

# Атомная физика

## Лекция 5

М.Ю. Рябиков

*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

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

Ньютона 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.

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

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<sup>2</sup> за 1 с).

Пусть площадка полностью отражает свет

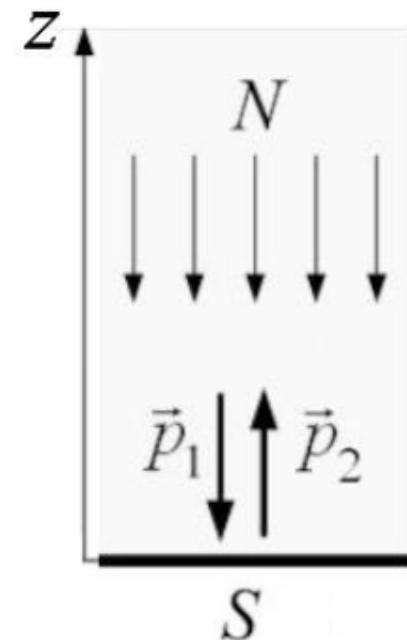
→ закон сохранения импульса →

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)

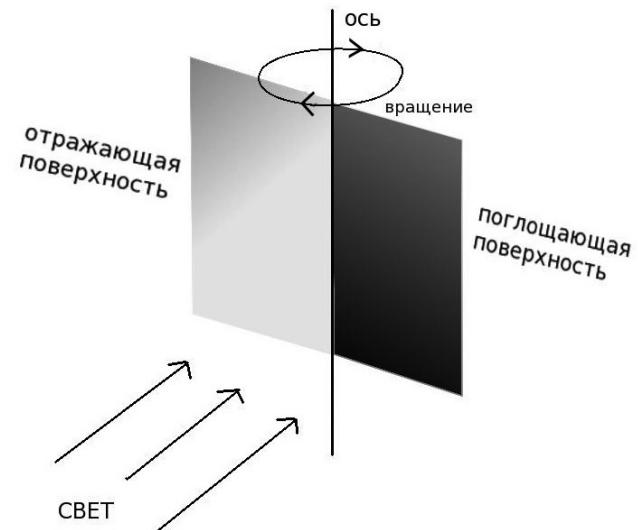
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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)

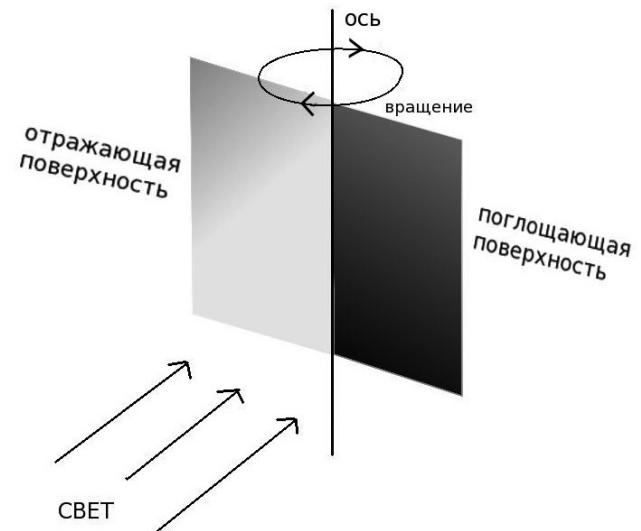
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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)



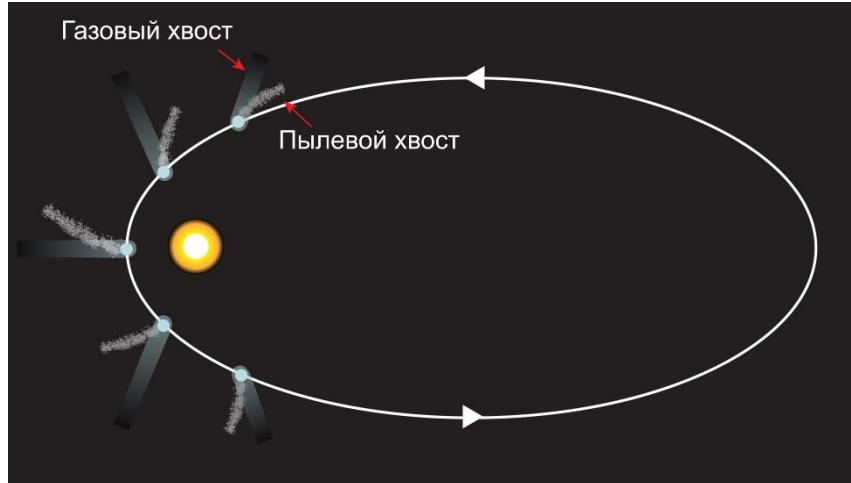
# Хвосты комет



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)

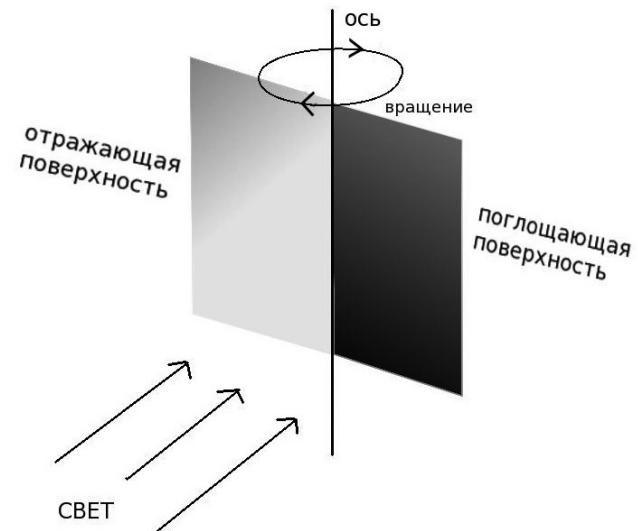
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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.)

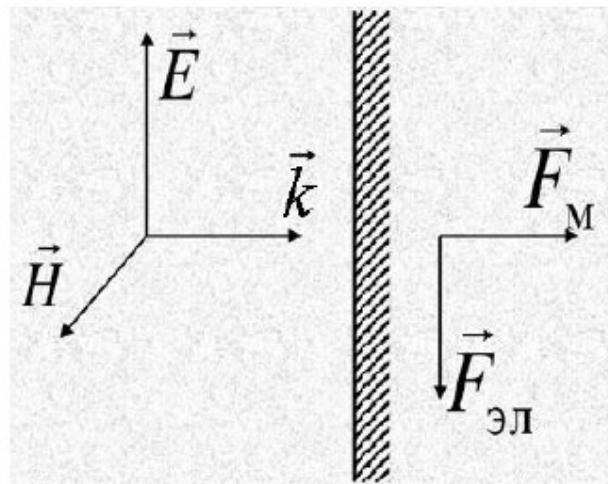
С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

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.



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

# 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)

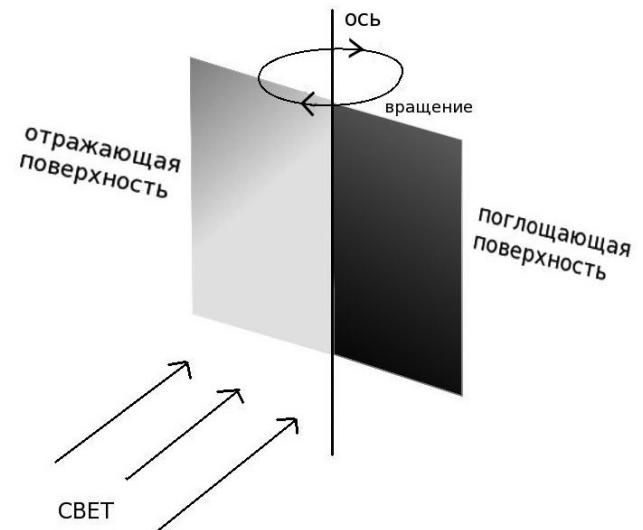
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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

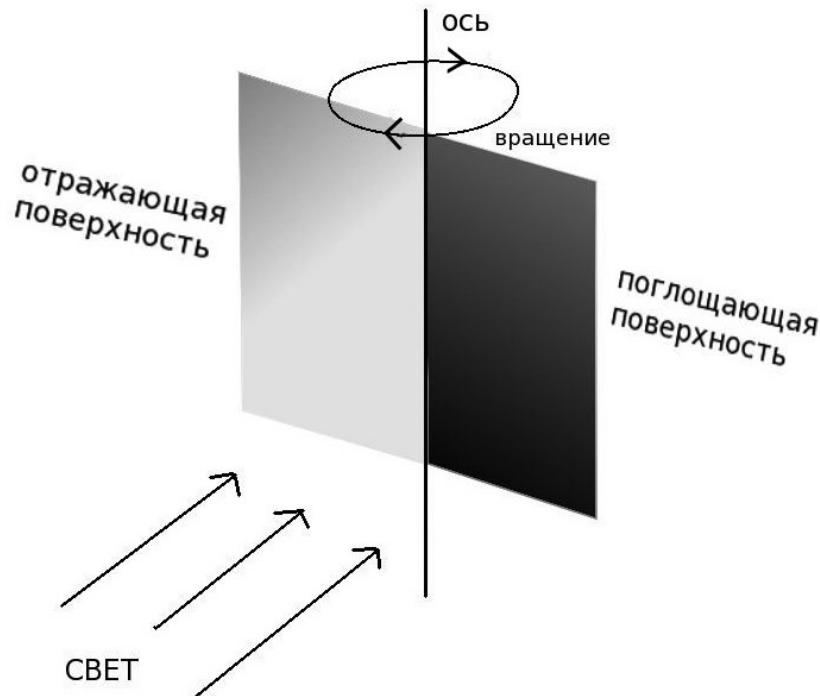
1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

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)

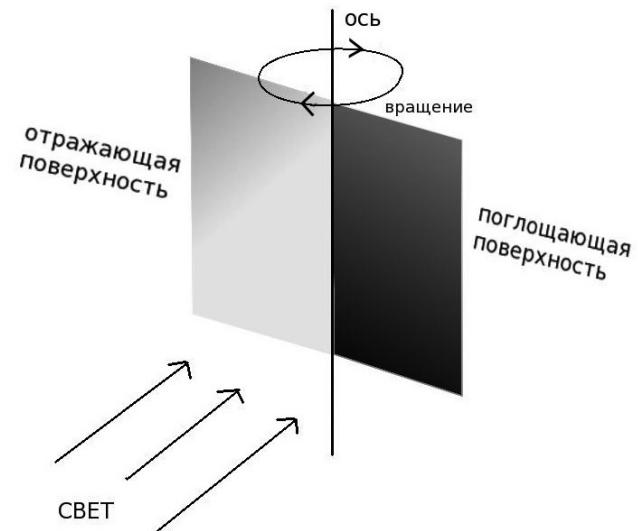
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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)



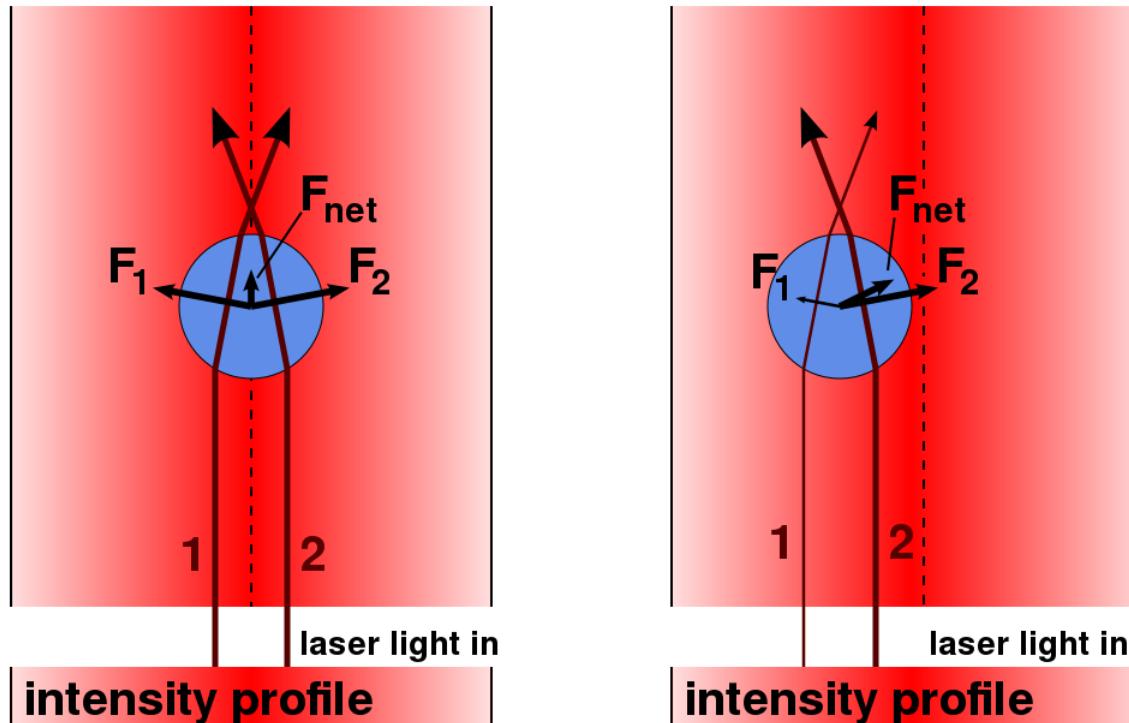
# **Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)**

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)

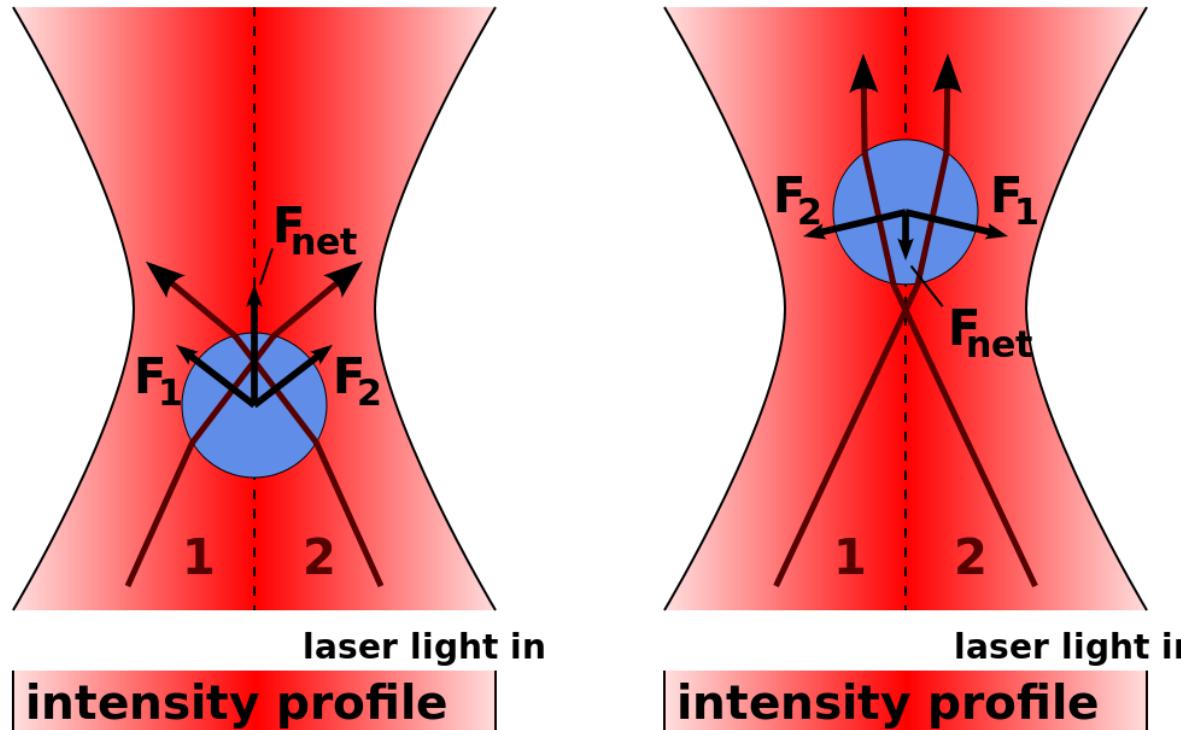
## Несфокусированный пучок



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

# Принцип лазерного пинцета (оптическая ловушка)

## Сфокусированный пучок



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)

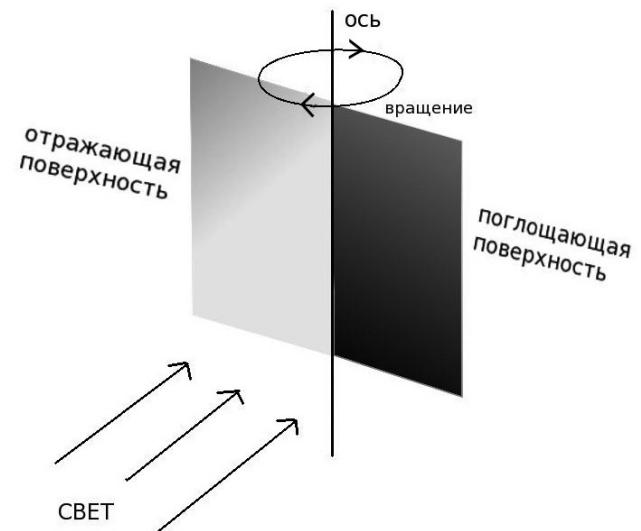
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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.)

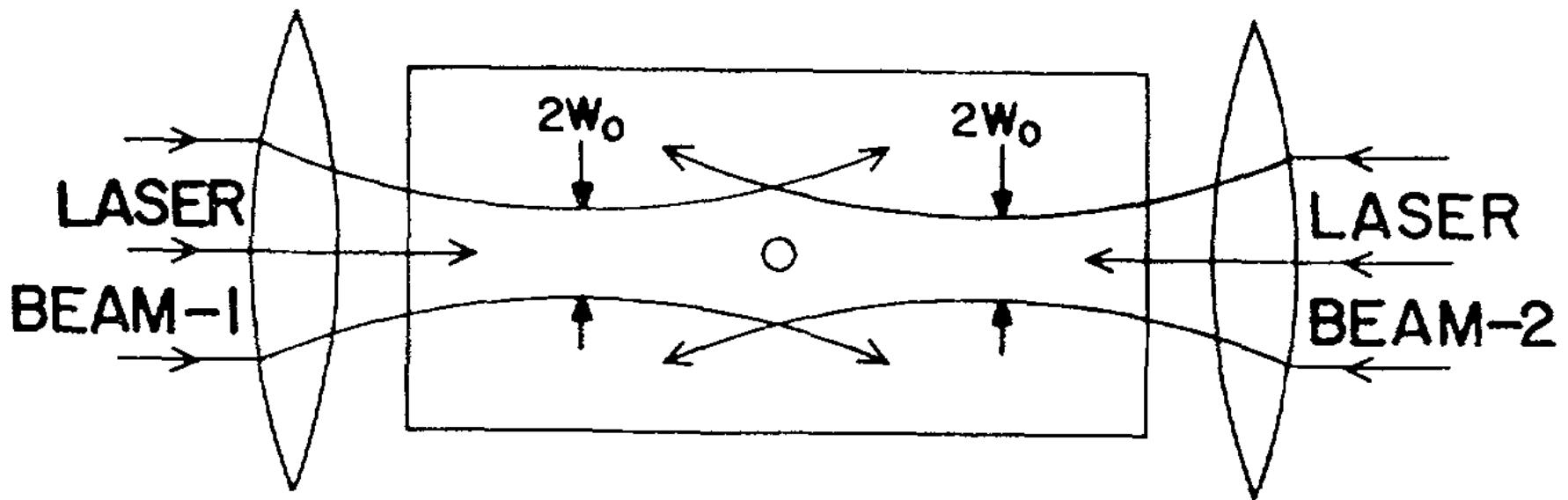
С 1985 г. – Эксперименты по лазерному получению сверххолодных атомов (С. Чу, У. Филлипс, К. Коэн-Таннуджи и др.) – Нобелевская премия по физике 1997 г.

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)

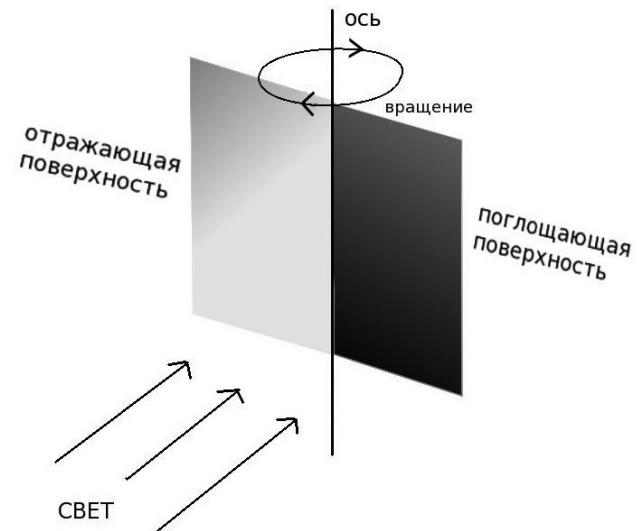
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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.

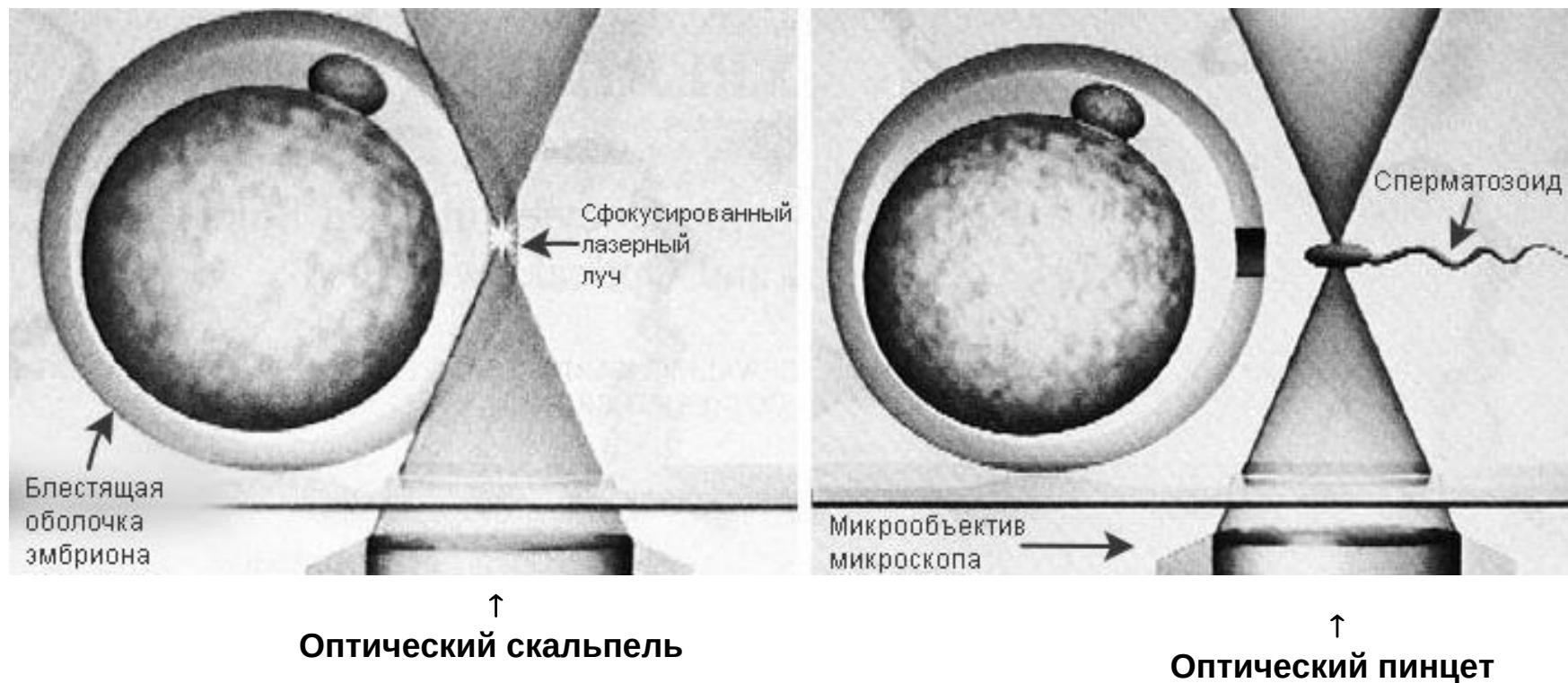
2018 г. – Нобелевская премия по физике за изобретение оптических пинцетов и применение их для изучения биологических систем (А. Эшкин)



# Оптические скальпели и пинцеты в эмбриологии (технологии искусственного оплодотворения)

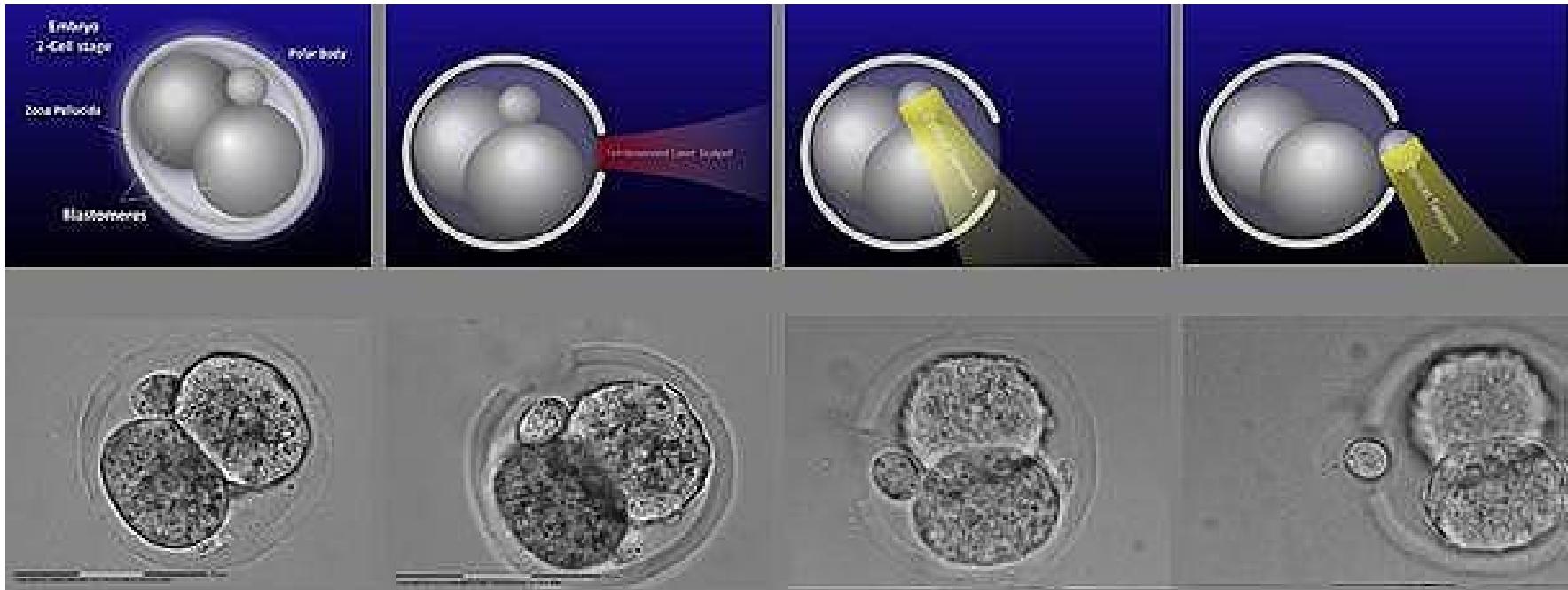
## Доставка сперматозоида в яйцеклетку

Диаметр человеческой яйцеклетки ~ 130 мкм



# 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)

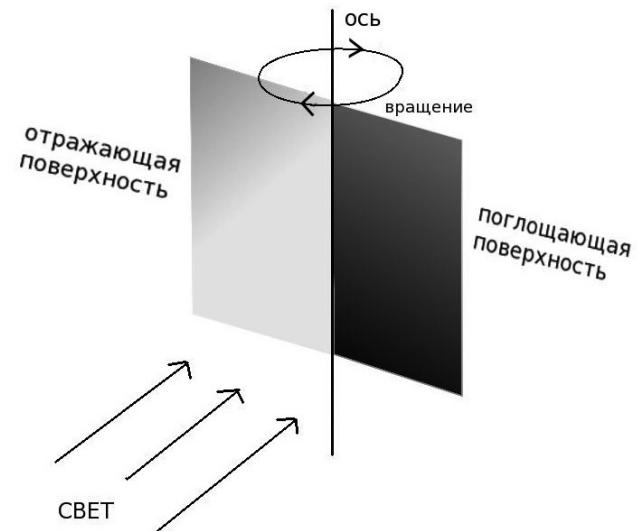
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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 – развел 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)

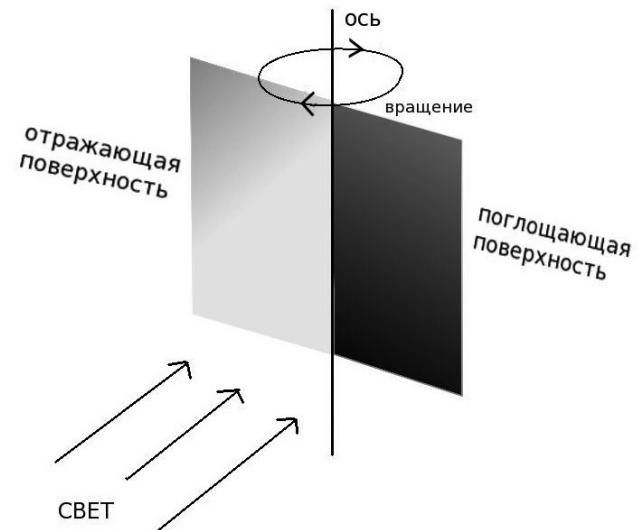
1970 г. – Описание действия на микрочастицы сил, связанных с рассеянием и градиентами интенсивности света (А. Эшкин)

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

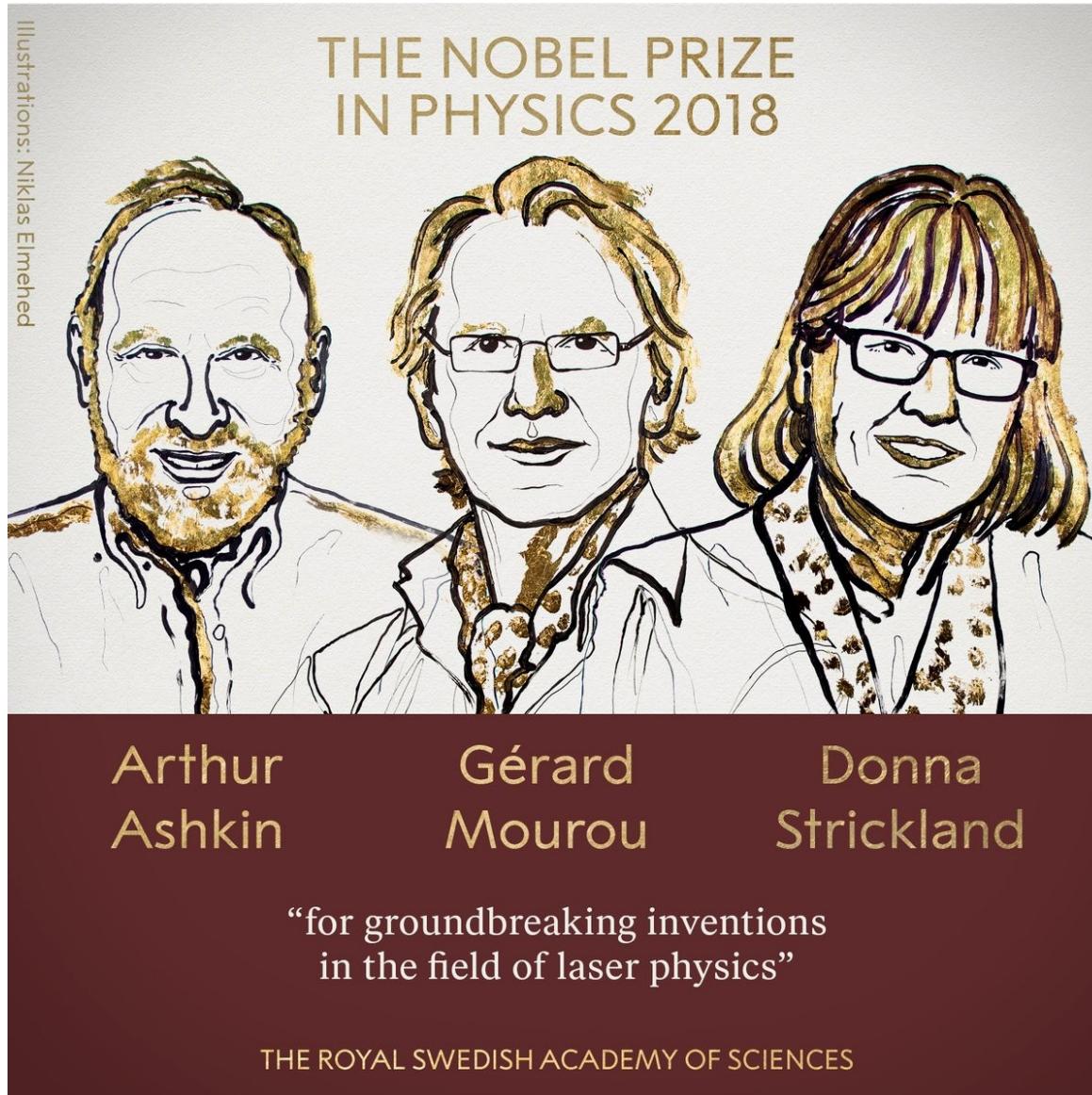
1987 г. – Экспериментальная демонстрация оптического захвата биологических микрообъектов – вирусов, бактерий (А. Эшкин и др.)

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.



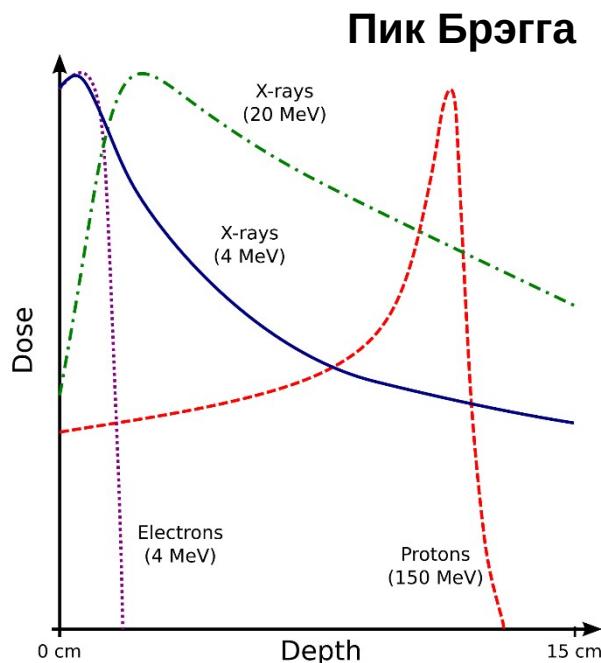
# Протонная терапия

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 энерговыделения от энергии иона (увеличивается с уменьшением энергии).

Пик Брэгга – узкая область максимального энерговыделения незадолго до остановки ионизующей частицы.



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

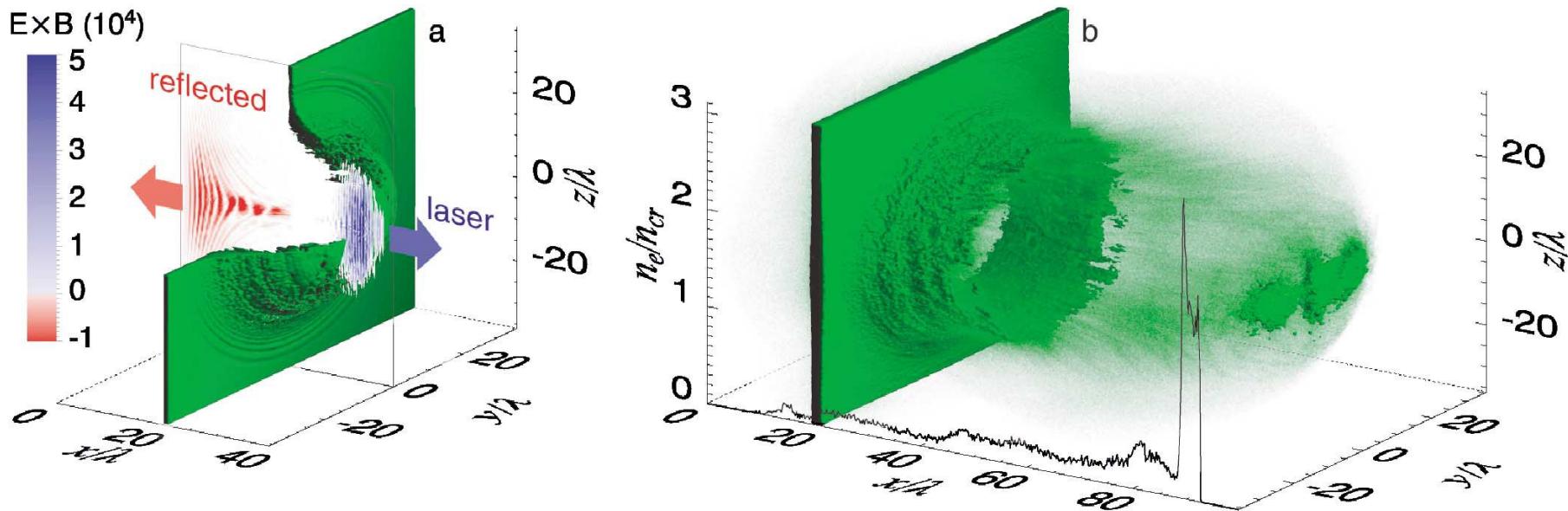
Идея метода – 1946 г. (Р. Уилсон, США).

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)

