



Майнор “Мир глазами физиков”

Весна 2019

Введение в квантовую физику

Лекция 2:

Фотозффект: опыты Милликена

Давление света

Эффект Комптона

Уравнение Эйнштейна и опыты Милликена

$$h \nu = m \frac{V^2}{2} + A$$

Нобелевская лекция Милликена, 1924

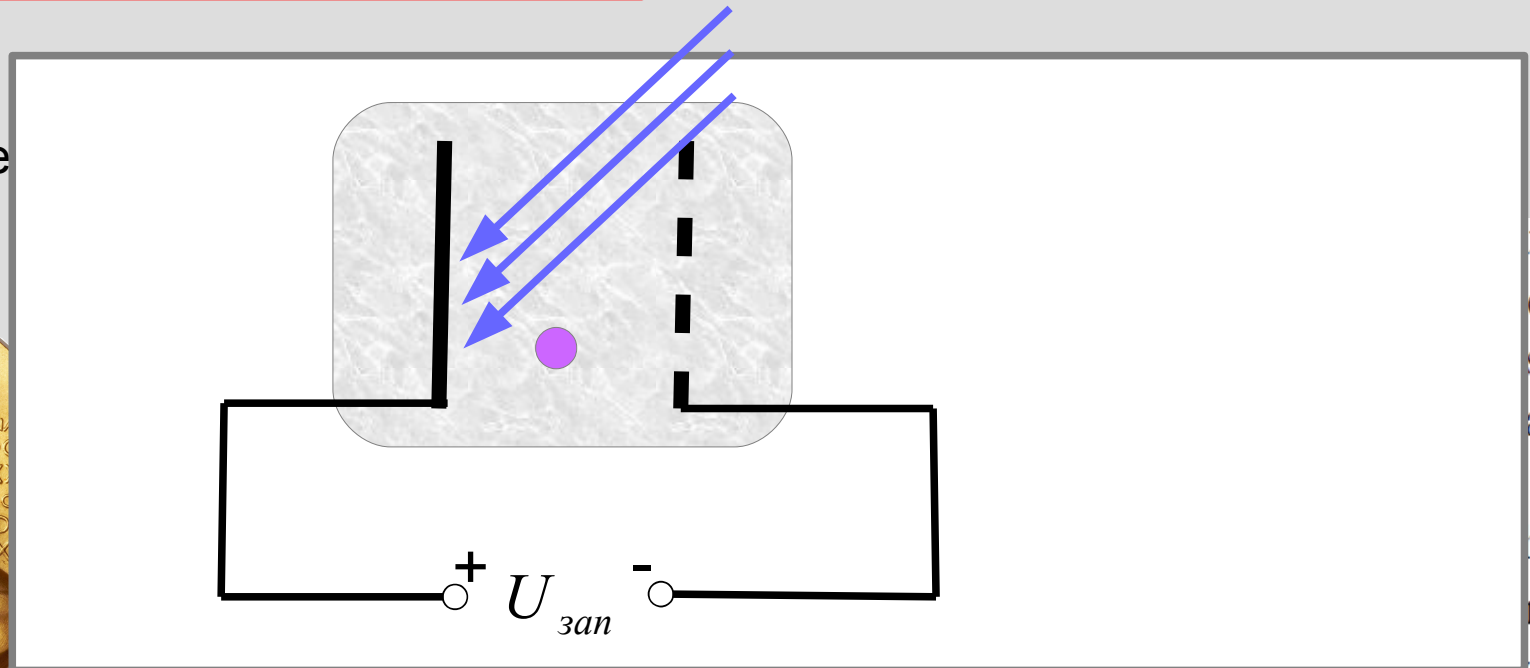


After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering, all efforts being directed from the first toward the accurate experimental measurement of the energies of emission of photoelectrons, now as a function of temperature, now of wavelength, now of material (contact e.m.f. relations), this work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof in 1914 of the exact validity, within narrow limits of experimental error, of the Einstein equation, and the first direct photoelectric determination of Planck's h . The accuracy obtained was about 0.5% which was much the best available at the time. Figs. 3 and 4,

Уравнение Эйнштейна и опыты Милликена

$$h\nu = m \frac{V^2}{2} + A = e U_{\text{зан}} + A$$

Нобелевская ме



direct photoelectric determination of Planck's h . The accuracy obtained was about 0.5% which was much the best available at the time. Figs. 3 and 4,

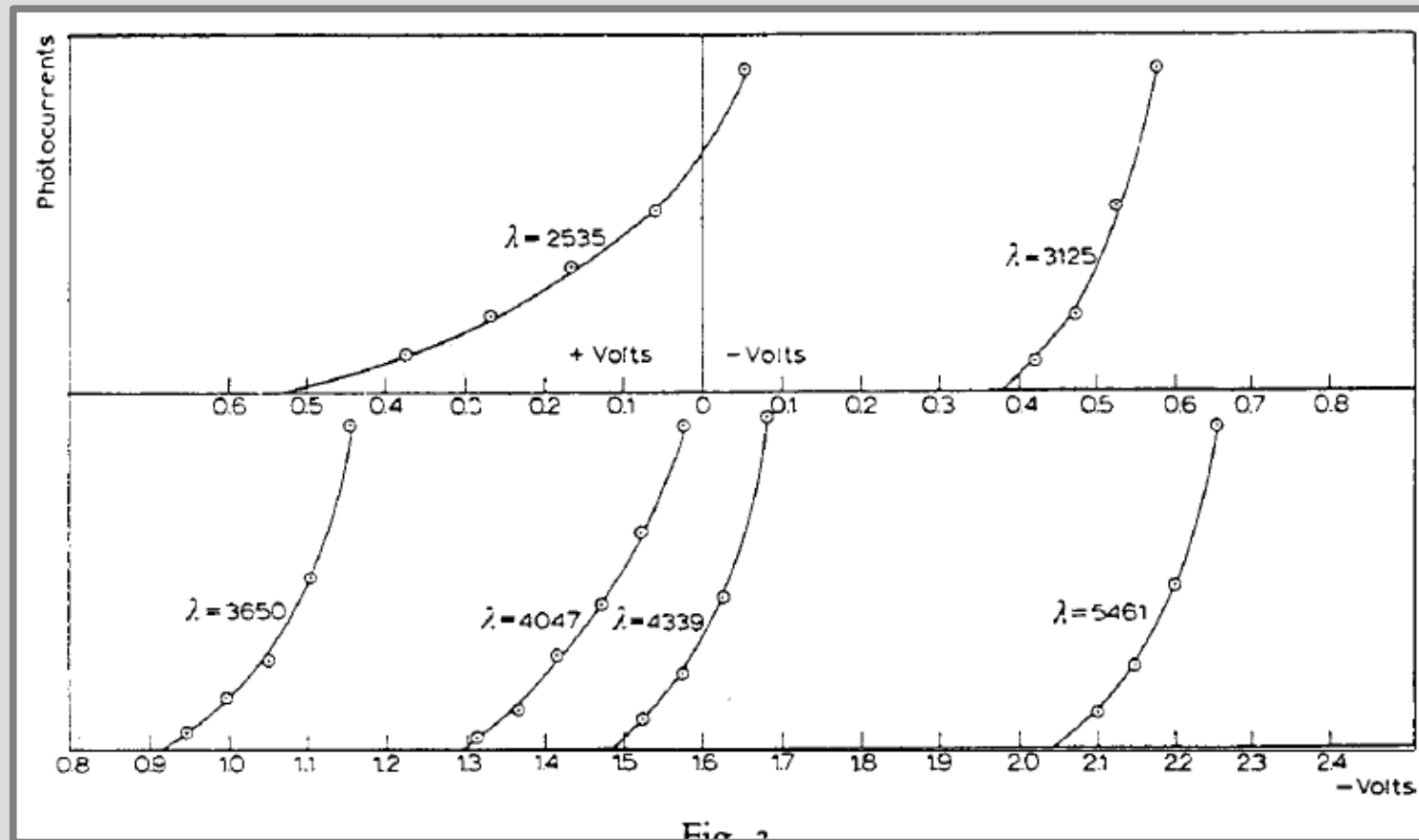
in-
er-
s a
act
in
nin
rst

Результаты Милликена

$$h\nu = m \frac{V^2}{2} + A = e U_{\text{зап}} + A$$

рис. из Нобелевской лекции
Милликена, 1924

Запирающее
напряжение
растёт с
уменьшением
длины волны



Результаты Милликена

$$h\nu = m \frac{V^2}{2} + A = e U_{\text{зап}} + A$$

рис. из Нобелевской лекции
Милликена, 1924

Запирающее
напряжение
растёт с

Почему полярность запирающего
напряжения изменилась?

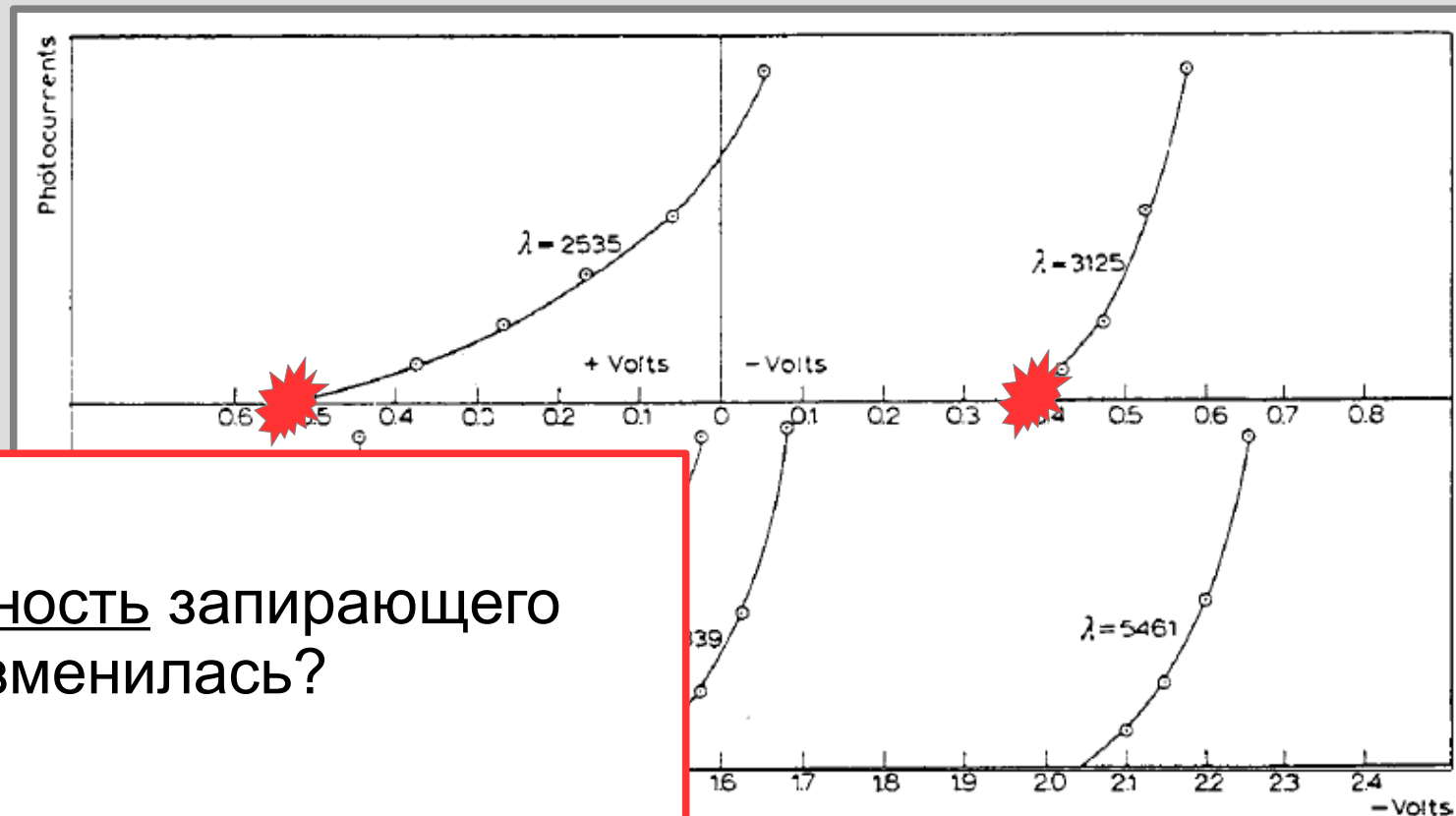
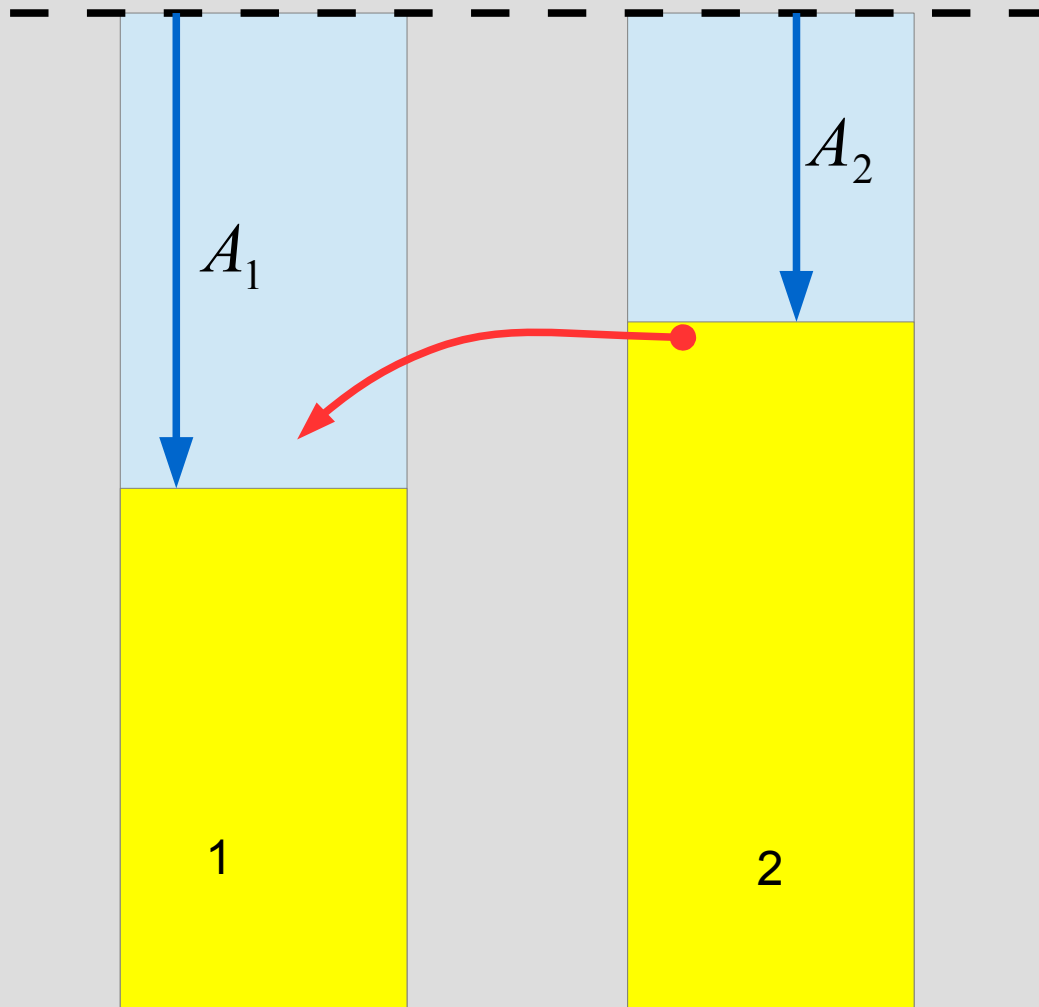


Fig. 2

Работа выхода и контактная разность потенциалов



$$e \Delta U = A_1 - A_2$$

В опытах Милликена один электрод из оксидированной меди, другой – щелочной металл

Результаты Милликена

$$h\nu = m \frac{V^2}{2} + A = e(U_{\text{зап}} + U_{\text{конт}}) + A$$

$$h\Delta\nu = e\Delta U_{\text{зап}}$$

Запи
напр
рас
умень
длины

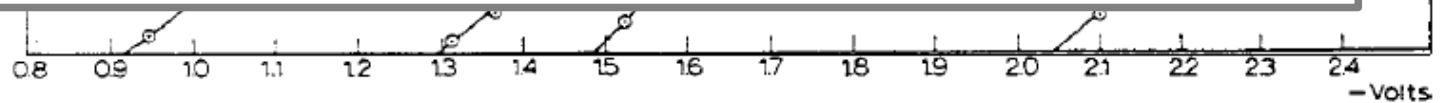
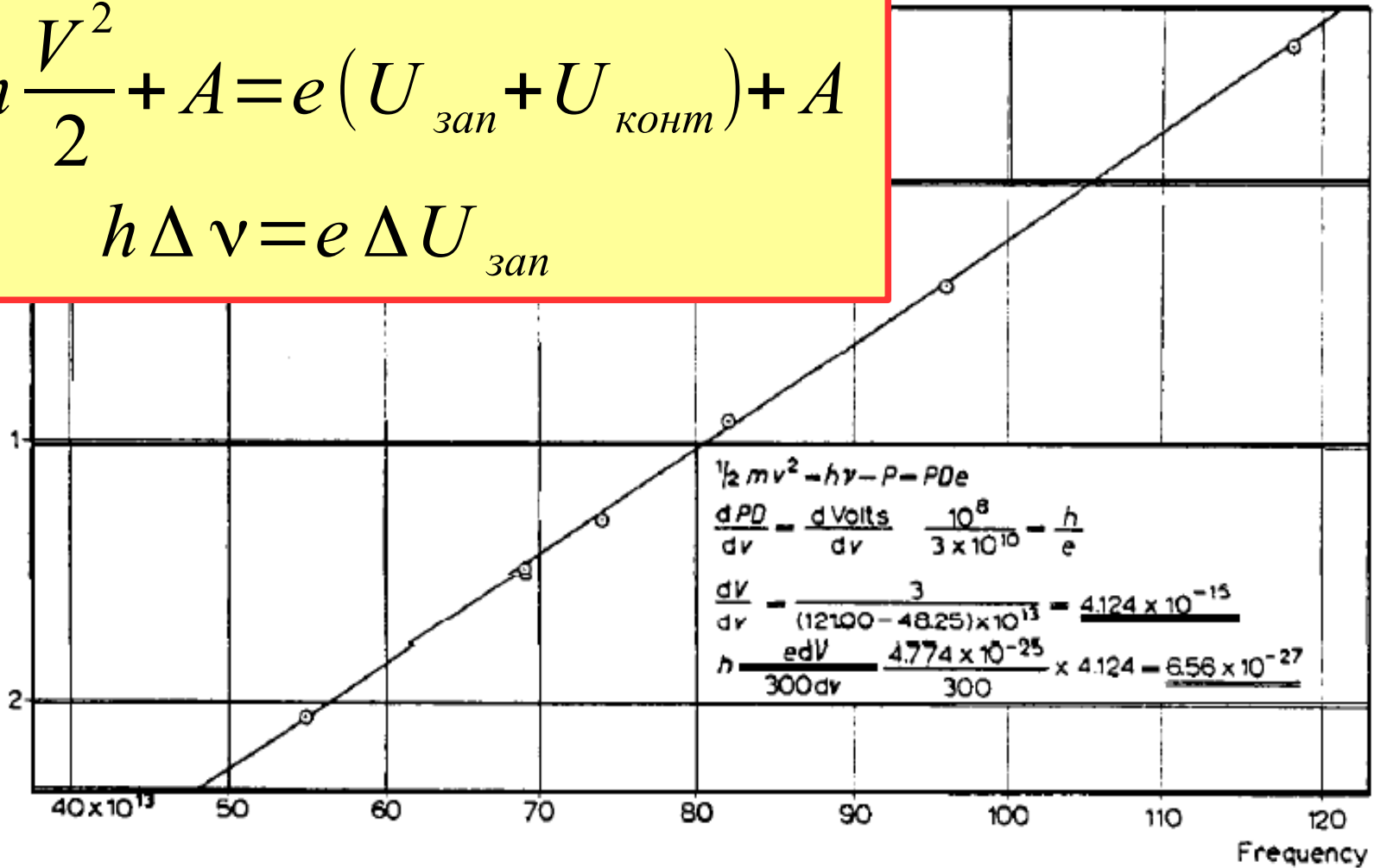
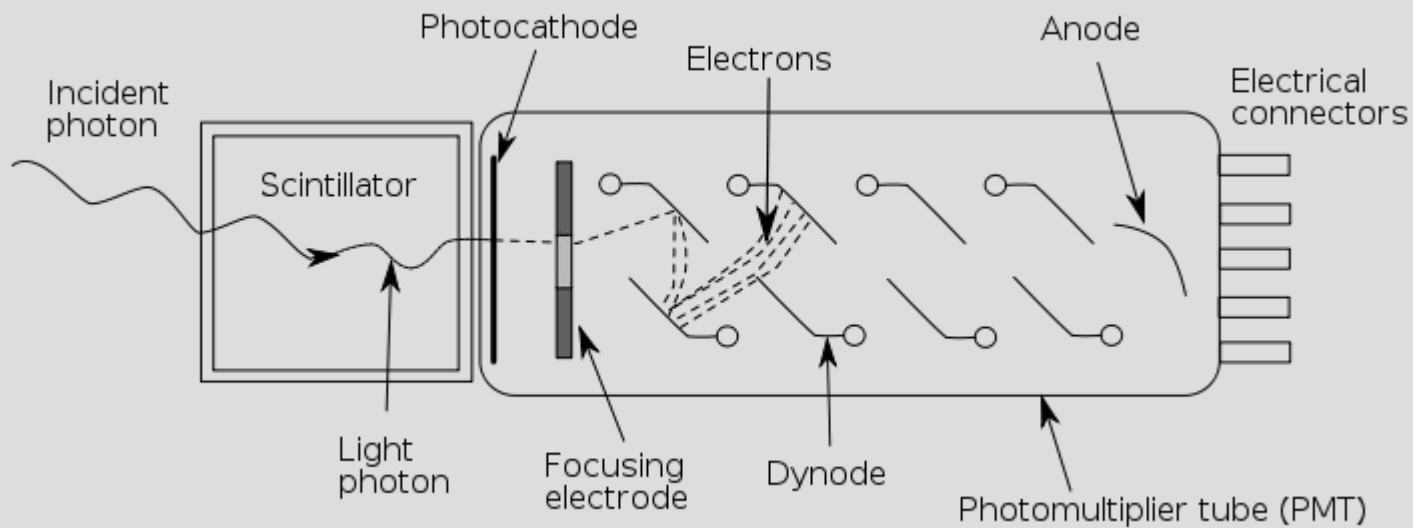


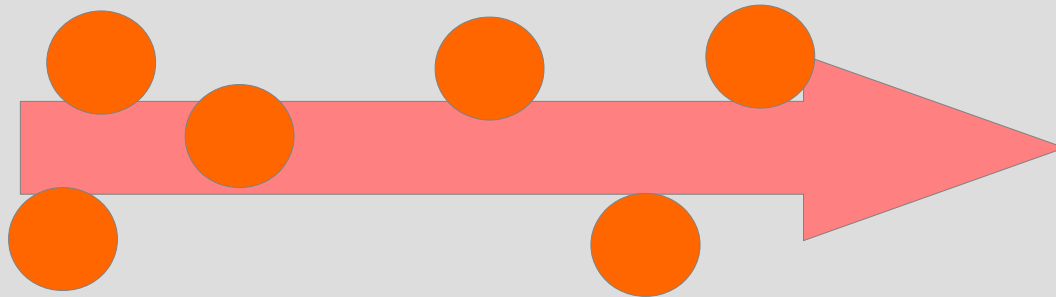
Fig. 2

Напоминание: ФЭУ.

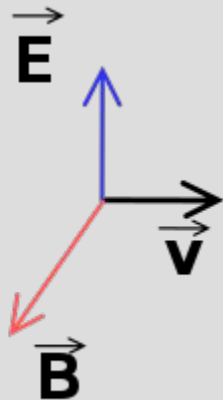
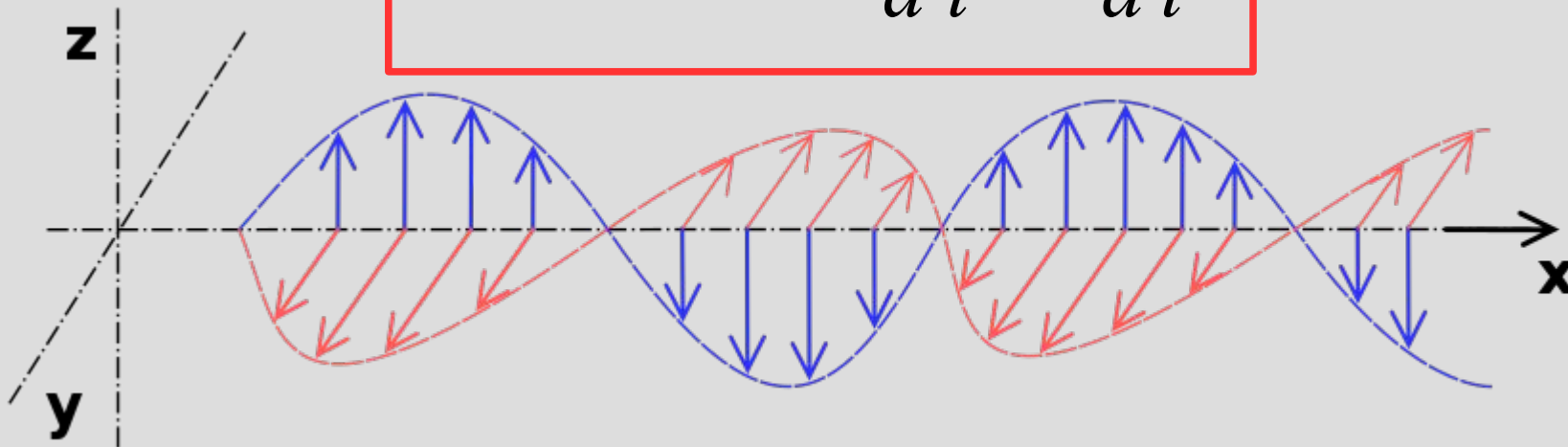
Фото-
электронный
умножитель (ФЭУ)



Давление света.



$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d \vec{V}}{d t} = \frac{d \vec{p}}{d t}$$



Давление света. Эксперимент?



https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI_C9Yh0

Опыты П.Н.Лебедева

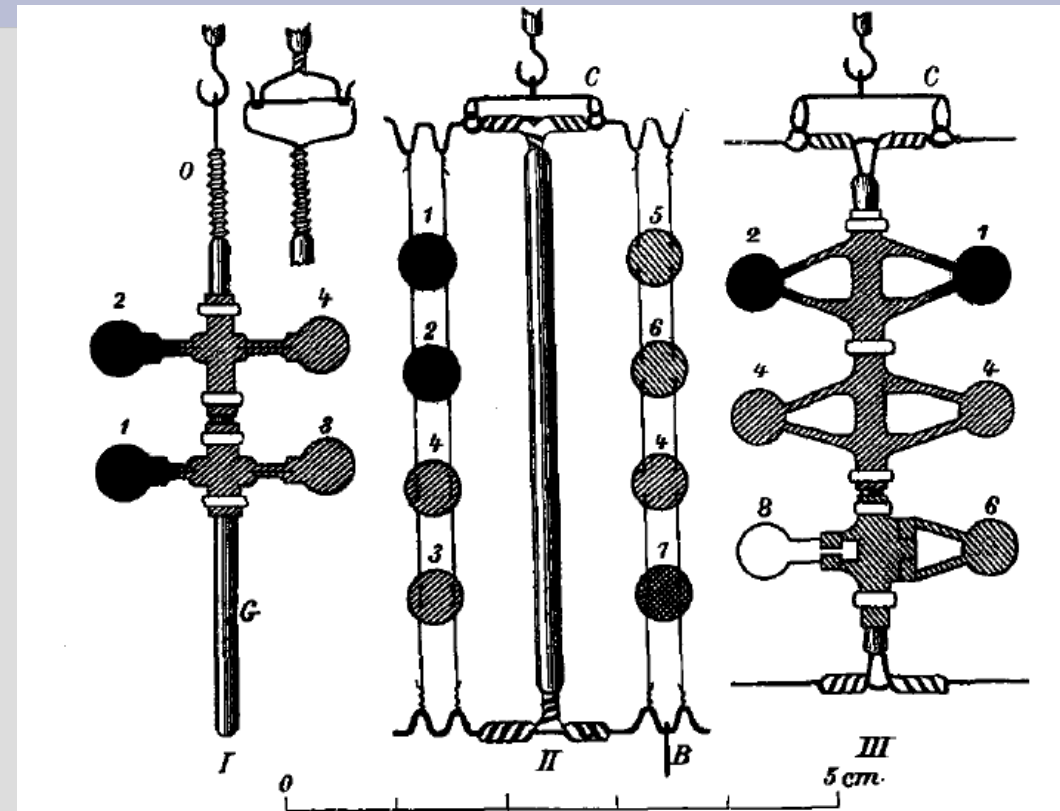
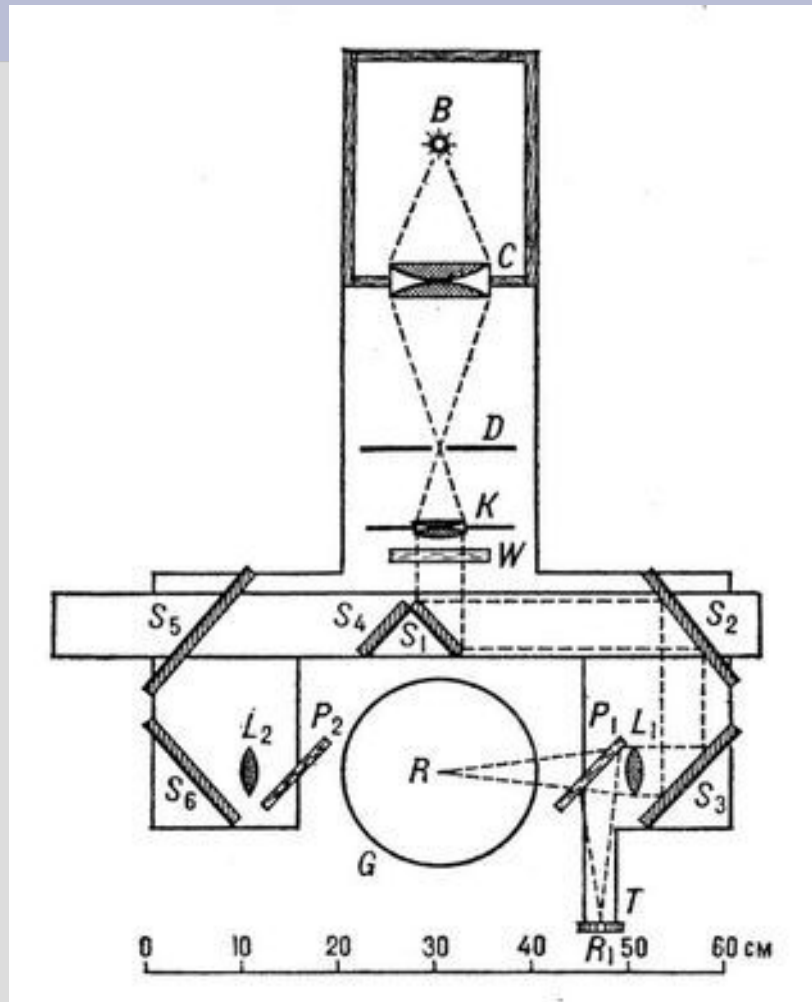
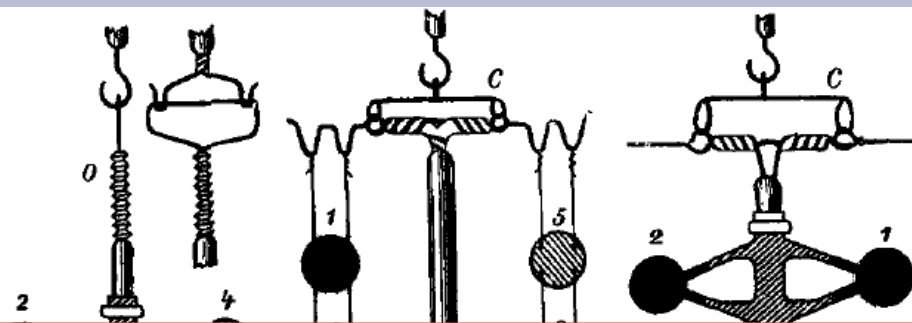
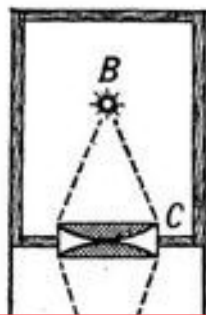


Fig. 3 (natürl. Grösse).

Peter Lebedew, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, Annalen der Physik, 311, 433 (1901)

Опыты П.Н.Лебедева



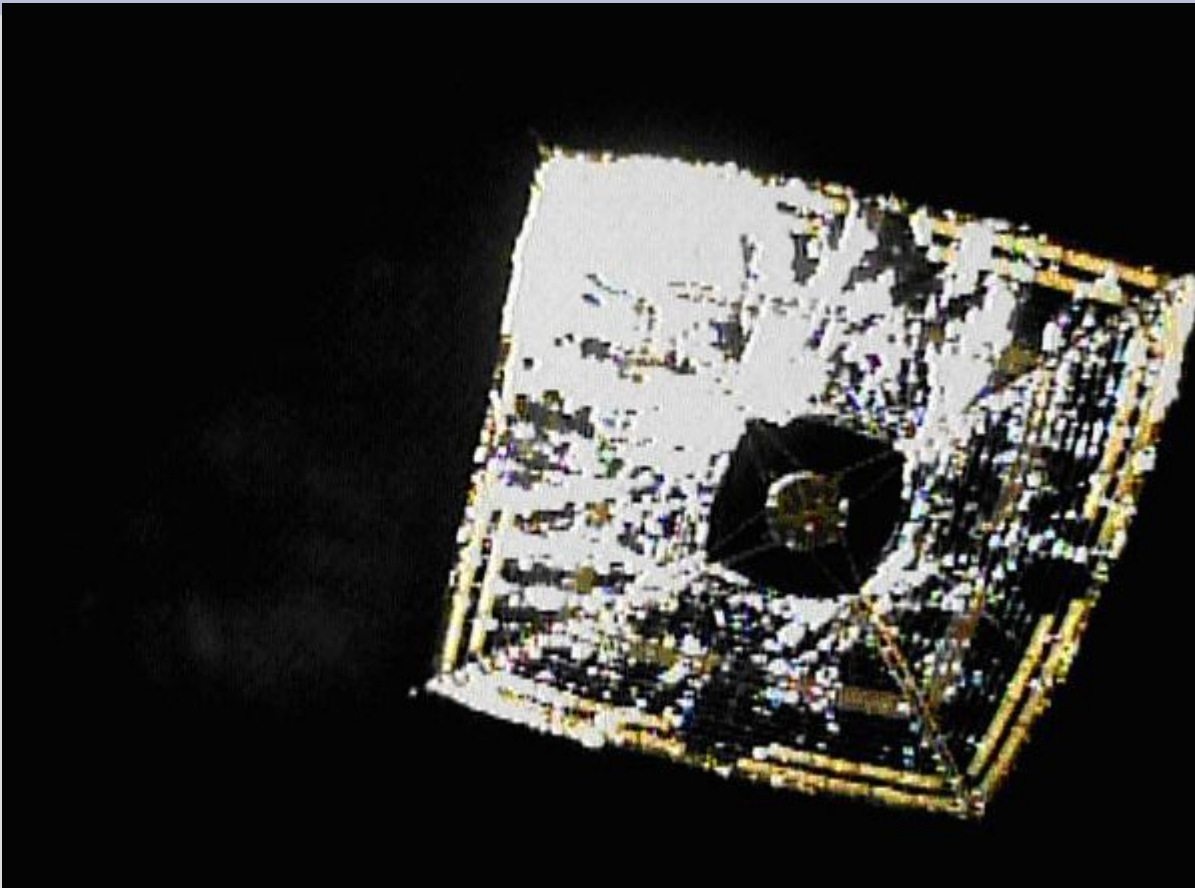
лорд Кельвин:

“Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами”



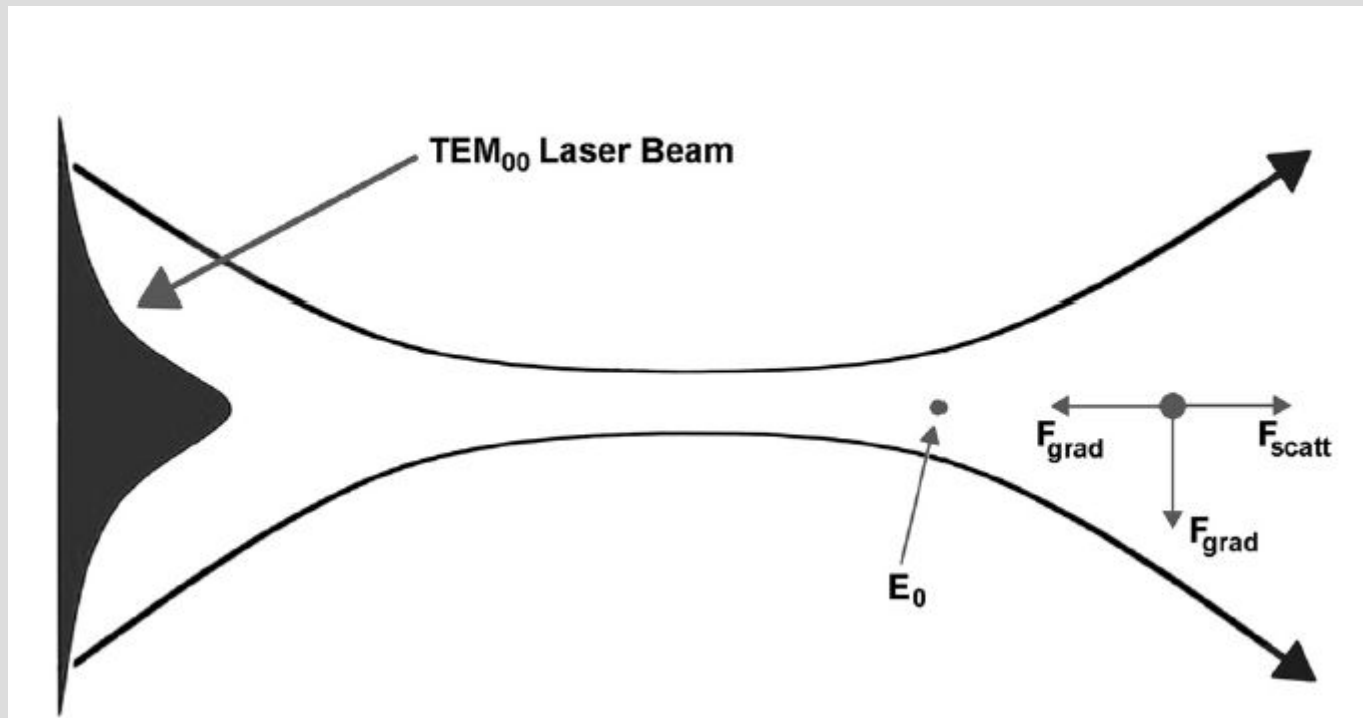
Fig. 3 (natürl. Grösse).

Применение радиационного давления: солнечный парус



Фотография зонда IKAROS с развёрнутым солнечным парусом. Диагональ квадратного паруса равна 20 метрам. С сайта <http://www.jspec.jaxa.jp/e/activity/ikaros.html>

Применение радиационного давления: "оптический пинцет"



Применение радиационного давления: "оптический пинцет"

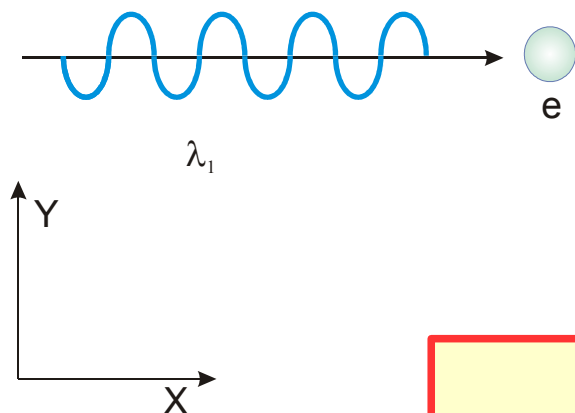


A real-life implementation of the evergreen arcade game Tetris was obtained by optically trapping 42 glass microspheres ($1\ \mu\text{m}$ or $0.001\ \text{mm}$ diameter) in a $25\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ sized area under a microscope. Their positions are then steered with a computer.

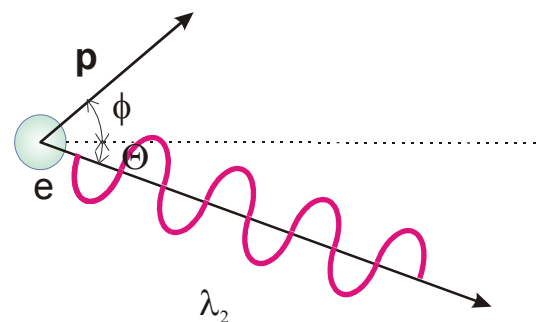
www.youtube.com/watch?v=jCdnBmQZ6_s

Эффект Комптона

До рассеяния



После рассеяния

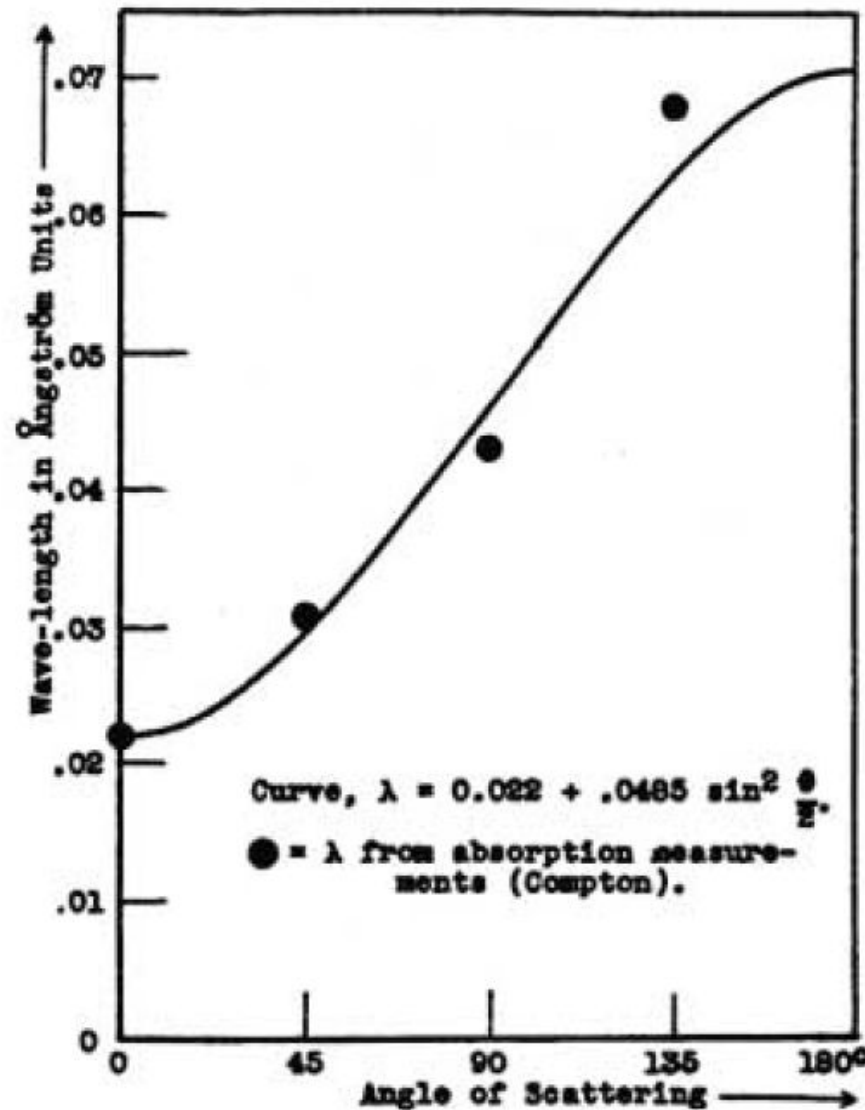


$$h \nu_1 = h \nu_2 + \frac{p^2}{2m}$$

$$OX : \frac{h \nu_1}{c} = \frac{h \nu_2}{c} \cdot \cos \Theta + p_x$$

$$OY : 0 = -\frac{h \nu_2}{c} \cdot \sin \Theta + p_y$$

Эффект Комптона

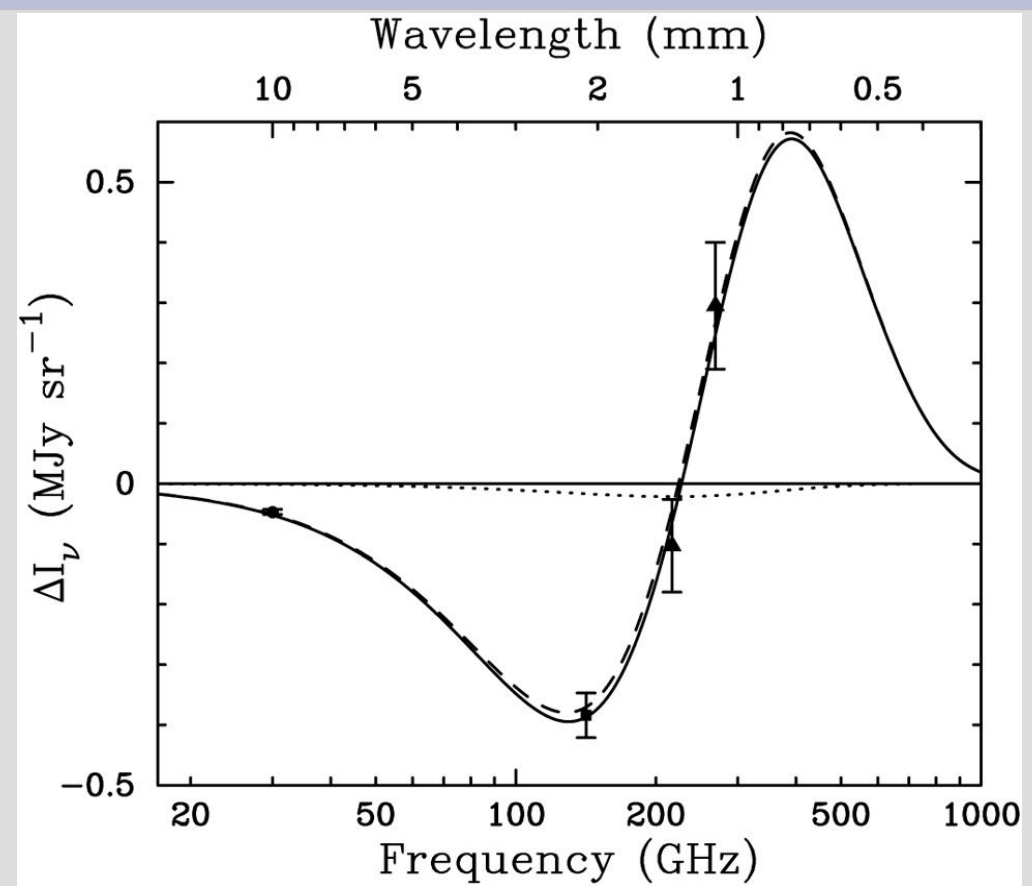
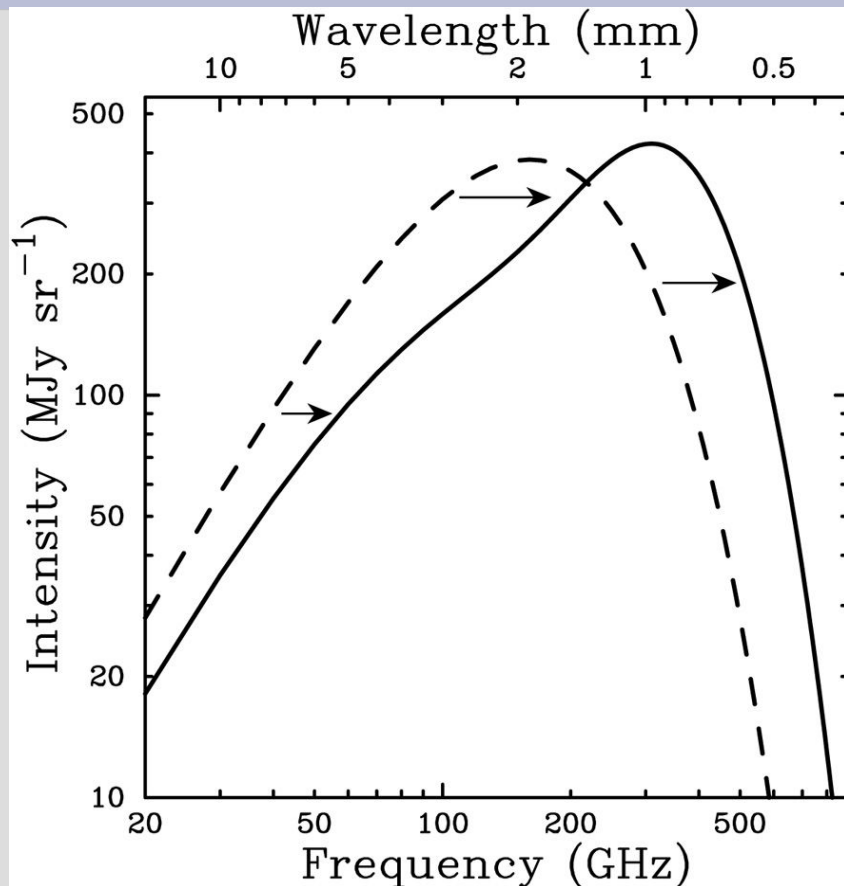


$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m c} (1 - \cos \Theta)$$

↑
Способ
измерить массу
электрона!

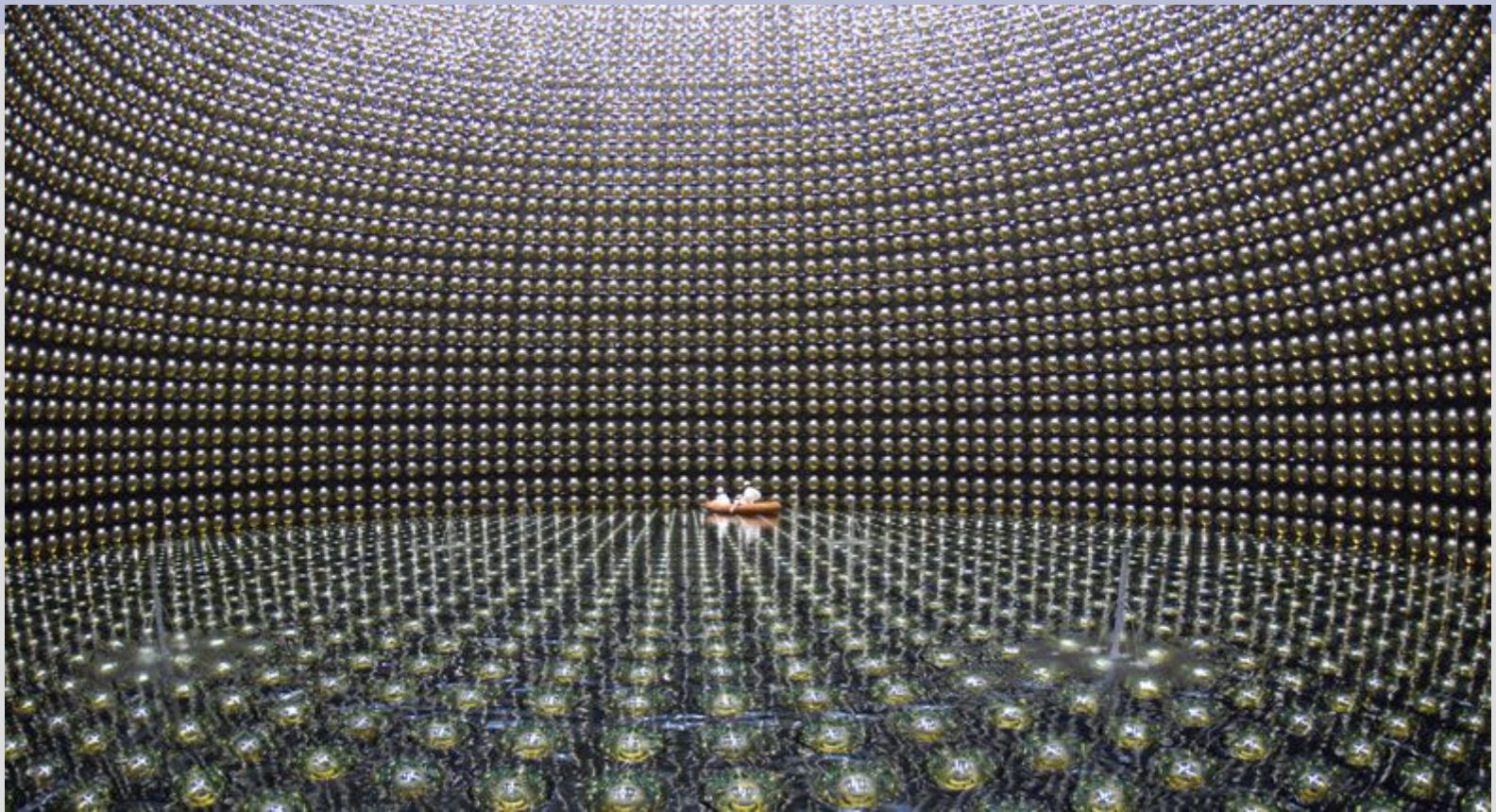
Fig. 5. The wave-length of scattered γ -rays at different angles with the primary beam, showing an increase at large angles similar to a Doppler effect.

Обратный эффект Комптона и эффект Сюняева-Зельдовича



Слева: модельное изменение спектра реликтового излучения при прохождении через галактический кластер с размером в 1000 раз больше, чем типичный галактический кластер. Справа: наблюдаемое изменение спектра реликтового излучения (символы) при прохождении через кластер галактик Abell2163 (расстояние 2700 млн. св.лет, созвездие Змееносца) по сравнению со спектром реликтового излучения из «свободного» космоса и теоретическое описание (кривые). Из статьи John E. Carlstrom, Gilbert P. Holder, and Erik D. Reese, *Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 40, 643 (2002)

Детектирование нейтрино

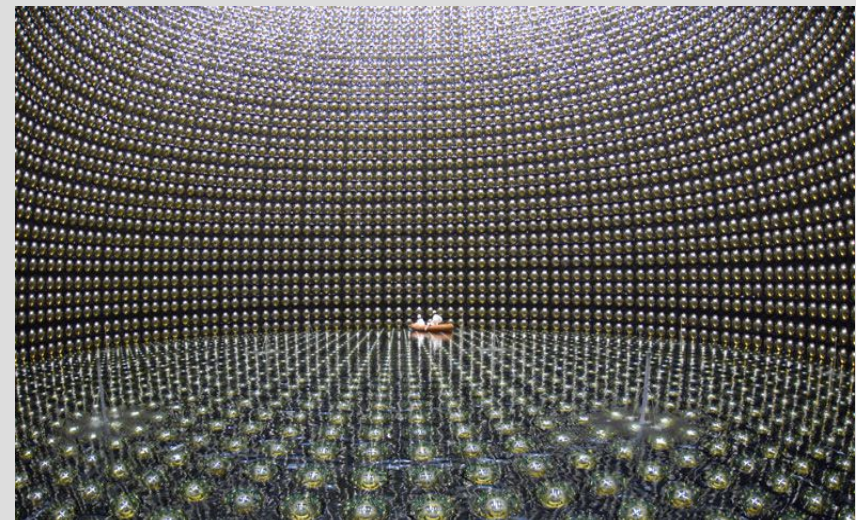
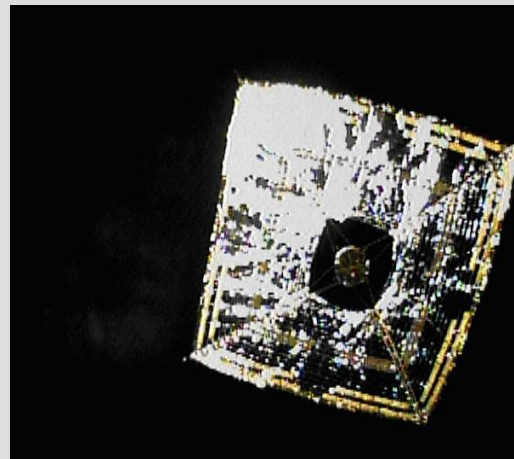


Обслуживание детектора СуперКамиоканде. С сайта Super Kamiokande, The World's Largest Underground Neutrino Detector, 2017, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

Выводы

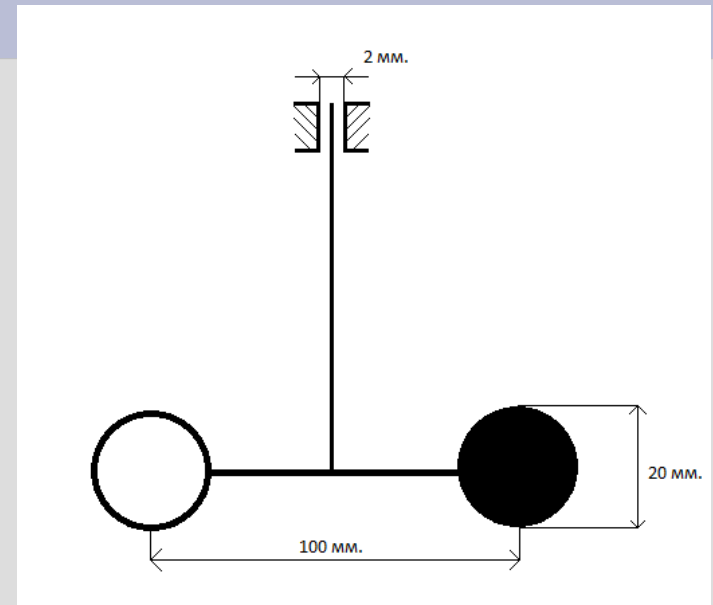
Процессы взаимодействия излучения с веществом:

- **фотоэффект** – энергия фотона передаётся электрону, импульс не сохраняется
- **давление света** – передача импульса волны/фотона, вообще говоря не квантовый эффект
- **эффект Комптона** – квантовый эффект, одновременное выполнение законов сохранения энергии и импульса



Задачи домашнего задания

В опыте Лебедева, демонстрирующем давление света, легкий стержень, соединяющий диски, один из которых зачернён, а другой посеребрен, был подвешен на тонкой стеклянной нити в вакууме. Конструкция освещалась обычным светом и наблюдалось закручивание нити. Однако, что будет, если вместо нити использовать жёсткую конструкцию, закреплённую в подшипнике сверху? Оцените максимально допустимую силу трения покоя в подшипнике, при которой ещё можно будет обнаружить давление света. Считать, что для освещения используется мощная лампа мощностью 1 кВт, помещённая в прожектор, формирующий луч диаметром 30 см, освещающий оба диска.



Навстречу пучку электронов, разогнанных в электронно-лучевой трубке до кинетической энергии в 5 кэВ, светят красной лазерной указкой (длина волны 655 нм). Чему равна длина волны света, рассеянного пучком в обратном направлении?