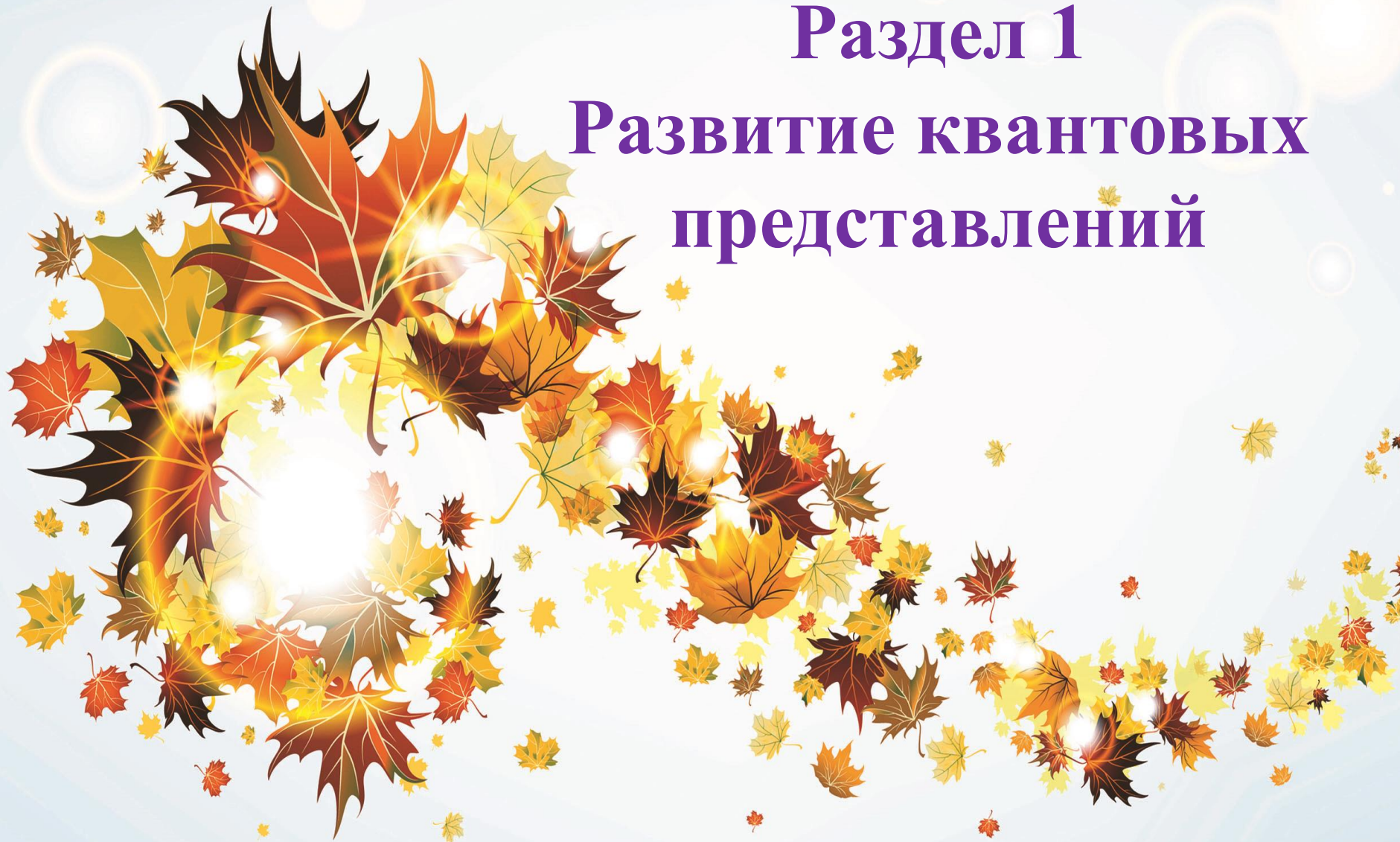


**Добро пожаловать
в «Физику атома
и атомных явлений»!**



Раздел 1

Развитие квантовых представлений

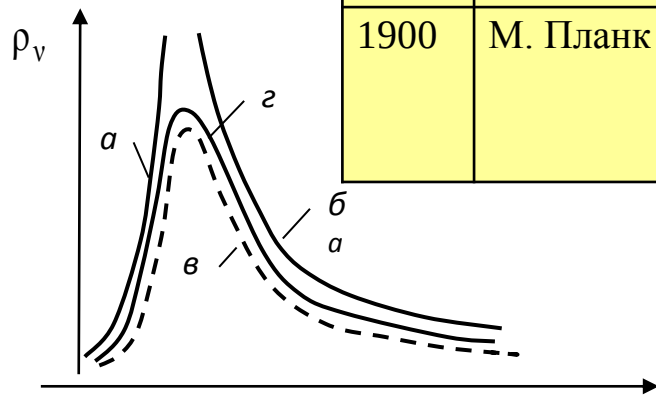


Тема 2

Квантовые свойства электромагнитного излучения

- 1. Спектральное распределение энергии равновесного излучения. Гипотеза квантов Планка*
- 2. Эмпирические законы внешнего фотоэффекта*
- 3. Гипотеза квантов Эйнштейна, уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта*
- 4. Эффект Комптона и его объяснение на основе квантовых представлений*

Спектральное распределение энергии равновесного излучения



a – формула Рэля – Джинса; b – формула Вина; $в$ – экспериментальное распределение; $г$ – формула Планка

**Распределение спектральной плотности энергии
равновесного излучения**

1896	В. Вин (нем.)	$\rho_v = C_1 v^3 \exp(-C_2 v/T)$	При $v \rightarrow 0$ $\rho_v \rightarrow \infty$
1900	Дж. У. Рэлей (англ.)	$\rho_v = \frac{8\pi v^2}{c^3} kT$	При $v \rightarrow \infty$ $\rho_v \rightarrow \infty$; УФ катастрофа
1905	Дж. Джинс (англ.)		
1900	М. Планк (нем.)	$\rho_v = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{hv/kT} - 1}$	Соответствие экспериментальным данным

Гипотеза квантов Планка

14 декабря 1900 года – начало становления квантовой физики

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \langle \varepsilon \rangle$$

М. Планк : «...следует найти вероятность W того, что все N резонаторов вместе обладают колебательной энергией U_N »... «Для этого необходимо представлять себе энергию U_N не в виде непрерывной, неограниченно делимой величины, а в виде величины дискретной, состоящей из целого числа конечных равных частей» (элементов энергии, квантов)

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 + n h \nu, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

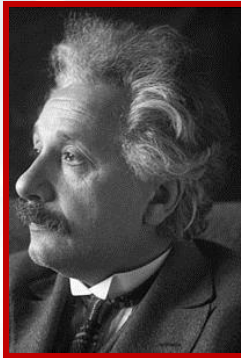
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu / kT} - 1}$$

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu / kT} - 1}$$

$h = 6,626\,069\,57 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка

Макс
(Р
23.0
04.1
НП

Гипотеза Эйнштейна о квантовании электромагнитного излучения



В 1905 году А. Эйнштейн предположил:

энергия электромагнитного излучения «не распределяется непрерывным образом в пространстве, а складывается из конечного числа локализованных квантов энергии, которые движутся как неделимые и поглощаются или возникают только целиком».

А. Эйнштейн
(нем.)
14.03.1879 –
18.04.1955
НП 1921

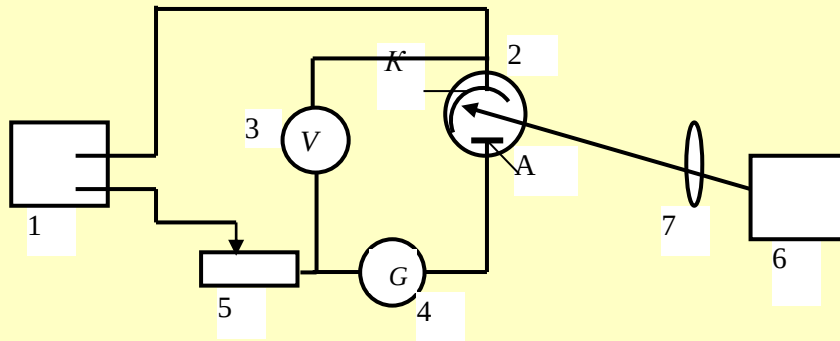
По Эйнштейну, квант света имеет энергию $E_f = h\nu$,
где ν – частота излучения.

На основе квантовых представлений об излучении Эйнштейн нашёл теоретическое обоснование ряда закономерностей, необъяснимых в рамках классической физики: правила Стокса для люминесценции, закономерностей фотоэффекта и фотоионизации газов, эффекта Комптона и др. Развитие данных идей привело Эйнштейна к концепции **корпускулярно-волнового дуализма**: наличия у электромагнитного излучения свойств, присущих как волнам, так и частицам.

Эмпирические законы внешнего фотоэффекта

Внешним фотоэффектом называют явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием электромагнитного излучения (1887, Г.Р. Герц).

Внутренний фотоэффект состоит в увеличении концентрации свободных носителей заряда в веществе под действием электромагнитного излучения.

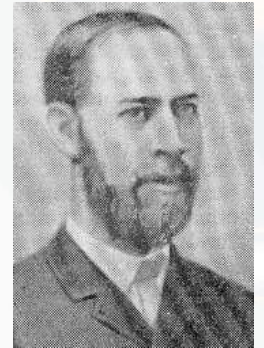


1 – стабилизированный источник напряжения;

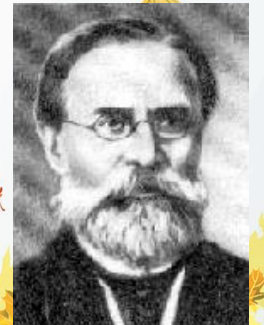
2 – вакуумный фотоэлемент; 3 – вольтметр; 4 – микроамперметр;

5 – реостат; 6 – монохроматор; 7 – конденсор

Схема установки для экспериментального исследования внешнего фотоэффекта

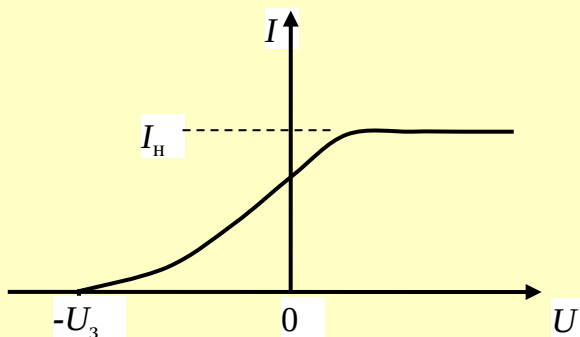


ГЕРЦ Генрих Рудольф
(22.02.1857—1.01.1894)



СТОЛЕТОВ
Александр Григорьевич
(10.08.1839—27.05.1896)

Эмпирические законы внешнего фотоэффекта (1888, А.Г. Столетов)



Вольтамперная характеристика
вакуумного фотоэлемента

1. Сила фототока насыщения (при прочих равных условиях) прямо пропорциональна падающему световому потоку.
2. Фотоэффект наблюдается только при освещении фотокатода излучением, частота которого не менее частоты *красной границы* фотоэффекта (т.е. при $\nu \geq \nu_0$, или в шкале длин волн при $\lambda \leq \lambda_0$).
3. Распределение фотоэлектронов по начальным значениям кинетической энергии не зависит от величины светового потока.
4. Максимальная начальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты излучения:
$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = a + b\nu$$
При этом числовые значения постоянной b одинаковы для всех веществ, а постоянной a — различны.
5. Фотоэффект — явление практически безынерционное.

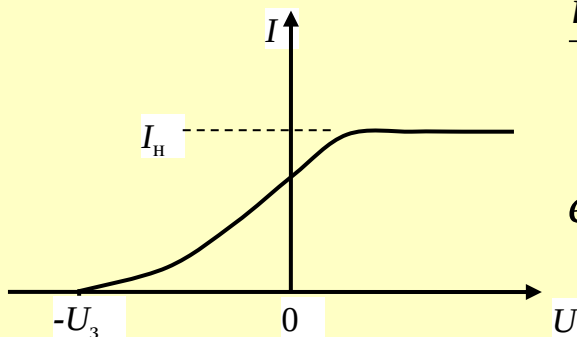
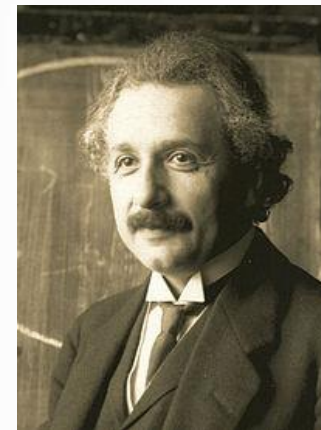
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта



$$h\nu = A_1 + A_2 + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}$$

Красная граница фотоэффекта ν_0
определяется из условия

$$h\nu_0 = A_1 + A_2.$$



Вольтамперная характеристика
вакуумного фотоэлемента

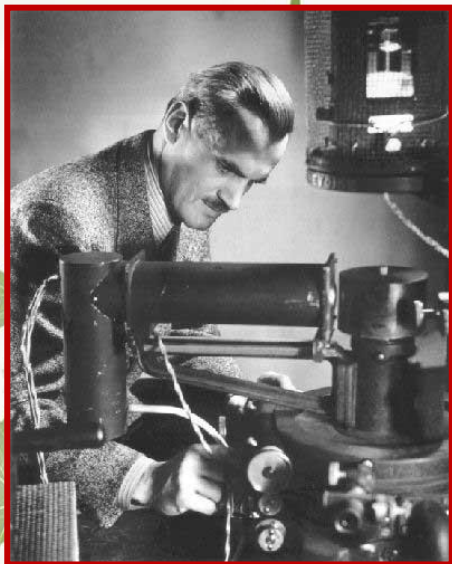
$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = a + b\nu$$

$$eU_3 = h\nu - h\nu_0$$

Альберт Эйнштейн
14.03.1879–18.04.1955

Нобелевская премия
по физике за 1921
(присуждена в 1922)
за теорию фотоэффекта
и другие работы
в области
теоретической физики

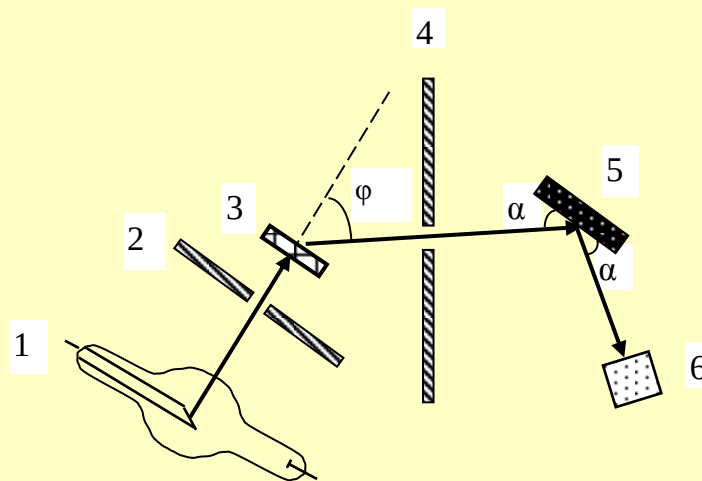
Эффект Комптона – изменение длины волны жесткого рентгеновского излучения при его рассеянии веществом



Комптоновское смещение

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \varphi) = 2\Lambda_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

Артур Холли Комптон
(10.09.1892–15.03.1962)
НП 1927 – «за открытие
эффекта, названного его
именем» (совместно
с Чарльзом Вильсоном)



**Схема экспериментальной установки
для исследования явления Комптона**

Описание эффекта Комптона (А. Комптон, П. Дебай, 1922–1923)

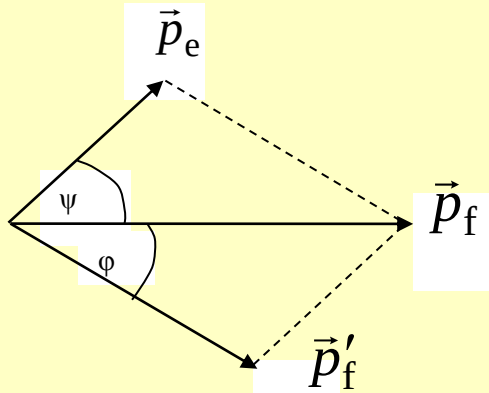


Иллюстрация к закону сохранения импульса для системы «фотон – электрон»

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) = 2\Lambda_0 \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\Lambda_0 = \frac{h}{m_0 c}$$

- КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА
волны электрона
соответствует фотону,
энергия которого равна
энергии покоя электрона

$$\varepsilon_f + \varepsilon_0 = \varepsilon'_f + \varepsilon_e$$

$$\vec{p}_f = \vec{p}'_f + \vec{p}_e$$

$$\varepsilon_f = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

$$\varepsilon_0 = m_0 c^2$$

До рассеяния

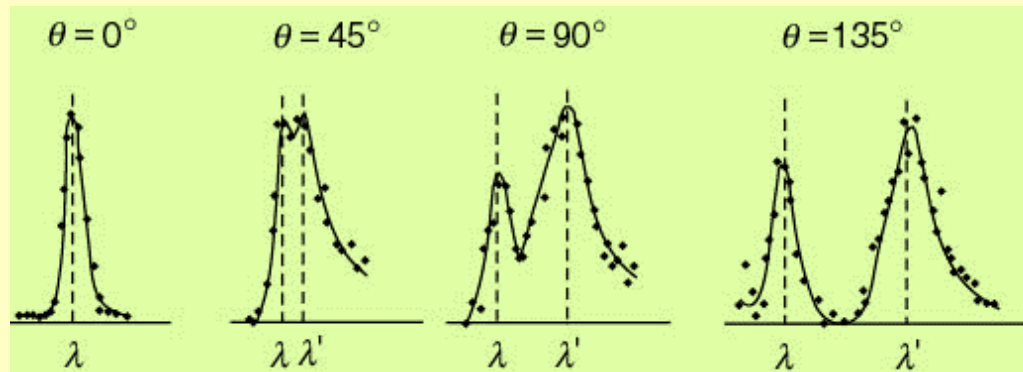
$$\varepsilon'_f = h\nu' = h \frac{c}{\lambda'}$$

$$p'_f = \frac{h}{\lambda'}$$

$$\varepsilon_e = \sqrt{m_0^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

После рассеяния

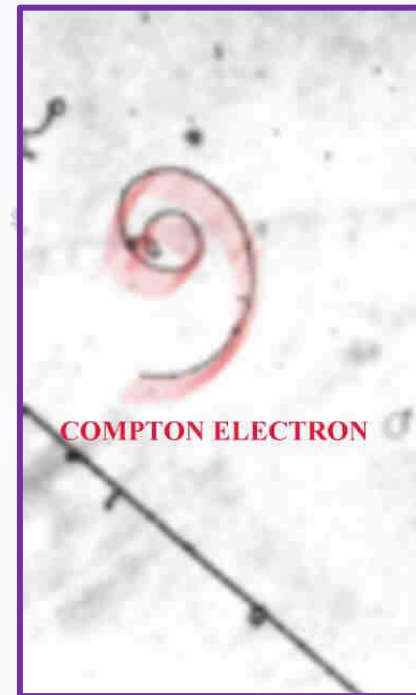
Особенности эффекта Комптона



1. Величина комптоновского смещения зависит от угла рассеяния и не зависит от природы вещества.
2. При увеличении зарядового числа ядра атома рассеивающего вещества интенсивность несмещенной составляющей растет, а смещенной – уменьшается.
3. Рассеянный фотон и электрон отдачи появляются практически одновременно (1925 – опыты **В. Боте** (метод совпадений) и **Г. Гейгера, А.Комптона и А. Саймона**).
4. Электрон отдачи – релятивистская частица (**Д. С. Скобельцын**, опыты 1923-1927).

Значение эффекта Комптона

1. *С использованием камеры Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле, экспериментально определены энергия и импульс электрона отдачи и подтверждена гипотеза о квантовой природе эффекта Комптона для частиц релятивистских энергий.*
2. *Соответствие результатов теоретических расчетов экспериментальным данным рассматривается как подтверждение наличия у электромагнитного излучения свойств и волны, и частицы.*
3. *В совокупности с другими явлениями эффект Комптона лежит в основе квантовой физики.*



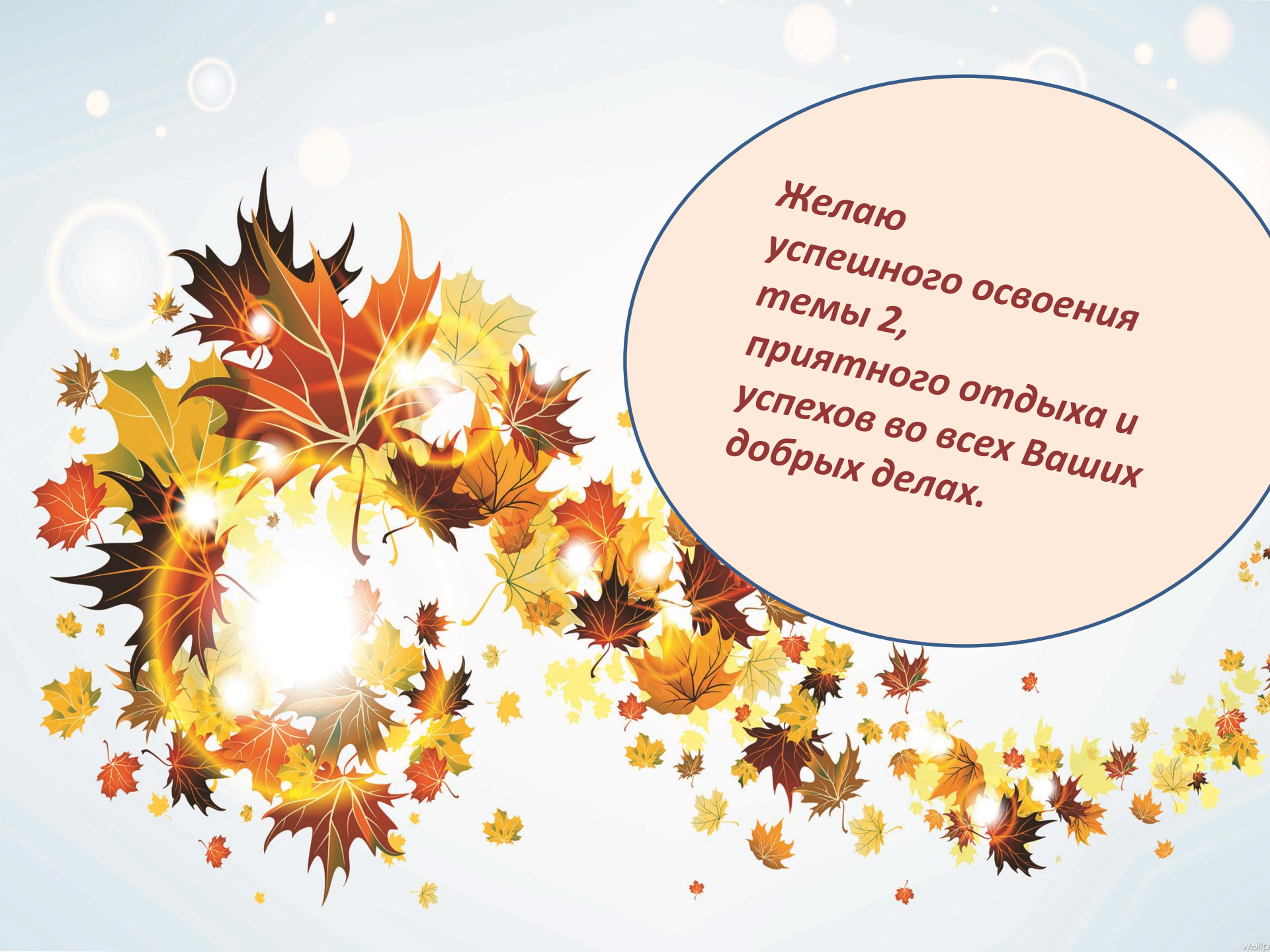
Трек электрона отдачи
в пузырьковой камере

Литература для самоподготовки

1. Годлевская, А.Н. Физика атома и атомных явлений : учебное пособие / А.Н. Годлевская, В.Г. Шолох; под ред. А.А. Сокольского; М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 307 с.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики : Атомная и ядерная физика /Д.В. Сивухин. – Т. V, ч. I. – М.: Наука, 1986. – 416 с.
3. Шпольский, Э.В. Атомная физика : Введение в атомную физику : в 2 т. / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 1. – 575 с.

Вопросы для самопроверки

1. Какие затруднения возникли при объяснении распределения энергии в спектре теплового излучения абсолютно черного тела на основе классической физики?
2. Какие представления были положены М. Планком в основу объяснения законов теплового излучения?
3. Как на основе формулы Планка получить формулы Вина, Рэлея–Джинса, закон смещения Вина, закон Стефана–Больцмана?
4. В чем состоит суть фотоэлектрического эффекта?
5. Каковы его основные законы и способ их экспериментального установления?
6. Какие законы фотоэффекта не удалось объяснить на основе классической физики?
7. Правильно ли утверждение, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта – частное проявление закона сохранения энергии? (Ответ аргументируйте.)
8. Как на основе уравнения Эйнштейна для фотоэффекта объяснить законы этого явления?
9. Каковы условия и схема наблюдения эффекта Комптона?
10. Каковы основные закономерности явления Комптона?
11. Почему при теоретическом описании эффекта Комптона можно пользоваться законами сохранения энергии и импульса?
12. Каково значение работ ученых, исследовавших эффект Комптона?
13. Какие основные выводы можно сформулировать на основе материала темы 2?

The background is a light blue gradient with soft, out-of-focus white circles (bokeh) scattered across it. On the left side, there is a large, vibrant cluster of autumn leaves in shades of red, orange, and yellow. Some leaves have bright white highlights, giving them a glowing appearance. Smaller, scattered leaves are also visible across the bottom and right sides of the image. A large, light orange oval with a thin blue border is positioned on the right side, containing the text.

*Желаю
успешного освоения
темы 2,
приятного отдыха и
успехов во всех Ваших
добрых делах.*