет абсцисса точки пересечения этих двух графиков:

$$x = \frac{hc}{kT\lambda^m} = 4,965.$$

Отсюда следует вывод: длина волны, соответствующая максимуму спектральной испускательной способности АЧТ, связана с соответствующей температурой АЧТ формулой закона Вина:

$$T\lambda^m = \frac{hc}{4,965k}.$$

Закон Вина:

$$T\lambda^m = b, \tag{23.17}$$

где b – постоянная Вина, $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ К·м.

23.2.3.3. Второй закон Вина

Максимальная спектральная испускательная способность АЧТ:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda^m, T) &= 2\pi hc^2 \frac{1}{(\lambda^m)^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda^m}} - 1} = 2\pi hc^2 \frac{T^5}{b^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kb}} - 1} = \\ &= 1,29 \cdot 10^{-5} T^5 \text{ (Вт/М}^2\text{)/М.} \end{aligned} \quad (23.18)$$

23.3. Гравитационное смещение (эффект Эйнштейна)

Для замкнутой системы «звезда массой M – фотон массой m » (рис. 23.6) выполняется закон сохранения энергии:

$$E_\phi + U_{\text{грав}} = \text{const}, \quad (23.19)$$

где E_ϕ – энергия фотона;

$U_{\text{грав}}$ – потенциальная энергия взаимодействия фотона со звездой.

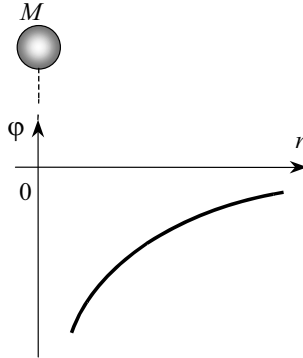


Рис. 23.6. К эффекту Эйнштейна

В развернутом виде закон сохранения энергии может быть записан так:

$$\hbar\omega_1 - \gamma \frac{Mm_1}{r} = \hbar\omega_2 - \gamma \frac{Mm_2}{r} \quad (23.20)$$

или

$$\hbar\omega_1 + \phi_1 m_1 = \hbar\omega_2 + \phi_2 m_2, \quad (23.21)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – гравитационные потенциалы.

Можно считать, что $m_1 \approx m_2 = m$, так как $\omega_1 \approx \omega_2$ и $d\omega_1 \ll \omega_{1,2}$. Тогда уравнение закона сохранения энергии запишем в виде

$$-\hbar d\omega = md\varphi, \quad (23.22)$$

где $m = \frac{\hbar\omega}{c^2}$.

Если фотон удаляется от звезды, т.е. выходит из поля тяготения, то $dr > 0$ и $d\varphi > 0$, а поэтому $d\omega < 0$. Электромагнитная энергия фотона переходит в его гравитационную энергию, длина волны фотона становится больше – наблюдается так называемое *красное гравитационное смещение*.

23.4. Эффект Комптона

Эффект Комптона заключается в рассеянии фотонов на частицах вещества (рис. 23.7), причем в рассеянном излучении наблюдаются излучения с первоначальной длиной волны и с *большой* длиной волны. Рассмотрим рассеяние γ -фотонов (или фотонов рентгеновского излучения) на слабо связанных электронах как абсолютно упругое взаимодействие двух тел.

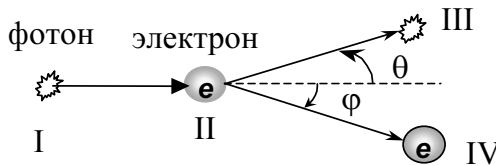


Рис. 23.7. Эффект Комптона:
 θ – угол рассеяния фотона; φ – угол отдачи электрона

Энергия и импульс фотона и электрона до взаимодействия:

$$\begin{aligned} \text{I. } E &= \hbar\omega, \quad \vec{p}_\phi = \hbar\vec{k}; \\ \text{II. } E_e &= m_0c^2, \quad \vec{p}_e = 0. \end{aligned} \quad (23.23)$$

Энергия и импульс фотона и электрона после взаимодействия:

$$\begin{aligned} \text{III. } E' &= \hbar\omega', \quad \vec{p}'_\phi = \hbar\vec{k}'; \\ \text{IV. } E'_e &= mc^2, \quad \vec{p}_e = m\vec{v}, \end{aligned} \quad (23.24)$$

где $m = \gamma m_0$.

Здесь γ – релятивистский фактор.