

Атомная физика

Лекция 5

М.Ю. Рябикин

канд. физ.-мат. наук, в.н.с. ИПФ РАН

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ВШОПФ

2025

Импульс фотона (часть 1)

Фотоэффект → гипотеза Эйнштейна → свет как поток частиц (фотонов).

Скорость движения фотонов в вакууме = c (скорость света).

Специальная теория относительности (СТО) → фотон как частица с нулевой массой покоя.

$$E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (5.1.1)$$

СТО → связь полной энергии свободной частицы с её массой покоя m_0 и импульсом p :

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (5.1.2)$$

$$m_0 = 0 \rightarrow E^2 = p^2 c^2$$

↓

Фотон должен обладать импульсом, модуль которого равен

$$p = \frac{E}{c} \quad (5.2)$$

Ньютон о корпускулярной природе света.

$$E = \hbar \omega$$

↓

$$p = \frac{\hbar \omega}{c} = \hbar k \quad (5.3)$$

Вектор импульса фотона:

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \quad (5.4)$$

Корпускулярно-волновой дуализм фотона.

$$\begin{array}{ccc} \text{Корпускулярные} & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} E = \hbar \omega \\ \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \end{array} \right\} \leftarrow & \text{Волновые} \\ \text{характеристики} & & \text{характеристики} \end{array}$$

Наличие ненулевого импульса фотона должно проявляться в возникновении сил давления при отражении света от какой-либо площадки.

Световое давление

Рассмотрим площадку, на которую перпендикулярно ей падает поток монохроматического света.

Удельная интенсивность падающего излучения:

$$I = N\hbar\omega \quad (5.5)$$

(N – число фотонов, падающих по нормали на площадку в 1 см^2 за 1 с).

Пусть площадка полностью отражает свет

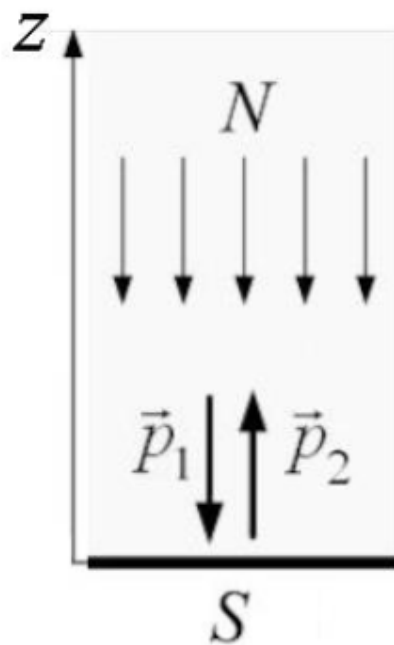
→ закон сохранения импульса →

каждый фотон передает площадке импульс

$$\Delta p = (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)_z = \frac{\hbar\omega}{c} - \left(-\frac{\hbar\omega}{c}\right) = 2\frac{\hbar\omega}{c} \quad (5.6)$$

Передача импульса площадке (эффект отдачи) →
давление света на поверхность:

$$P = N\Delta p = N\frac{2\hbar\omega}{c} = \frac{2I}{c} \quad (5.7)$$



Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

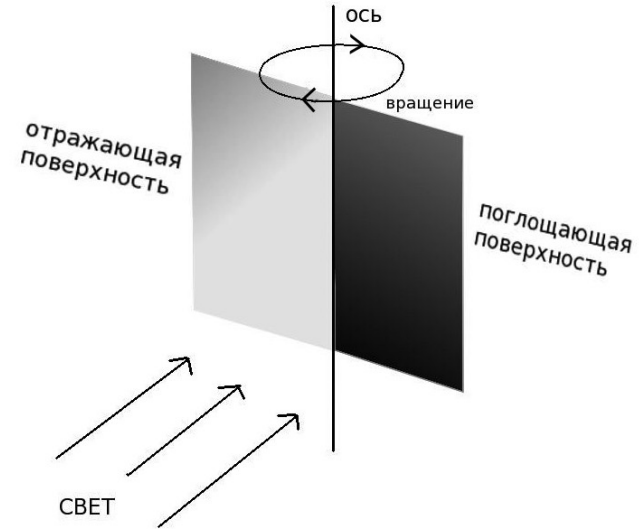
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

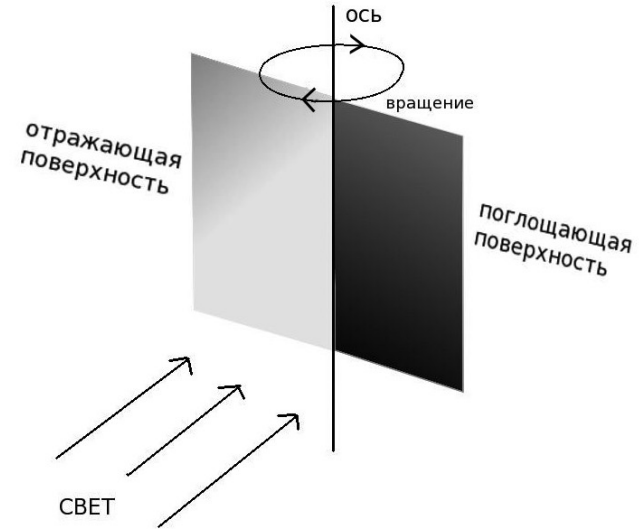
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



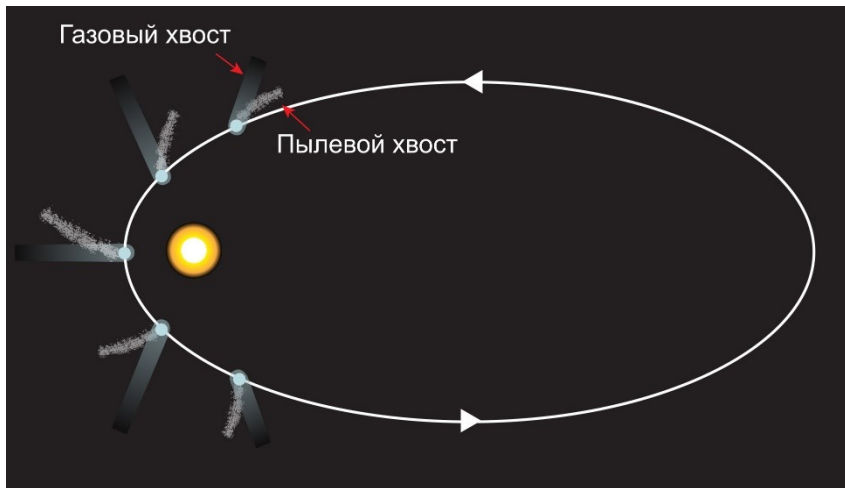
Хвосты комет



Комета Галлея (1986)



Комета Хейла-Боппа (1997)



Основные 2 типа хвостов:

- газовый (ионный)

Давление солнечного ветра
на ионизованные газы

- пылевой

Давление солнечного света
на пылевые частицы

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

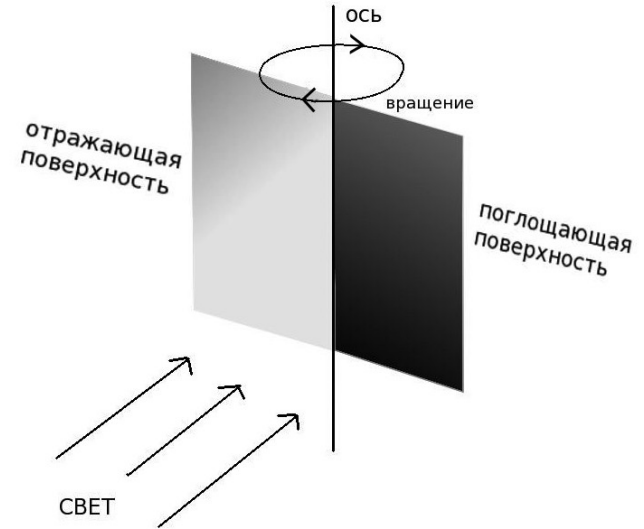
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

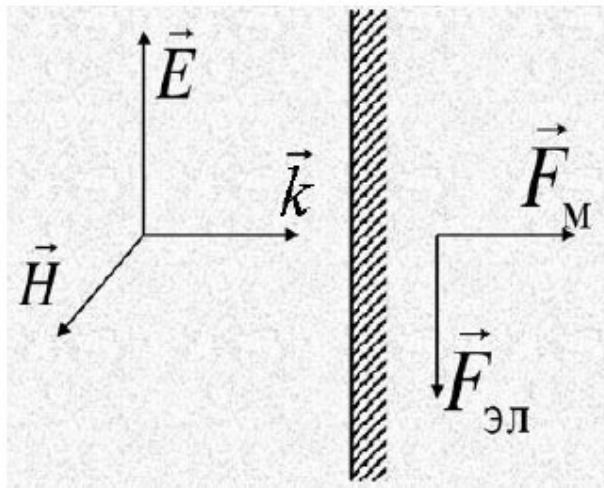
С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл, 1873)

Давление света согласно электродинамике Максвелла возникает из-за действия магнитной части силы Лоренца на электроны приповерхностного слоя среды, колеблющиеся под действием электрического поля ЭМ волны.



$$\mathbf{v}_e \sim \mathbf{E}, \quad |\mathbf{F}_M| \sim |[\mathbf{v}_e \mathbf{H}]| \sim I$$

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

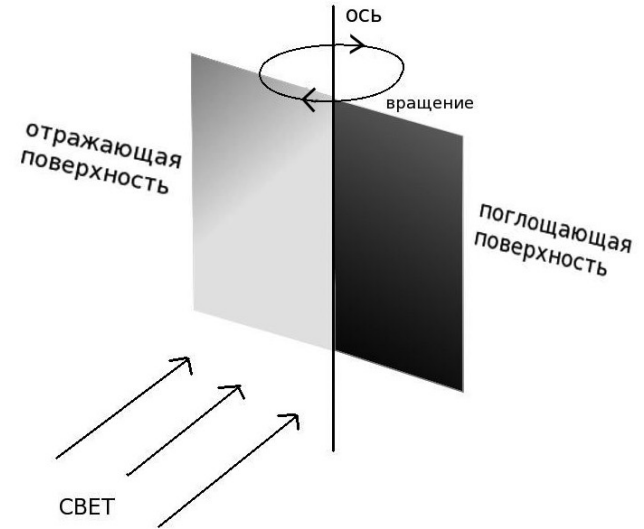
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

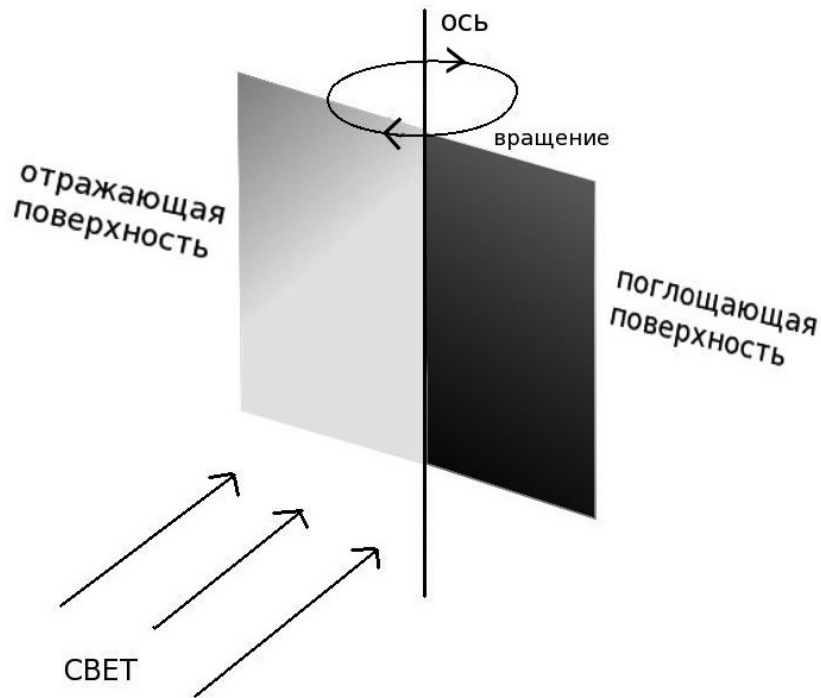
1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев, 1899)



В опытах Лебедева в вакуумированном сосуде на тонкой серебряной нити подвешивались крутильные весы, к коромыслам которых были прикреплены тонкие диски из слюды и различных металлов.

Паразитные эффекты:

радиометрические и конвективные силы (силы, обусловленные разностью температуры окружающего газа с освещённой и неосвещённой стороны).

Уже в первой серии экспериментов Лебедев получил удовлетворительное ($\pm 20\%$) согласие с теорией Максвелла.

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

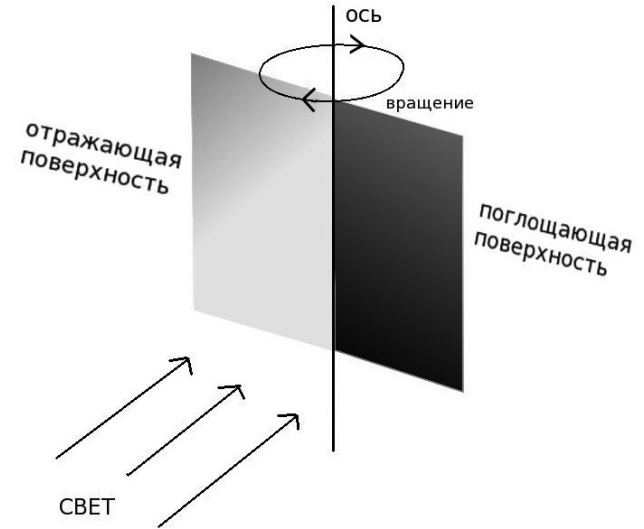
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



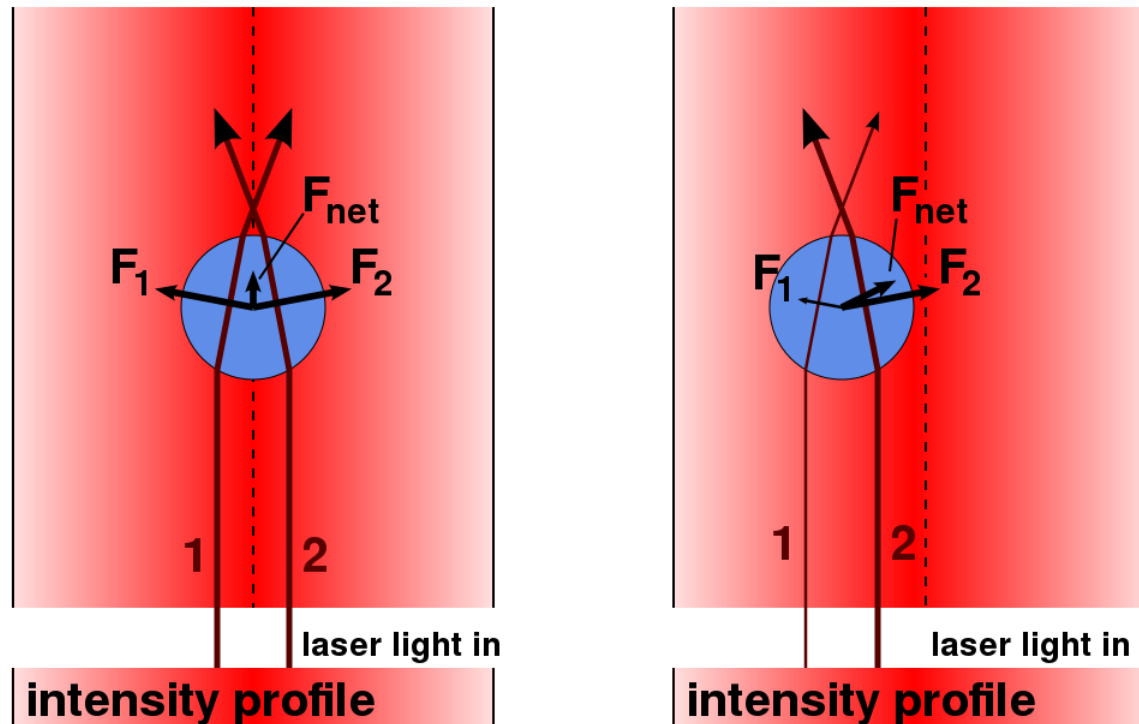
Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)

Принцип действия лазерного пинцета или оптической ловушки наиболее просто объяснить на примере твердой прозрачной микросферы, облучаемой пучком света с длиной волны, намного меньшей диаметра микросферы. В этом случае можно использовать подход, основанный на геометрической оптике, рассматривая ход лучей в процессах преломления и отражения света от микросферы. Такое рассмотрение позволит найти изменение импульса фотонов при отражении и преломлении и, соответственно, определить величину и направление результирующей силы отдачи, действующей на микросферу.

**A. Ashkin “Acceleration and trapping of particles by radiation pressure”,
Phys. Rev. Lett. 24, 156-159 (1970)**

Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)

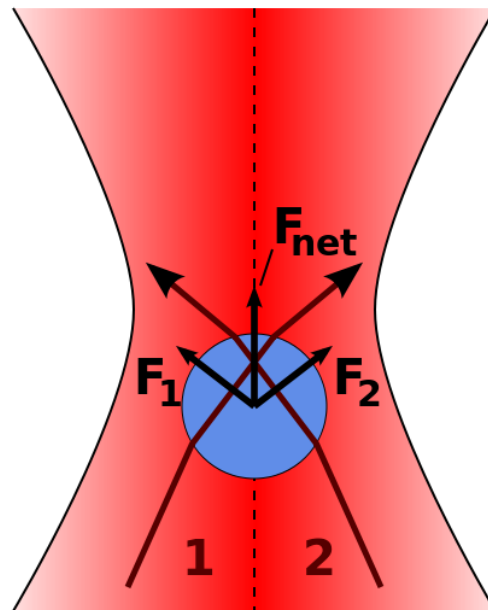
Несфокусированный пучок



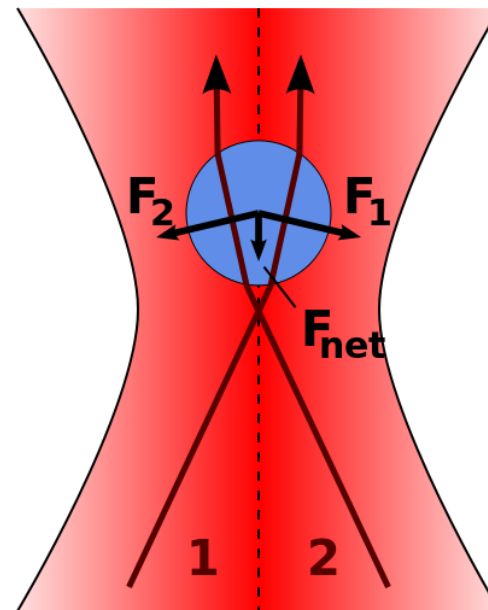
A. Ashkin "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure",
Phys. Rev. Lett. 24, 156-159 (1970)

Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)

Сфокусированный пучок



laser light in
intensity profile



laser light in
intensity profile

A. Ashkin "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure",
Phys. Rev. Lett. 24, 156-159 (1970)

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

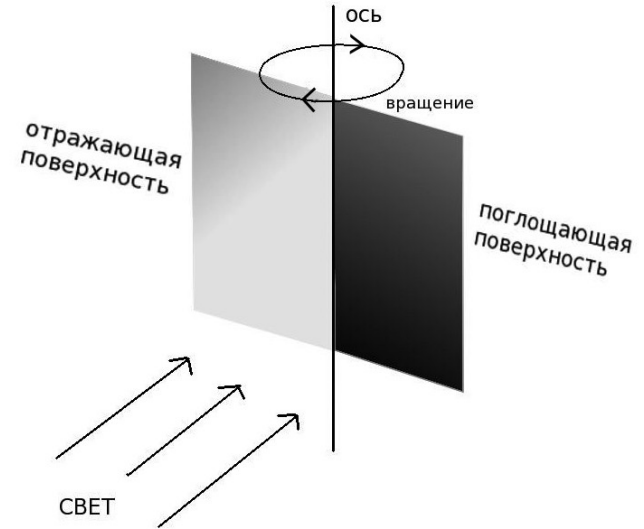
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

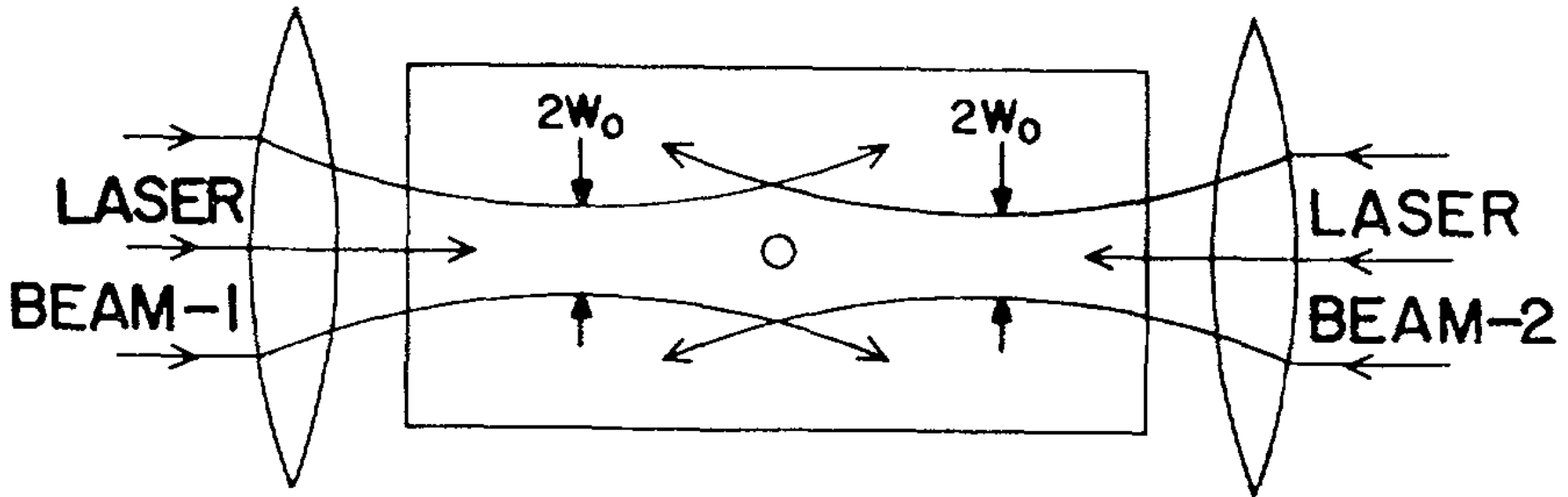
С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)

Двухпучковая оптическая ловушка



A. Ashkin "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure",
Phys. Rev. Lett. 24, 156-159 (1970)

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

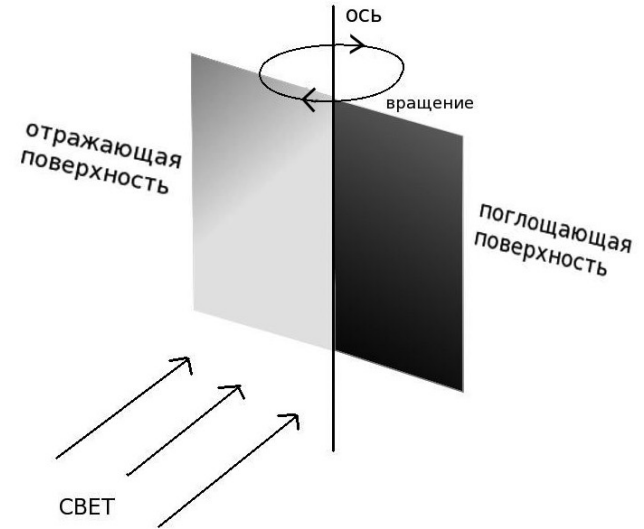
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

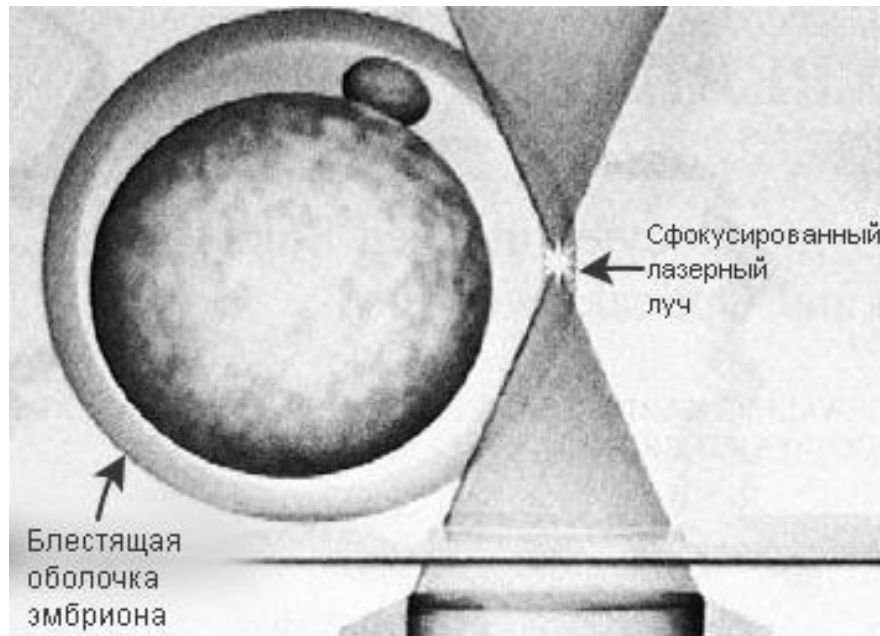
2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



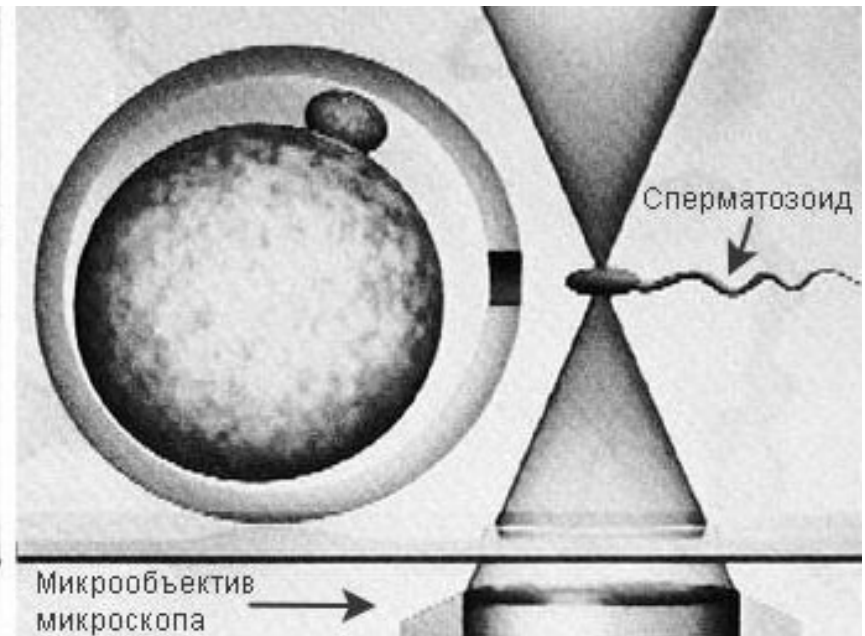
Оптические скальпели и пинцеты в эмбриологии (технологии искусственного оплодотворения)

Доставка сперматозоида в яйцеклетку

Диаметр человеческой яйцеклетки ~ 130 мкм



↑
Оптический скальпель

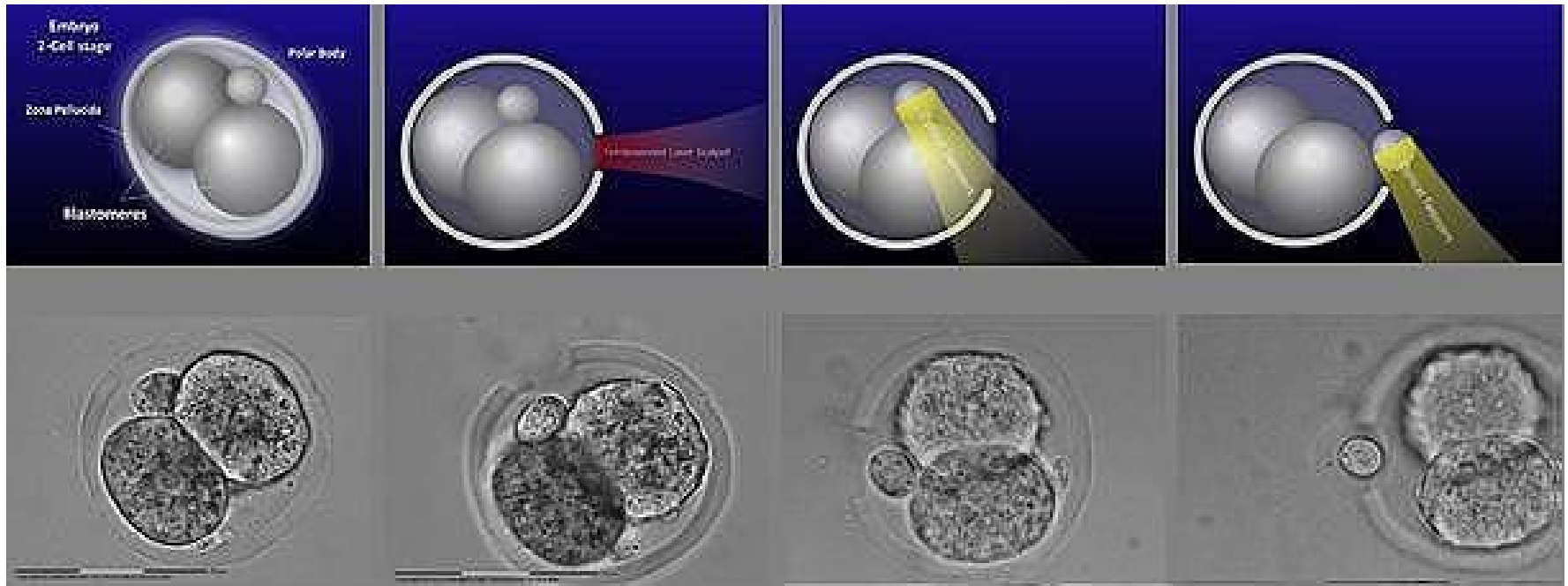


↑
Оптический пинцет

Объединенный институт высоких температур РАН

Оптические скальпели и пинцеты в эмбриологии (технологии искусственного оплодотворения)

Бесконтактная биопсия полярного тельца



Бесконтактная лазерная биопсия дает возможность без разрушительных последствий извлекать из эмбриона полярное тельце для осуществления преимплантационной генетической диагностики, позволяющей выявить наличие генетических заболеваний.

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

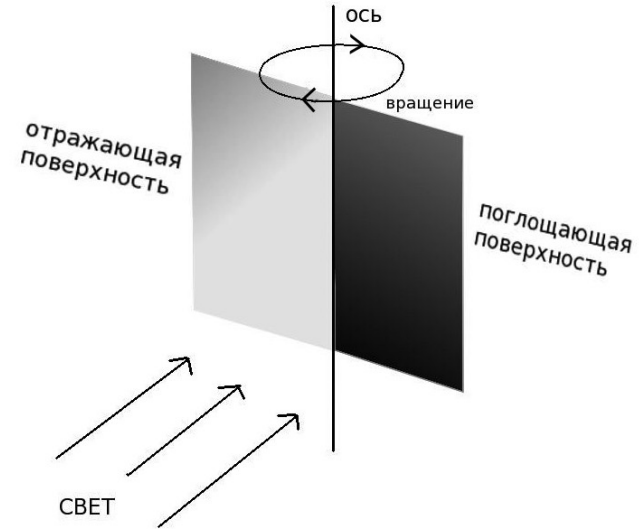
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, К. Коэн-Таннуджи, У. Филлипс и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)





Steven Chu



Claude Cohen-
Tannoudji



William D. Phillips

Стивен Чу – ученик Артура Эшкина – развил предложенный Эшкином метод охлаждения атомов в оптической ловушке.

Световое давление

XVII в. – Гипотеза о давлении света на хвосты комет (И. Кеплер)

1873 г. – Описание давления света в рамках классической электродинамики (Дж. Максвелл)

1899-1910 г.г. – Экспериментальное исследование светового давления (П. Лебедев)

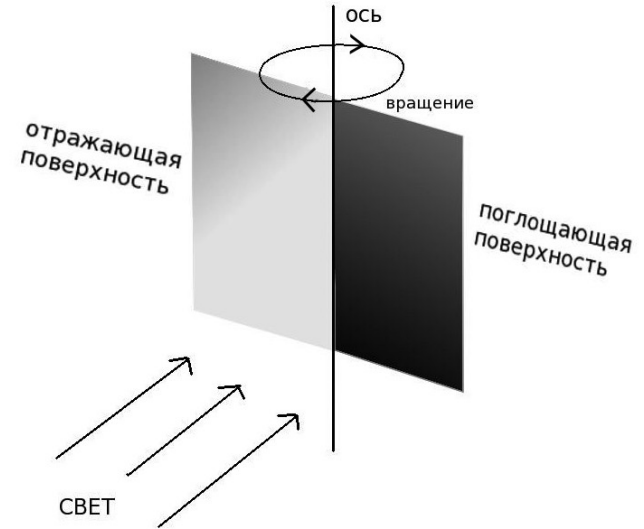
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

1986-1987 г.г. – Экспериментальная демонстрация оптической ловушки (А. Эшкин и др.)

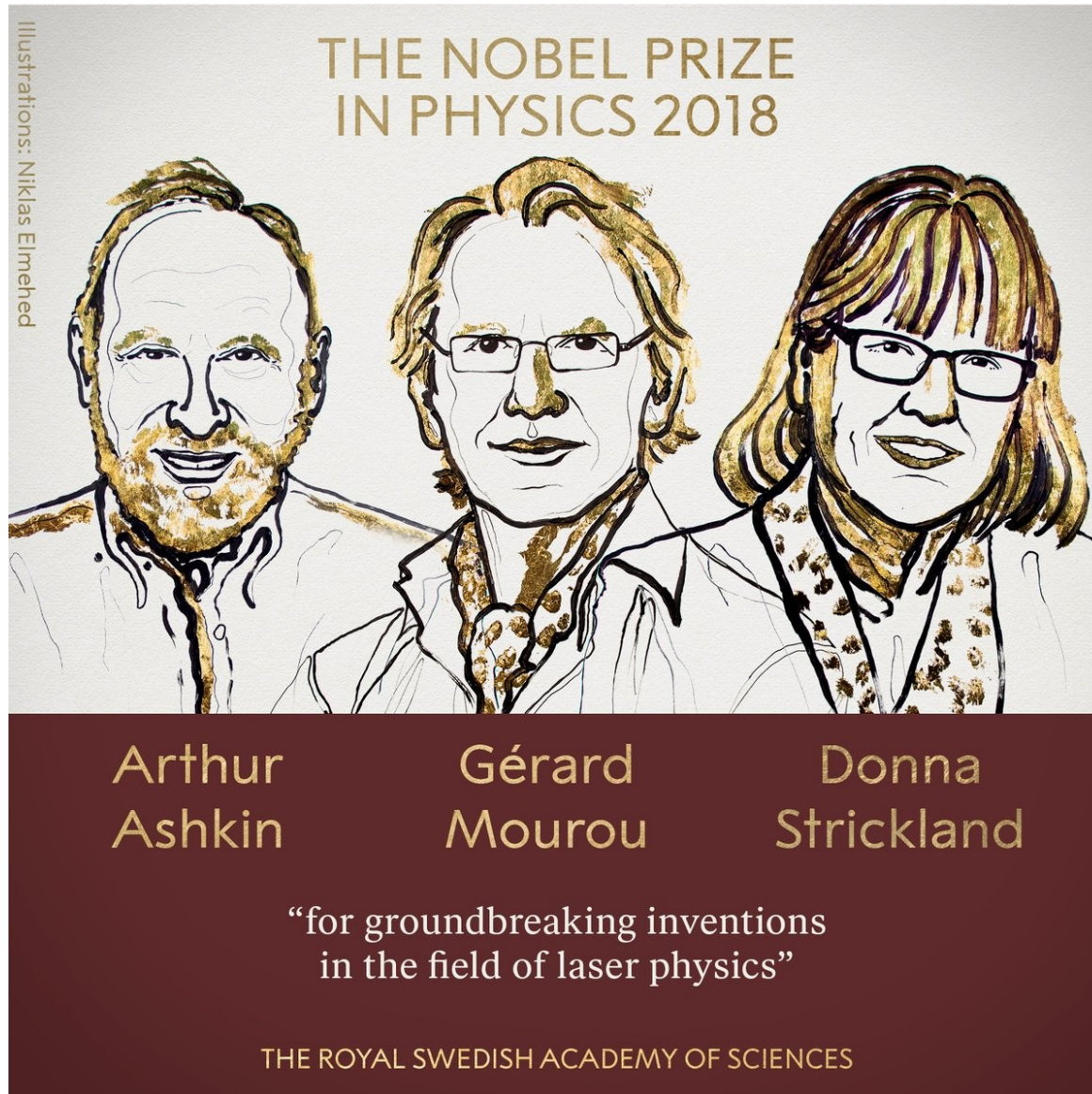
1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



Нобелевская премия по физике 2018 г.



Протонная терапия

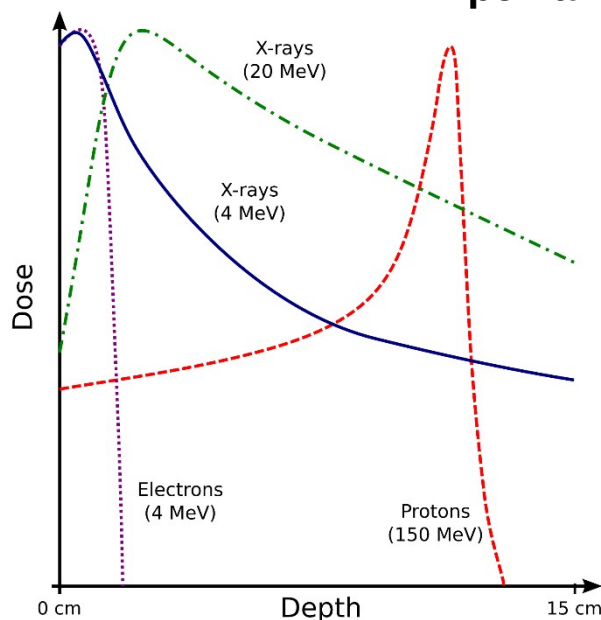
Облучение пучком протонов → уничтожение клеток больной ткани вследствие ионизации.

Большое число актов ионизации → (1) гибель клетки (повреждение внутриклеточных мембран, образование химически активных радикалов); (2) множественные повреждения ДНК → потеря способности клеток к размножению.

Торможение ионов в веществе. Характерная особенность зависимости энергосвечения от энергии иона (увеличивается с уменьшением энергии).

Пик Брэгга – узкая область максимального энергосвечения незадолго до остановки ионизирующей частицы.

Пик Брэгга



Энергия протонов в пучке от 70 до 250 МэВ → пробег в воде до 38 см.

Идея метода – 1946 г. (Р. Уилсон, США).

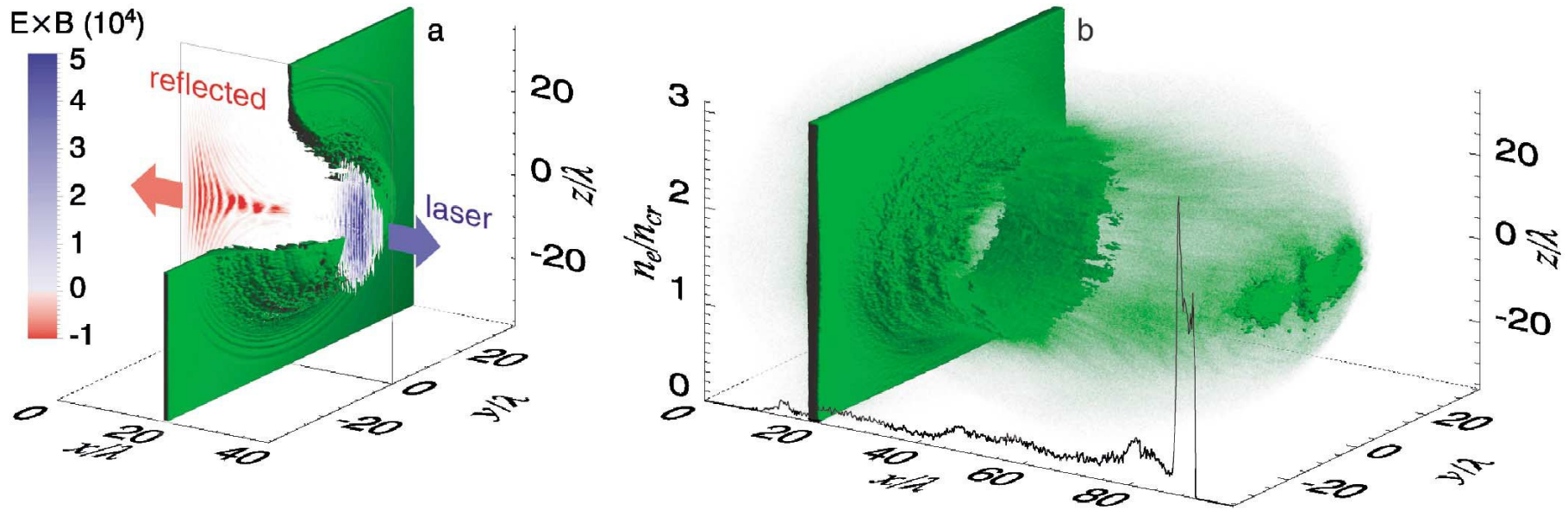
Первые эксперименты – 1954 (США), 1957 (Швеция).

СССР: 1967 г. (ОИЯИ, Дубна).

К 2023 г.: Во всём мире облучение протонами прошли более 300 тыс. пациентов.

2020 г.: В России протонная терапия для лечения онкозаболеваний включена в перечень для финансирования из средств Федерального фонда обязательного медицинского страхования.

Ускорение ионов световым давлением



T. Esirkepov, M. Borghesi, S.V. Bulanov, G. Mourou, and T. Tajima "Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime", Phys. Rev. Lett. 92, 175003 (2004);

A. Henig et al. "Radiation-pressure acceleration of ion beams driven by circularly polarized laser pulses", Phys. Rev. Lett. 103, 245003 (2009)

