

НОВОСТИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

К. Шварц¹, А. Даулетбекова², М. Сорокин³

¹ Центр по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца, Дармштат, Германия

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Световое давление: оптический пинцет и биология

1. Возрождение светового давления

Свет — это не только самый важный источник визуальной информации человека, но также канал знаний о Вселенной и микромире, открытый в начале 17 века посредством телескопа Галилео и микроскопа Левенгука. Солнечный свет на протяжении миллиардов лет способствовал возникновению и эволюции жизни на Земле, и даже сегодня фотосинтез растений является наиболее важным фактором существования человека на нашей планете.

Давление света впервые интуитивно предсказал немецкий астроном Иоганн Кеплер (*Johannes Kepler*, 1571–1630) в начале 17 века, наблюдая за сияющими хвостами комет, которые всегда отклонены от Солнца. Джеймс Клерк Максвелл (*James Clerk Maxwell*, 1831–1879), основатель теории электромагнетизма, более двухсот пятидесяти лет спустя доказал, что свет — это электромагнитная волна, которая, отражаясь или поглощаясь, оказывает давление на материю. Световое давление было экспериментально измерено в 1899 году профессором Московского университета Петром Николаевичем Лебедевым (1866 - 1912). Согласно теории Максвелла, световое давление определяется плотностью энергии излучения ($\text{Дж/м}^3 = \text{Н/м}^2$), и в двадцатом веке это явление было описано на языке квантовой физики.

Чтобы проиллюстрировать давление света, сравним его с атмосферным давлением. В солнечный день величина давления солнечного света составляет сто тысячных паскаля (точнее, $p_{\text{свет}} = 9 \times 10^{-6}$ Па, $1 \text{Па} = 1 \text{Н/м}^2$). Это соответствует силе в одну сотысячную ньютона (10^{-5} Н) на квадратный метр. Напомним, что один Ньютон — это сила, необходимая для поднятия объекта весом в сто грамм (для преодоления гравитации Земли). Давление света на Земле в десять миллиардов раз ниже давления атмосферы, которое составляет сто тысяч паскалей ($p_{\text{атм}} \approx 10^5$ Па), что соответствует силе в сто тысяч ньютонов (десять тысяч килограммов по весу или десять тонн) на квадратный метр! Мы не чувствуем атмосферного давления, потому что находимся в равновесии с окружающей атмосферой: давление вокруг нас и давление внутри тела (легких, носа, ушей) одинаковы.

Давление света на Земле действительно незначительно, хотя оно играет решающую роль в звездной эволюции: внутри Солнца давление света в миллиарды раз превышает атмосферное давление, и оно уравнивает гравитационное давление внутри Солнца, обеспечивая существование Солнца на миллиарды лет.

Фридрих Артурович Цандер (1887–1933), один из пионеров ракетостроения, первым выдвинул идею использования светового давления (солнечных парусов) в космической технике. Его именем названа Премия Российской академии наук за теоретические работы в области ракетно-космической техники.

В прошлом веке изобретение лазеров привело к созданию источников света с интенсивностью в сотни и тысячи раз большей, чем интенсивность солнечных лучей на Земле. Эти источники света открыли новые возможности применения светового давления не только в физике, но также в биологии и медицине. С помощью лазеров и оптических микроскопов американский физик Артур Эшкин (*Arthur Ashkin*, 1922-2020) разработал уникальный метод управления микрообъектами с помощью светового давления. За эти исследования «оптического пинцета» Артур Эшкин был удостоен Нобелевской премии по физике в 2018 году, через пятьдесят лет после своих решающих открытий.

2. Оптический пинцет: свет фиксирует бактерии, вирусы и макромолекулы

После защиты диссертации в Корнельском университете в 1952 году Артур Эшкин начал свою 40-летнюю карьеру в научном центре *Bell Labs Murray Hill*. Там ему пришла в голову

идея перемещать небольшие объекты с помощью давления света. Эту идею он увидел в популярном в то время мультфильме. Эшкин начал свои исследования, воздействуя под микроскопом зеленым светом ($\lambda = 514.5$ нм) аргонового лазера на прозрачные полимерные шарики диаметром 0.59, 1.31 и 2.68 мкм, взвешенные в воде. Сфокусированный луч света на шаре диаметром 2.68 мкм создает силу $F \approx 6.67 \times 10^{-10}$ Н = 0.667 нН (рис.1). Эти крошечные силы в биологическом микромире очень велики. Согласно закону Ньютона, ускорение частицы $[м/с^2]$ — это сила, деленная на массу ($a = F/m$), что при 0.667 нН дает величину $a \approx 7 \times 10^7$ м/с² — в миллионы раз больше, чем ускорение свободного падения на Земле ($g = 9.8$ м/с²)! Чтобы запустить ракету с искусственным спутником Земли, необходимо ускорение всего в пять раз больше силы тяжести Земли $a \approx 5g$! В биологическом микромире световое давление создает огромные силы.

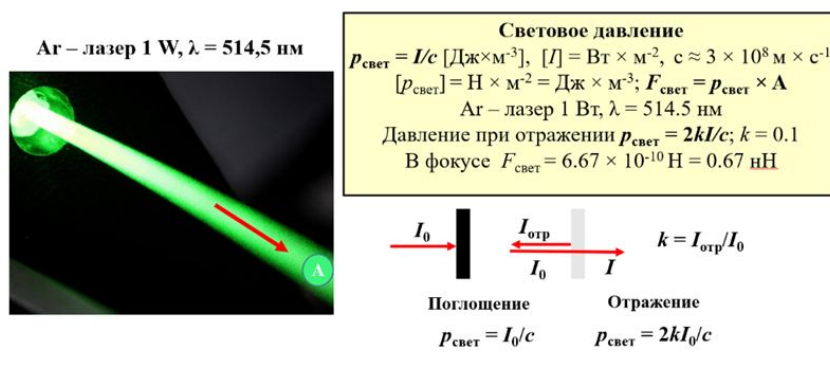


Figure 1 – Сфокусированный луч аргонового лазера создает силу $F_{\text{свет}} = 0.67$ нН ($1\text{нН} = 10^{-9}$ Н), достаточную для перемещения биологических объектов в клетках: бактерий, вирусов, макромолекул. При отражении световое давление пропорционально удвоенной интенсивности отраженного луча

В микроскоп Эшкин наблюдал движение шариков уже при интенсивности света в милливатты (рис.2). Он был удивлен, что некоторые шарики двигались в направлении, противоположном световому лучу - навстречу световому давлению. Интенсивность сфокусированного лазерного луча неоднородна - она соответствует «колоколообразной» кривой (гауссовское распределение) на площади диаметром в несколько микрон (рис.2б). Эшкин быстро понял, что направление движения зависит от положения частицы по отношению к максимуму интенсивности: частицы всегда движутся в направлении максимальной интенсивности (рис.2б)! Это означает, что наряду со световым давлением на шар в жидкой диэлектрической среде (воде) свет индуцирует дополнительные силы, превышающие световое давление. Эти силы, возникающие при взаимодействии света с прозрачной средой, были названы Эшкином градиентными силами и подробно описаны в следующих работах в зависимости от оптических свойств и размеров частиц [1]. Эшкин пришел к выводу, что микроскопические объекты легче захватываются и управляются при использовании двух лазерных лучей с противоположных сторон. В этом случае оптическая ловушка («оптический пинцет») находится между двумя сфокусированными лазерными лучами (Рис.3). Когда Эшкин заметил, что свет может захватывать и перемещать небольшие объекты, он сосредоточился на биологии и использовал оптический пинцет для обработки биологических объектов (клеток, бактерий, вирусов, макромолекул). Он обнаружил, что зеленый свет аргонового лазера убивает бактерии. Поэтому для биологических объектов Эшкин применил инфракрасный лазер YAG-Nd³⁺ с длиной волны 1064 нм, который не вызывает повреждений клеток и не убивает бактерии [2]. Уже в первой публикации 1970 г. [1] Эшкин назвал фиксацию микроскопических объектов с помощью света «оптическим пинцетом» и этот термин вошел в научную литературу. Оптический пинцет можно использовать для бесконтактной манипуляции микро- и наночастицами: удерживать, перемещать или даже вращать микроскопические объекты.

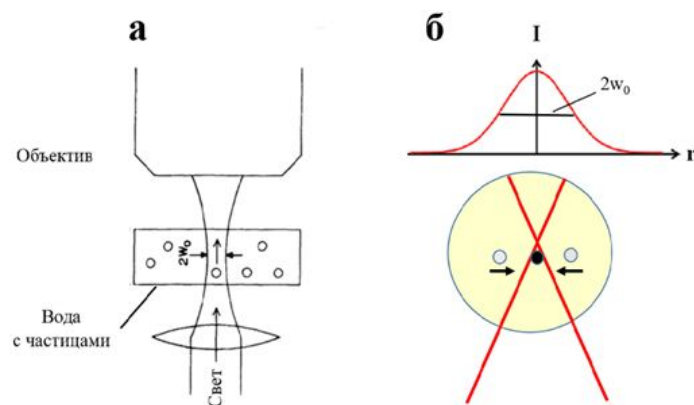


FIGURE 2 – Схема эксперимента по улавливанию микрочастиц сфокусированным лазерным лучом: а - лазерный свет направлен снизу на подвешенные шарики; б - распределение интенсивности света в лазерном луче $I(r)$. Частица всегда движется в направлении максимальной интенсивности, пока не достигнет положения равновесия (черный шарик). $2w_0$ - полуширина интенсивности лазерного луча в сфокусированном луче размером в несколько микрометров [1]

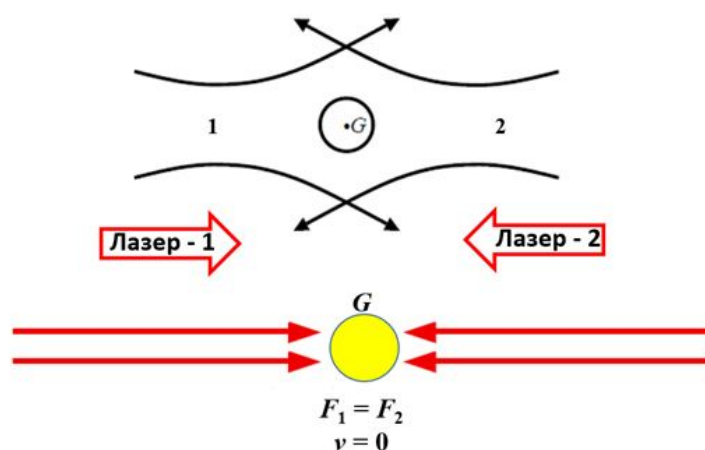


FIGURE 3 – Захват частиц двумя лазерными лучами

Оптический пинцет Эшкина позволил изучать процессы в живых клетках под микроскопом, что привело к взрывному росту исследований в биологии и медицине. В оптическом микроскопе дифракция света позволяет наблюдать объекты с размерами не менее длины волны $\lambda \approx 0.5$ мкм. Чтобы обойти это ограничение и улучшить разрешение микроскопа, используется люминесценция или флуоресценция объекта (термин «флуоресценция» происходит от минерала флюорита (CaF_2) с его характерным синим свечением при возбуждении ультрафиолетом). Первый флуоресцентный микроскоп был разработан профессором Августом Келером (August Kohler, 1866–1948) в 1908 году в компании *Carl Zeiss*. Сегодня флуоресцентная микроскопия широко используется в биологии и медицине, обеспечивая разрешение 100 нм (со сканирующим лазерным люминесцентным микроскопом до 50–10 нм).

Свечение живых организмов, например, свечение светлячков, наблюдается с древних времен. Биологи также наблюдали под микроскопом свечение некоторых бактерий и белков. Однако такая естественная биолюминесценция на клеточном уровне встречается довольно редко. Во второй половине прошлого века флуоресцентная микроскопия разработала методы анализа живых клеток с помощью люминесцентных зондов - органических красителей, которые вводятся в клетку и селективно связываются с клеточными элементами (белками, хромосомами, молекулами ДНК и др.) и превращают эти элементы в люминесцентные (так

называемые «клеточные маяки»). Были разработаны методы с различными люминесцентными красителями, которые избирательно маркируют отдельные элементы клетки. Например, флуоресцин ($C_{20}H_{12}O_5$) с зеленой флуоресценцией используется для индикации белка.

Для возбуждения люминесценции требуется источник света с длиной волны ($\lambda_{возб}$), которая меньше длиной волны люминесценции (λ_{lum}). Для этого используется стандартная лампа накаливания со светофильтрами или различные светодиоды с узким спектром излучения. Для наблюдения люминесценции используется темный фон, что обеспечивает лучший контраст.

В Университете Билефельда (Германия) был разработан новый метод с использованием оптического пинцета для наблюдения за клетками с очень высоким разрешением. Объекты – кишечные палочки (*Escherichia coli*) с макромолекулами ДНК -фиксируются оптическим пинцетом (рис.4). Важно то, что объект можно поворачивать и наклонять в разные стороны, что дает возможность получить трехмерное изображение. Для лучшего разрешения использовали флуоресцентную микроскопию. Группа биофизиков профессора Томаса Хусера (*Thomas Huser*) планирует и дальше развивать этот метод, чтобы наблюдать молекулярные процессы в живых клетках, включая активность бактерий в обмене веществ и болезнях, путем наблюдения за тем, как бактерии проникают в клетку.

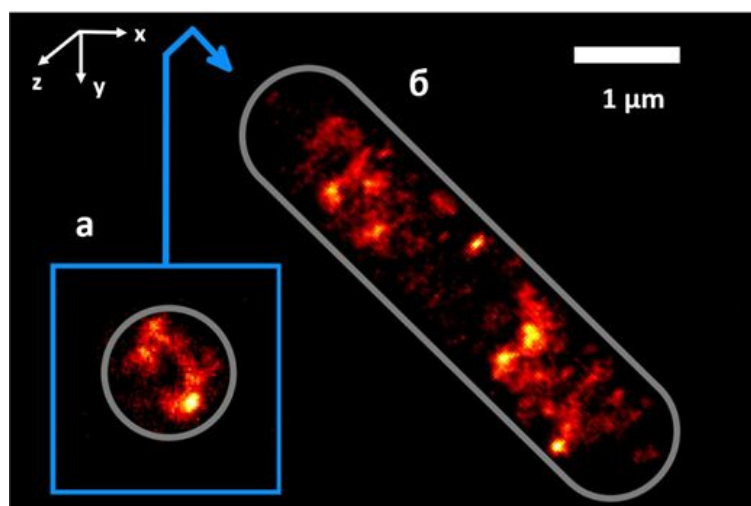


FIGURE 4 – Макромолекулы ДНК кишечных палочек (*Escherichia coli*) в флуоресцентном микроскопе высокого разрешения (100 нм). Молекулы ДНК фиксируются и поворачиваются оптическим пинцетом: а – изображение в направлении y; б – изображение в направлении x[3]

Следует особо отметить активность Эшкина в практическом применении своих результатов: он является автором 47 патентов, способствующих использованию этих методов в производстве промышленной аппаратуры. Через несколько лет после публикаций Эшкина «оптические пинцеты» в микроскопе уже производились промышленным способом.

3. Сюрприз: Нобелевская премия по физике 2018 года

Корпорация *Bell Labs* предоставила Артуру Эшкину, выходящему на пенсию в 1992 году, возможность получить экспериментальное оборудование и организовать лабораторию в своем жилом доме, где он продолжал проводить исследования. Супруга Эшкина, Алина, ответила на телефонный звонок корреспондента: «Он был очень удивлен Нобелевской премией. Так много времени прошло с 70-х годов, когда он разработал эту технологию. Он давно работает с солнечными батареями и в настоящее время готовит научную публикацию» [4].

Эшкину позвонил Адам Смит (*Adam Smith*), пресс-секретарь Нобелевского комитета, и сообщил о присуждении премии. В последующем телефонном интервью Артур Эшкин отметил, что с детства интересовался физикой - его любимой книгой в детстве была «Почему?» (*I Wonder Why*). Идеалы Эшкина в науке – это голландец Левенгук, который первым увидел живые клетки, и Майкл Фарадей с его гениальными открытиями от электролиза до

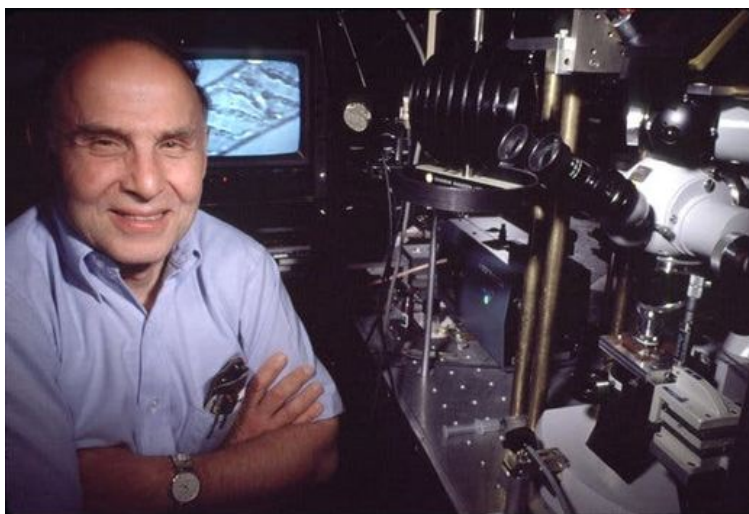


FIGURE 5 – Артур Эшкин в 70-е годы во время экспериментов с оптическим пинцетом

электромагнетизма и оптики. Световым давлением Эшкин интересовался еще во время учебы в Колумбийском университете. О своей главной публикации он сказал: «Я давно интересовался фотографированием макромолекул и других клеточных элементов с помощью света. Статья в *Physical Review Letters* в 1970 году [1] - лучшее, что я когда-либо написал. Интуитивно я полагал, что этот метод вызовет революцию в биологии и медицине» [5]. Маркус Вельде (*Marcus Welde*), директор *Bell Labs*, говорит об Эшкине: «Великие мыслители никогда не останавливались, и Эшкин все еще пытается решить текущие проблемы, несмотря на свою Нобелевскую премию. И поэтому я люблю его».

Список литературы

- 1 Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Phys. Rev. Lett.* - 24. - 1970. - P. 156 – 159.
- 2 Ashkin A. J.M.Dziedzic, Y. Yamane. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams // *Nature.* - 330. - 1987. - P. 769 – 771.
- 3 Diekmann R., Wolfson D.L., Spahn Ch., Heilemann M., Schuttpelz M., Huser T. Nanoscopy of bacterial cells immobilized by holographic optical tweezers // *Nature communications* 7, Article number: 13711. - 2016.
- 4 Arthur Ashkin Interview. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/ashkin/interview/> (дата обращения: 07.04. 2021)

Сведения об авторах:

Шварц К. - академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца), Дармштадт, Германия.

Даулетбекова А.К. - кандидат физико-математических наук, профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Нур-Султан, Казахстан.

Сорокин М. - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

Schwartz K. - Academician of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

Dauletbekova A. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukhan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Sorokin M. - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.