1973 г. Май *Том 110, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

535.214(023)

ДАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *)

А. Эшкин

Силы, вызываемые сфокусированным лазерным светом, достаточно велики для ускорения крошечных частиц вещества в различных средах. Предлагается несколько применений, основанных на этом недавнем открытии.

Хорошо известно, что свет переносит энергию. Менее очевидно, что свет переносит также импульс. Когда мы греемся на солнце, мы хорошо чувствуем тепло, но не испытываем никакого давления. Тем не менее верно, что обычный свет при падении на предмет приводит к появлению небольшой силы, действующей на него. Эта сила называется световым давлением.

Идея о возможности светового давления восходит к Кеплеру, который в 1619 г. постулировал, что световое давление является той силой, которая определяет положение хвоста кометы всегда в сторону от солнца. Корпускулярная теория света, предложенная Ньютоном, сделала идею светового давления более правдоподобной и стимулировала многочисленные попытки его экспериментального измерения. В XVIII и XIX веках все попытки обнаружить световое давление или силу, которая не могла бы быть приписана конвекции в воздухе, окончились неудачей. В 1873 г. Уильям Крукс полагал, что открыл световое давление в частично эвакуированной камере, хотя в действительности он изобрел радиометр. (Маленькая игрушка с вращающимися лопастями, которую можно увидеть во многих оптических лабораториях, и представляет собою радиометр.) Он регистрирует силы молекулярной бомбардировки поверхности, нагретой светом, а не световое давление. Эти тепловые силы были названы радиометрическими силами. В том же 1873 г. Максвелл предсказал величину светового давления, исходя из своей новой теории электромагнитных волн. Предсказанное давление было исключительно мало для обычных источников света. В экспериментах Крукса, например, оно было на четыре-пять порядков меньше наблюдаемых радиометрических сил.

Существование светового давления, свободного от возмущающих тепловых эффектов, было, наконец, экспериментально доказано в начале нашего века Лебедевым в России и Николсом и Хэллом в США. В обоих экспериментах световое давление детектировалось по отклонению лопасти, подвешенной на тонкой нити в глубоком вакууме. Величина силы, измеренной этим способом, находилась в согласии с предсказанием Максвелла.

---

*) Arthur Ashkin, The Pressure of Laser Light, Scientific American **226** (2), 63 (1972). Перевод В. М. Сутовского.

Доктор Артур Эшкин является руководителем исследовательского отдела физической оптики и электроники лабораторий «Белл телефон».

В своем президентском приветствии Британскому физическому обществу в 1905 г. Пойнтинг говорил о световом давлении: «Очень маленький опыт в попытках измерить световое давление достаточен, чтобы осознать его крайнюю малость — малость, которая исключает его из рассмотрения в земных делах». Оценка ситуации, данная Пойнтингом, оставалась верной до совсем недавнего времени. Описанные здесь эксперименты, которые показывают, что явление светового давления действительно заслуживает «рассмотрения в земных делах», не могли быть проведены до изобретения лазера в 1960 г.

Лазер открыл новые области оптических исследований и омолодил старые. Особыми свойствами лазерного света, которые вызвали эти изменения, являются высокая спектральная чистота и пространственная когерентность. Помимо всего прочего, эти свойства позволяют фокусировать лазерный луч в пятно с радиусом, близким к теоретическому пределу, равному одной длине волны. Таким образом, при мощности в несколько ватт можно получить на одной длине волны интенсивность, примерно в 10 000 раз бóльшую интенсивности всего видимого спектра поверхности Солнца. Более того, лазерный пучок обладает простым, математически идеальным профилем интенсивности, называемым поперечной модой. Наиболее полезная мода имеет поперечное сечение с обычным гауссовским или колоколообразным распределением энергии. Другим важным достижением было создание перестраиваемых лазеров, при помощи которых можно по желанию выбирать рабочую длину волны.

Световое давление недавно было вновь рассмотрено в свете новых достижений лазерной техники и было показано, что оно имеет большое значение. Действительно, оказалось, что силы, вызываемые лазерными источниками, достаточно велики для перемещения маленьких частиц в различных средах. Как для крошечных макроскопических частиц, так и для отдельных атомов и молекул при использовании лазеров непрерывного действия возможны ускорения, в миллион раз превосходящие ускорение свободного падения g. Эти находки дали толчок новым приложениям, использующим движение маленьких частиц под действием светового давления. Уже установлено, что эта весьма экзотическая сила обладает рядом уникальных свойств, некоторые из которых не были известны ранее, а некоторые вытекают из природы самого лазерного света. Вот некоторые из возможных приложений: разделение частиц в жидкости, оптическая левитация частиц в воздухе и в вакууме, ускорение до больших скоростей электрически нейтральных частиц, разделение изотопов и анализ атомных пучков.

Отправной точкой этой работы было ощущение автора, что давление лазерного света может быть существенным даже при умеренных мощностях лазеров непрерывного действия. Был проведен следующий простой оценочный расчет. Предположим, что лазерный свет в зеленой области спектра (с длиной волны около 0,5 *мкм*) мощностью 1 *вт* фокусируется в пятно с радиусом, равным длине световой волны. Какова сила, действующая на маленькую сферическую частичку такого же размера, помещенную в фокус? Если предполагать, что частица действует как идеальное зеркало, расчет дает силу, равную приблизительно 10^{-3} *дин*. Если частица имеет единичную плотность, ее масса равна примерно 10^{-12} *г*. По закону Ньютона этим величинам соответствует ускорение в миллион раз больше ускорения свободного падения.

Такие расчеты наводят на мысль попытаться использовать световое давление для перемещения маленьких частиц. Предполагалось использовать металлические частички с высоким коэффициентом отражения, но в этом случае даже при коэффициенте отражения, равном 98%, оста-

точное поглощение, равное 2%, вызывало бы сильный нагрев, возможно даже плавление. Здесь снова встают тепловые проблемы, погубившие ранние эксперименты. Выход из создавшегося положения казался очевидным — использовать прозрачные диэлектрические частицы. Хотя коэффициенты отражения диэлектрических поверхностей, таких как стекло или пластмасса, относительно малы, силы все же значительны.

В следующем эксперименте, выполненном в нашей лаборатории, использовались маленькие прозрачные пластмассовые частички с высокой степенью сферичности, изготовленные химической компанией «Доу». Это вещество обычно поставляется в воде, и поэтому представлялось естественным провести первый опыт в воде. Помимо этого, высокая оптическая прозрачность и высокая теплопроводность воды позволила бы поддерживать частички холодными. Несколько капель воды, содержащих некоторое количество частичек, были помещены под микроскопом в стеклянную ячейку, просвечиваемую снизу сфокусированным лучом ионного аргонового лазера. При использовании специальных очков, поглощающих только лазерный свет, можно было наблюдать частички в обычном свете. Лазерный пучок был видим за счет вызываемой им желтой флуоресценции. Следовательно, не представляет труда видеть пучок, фокусировать его и управлять им, перемещая фокусирующую линзу. Так как пластмассовые сферы имеют такую же плотность, как и вода, они остаются неподвижными, как фиксированные мишени. Когда лазерный луч диаметром 15 *мкм* с гауссовским распределением интенсивности и мощностью около 10 *Мвт*, направленный вертикально вверх, попадал на частичку с поперечным сечением в несколько микрон, она начинала подниматься с постоянной скоростью 10 *мкм/сек*, пока не достигала верхней части ячейки. (Частица, движущаяся в вязкой среде под действием постоянной силы, должна двигаться с постоянной скоростью в согласии с законом Стокса.)

Итак, частички двигались. Оставалось несколько вопросов. Например, действительно ли движение происходит за счет светового давления или вследствие остаточных тепловых эффектов, таких как конвекция и фотофорез. В случае конвекции двигалась бы вся жидкость, перенося с собой частицы. В случае фотофореза отдельные частицы нагревались бы светом асимметрично и в результате они двигались бы относительно окружающей среды.

Чтобы ответить на эти вопросы, был осуществлен второй эксперимент с двумя модификациями. Одновременно использовались частички двух размеров диаметром 2,5 и 0,5 *мкм*, а луч проходил через ячейку горизонтально. Таким образом, если жидкость, через которую проходит луч, нагревается, она будет скорей подниматься, а не течь вдоль оси светового луча. Оказалось, что частички снова двигались вдоль светового луча, но только теперь более крупные частички двигались быстрей, обгоняя маленькие частички (рис. 1). Это наблюдение само по себе исключает конвекцию как причину движения.

Кроме того, наблюдалось, что когда частичка достигает дальней плоскости ячейки, она остается там, удерживаясь в центре пучка. Если луч прерывался, частичка начинала уходить из центра. Если свет снова включался, когда частичка была в полосе света, она немедленно притягивалась к центру луча. Подобным образом, если частичка, находящаяся в толще жидкости, была смещена относительно светового пучка, наблюдалось движение не только в направлении луча, но также по направлению к центру луча, где интенсивность света была максимальной (рис. 2). Отсюда можно было сделать вывод, что существует не только сила, направленная вдоль луча, но и поперечная сила, увлекающая частички к центру светового луча.

Это наблюдение помогло исключить фотофорез как причину наблюдаемого движения частиц. При фотофорезе сила, действующая на горячую сторону частиц, больше силы, действующей на холодную сторону, и поэтому частица, расположенная вне центра пучка, должна была бы

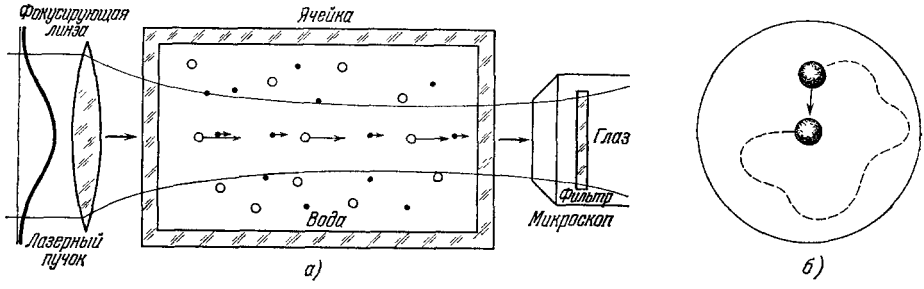


Рис. 1. Лазерный пучок, сфокусированный в горизонтальном направлении, воздействует на прозрачные пластмассовые сферы двух размеров диаметром 2,5 и 0,5 *мкм*, помещенные в наполненную водой ячейку.

Сферы большего размера движутся быстрей, чем сферы малого диаметра (*а*). Движение частиц наблюдается со стороны дальнего конца ячейки при помощи микроскопа и фильтра, поглощающего лазерный свет. Таким способом можно наблюдать захват частицы на дальней плоскости ячейки (*б*). Сфера, первоначально захваченная в центре пучка, при выключении пучка движется в произвольном направлении и возвращается точно в центр пучка при включении лазера. Лазерный пучок имеет гауссовское распределение интенсивности (жирная колоколообразная кривая в левой части рис. *а*).

выталкиваться из него, в противоположность тому, что наблюдается на опыте. Кроме того, при фотофорезе частично прозрачная частица, нагреваясь лучом, двигалась бы в сторону, противоположную направлению света, что опять противоречит опыту. (Это «заднее» движение, названное отрицательным фотофорезом, можно непосредственно наблюдать, освещая лазерным светом частично прозрачные частицы дыма, плавающие в воздухе. Объясняется это явление фокусировкой света, проходящего через частицу, что приводит к нагреву ее передней стороны.)

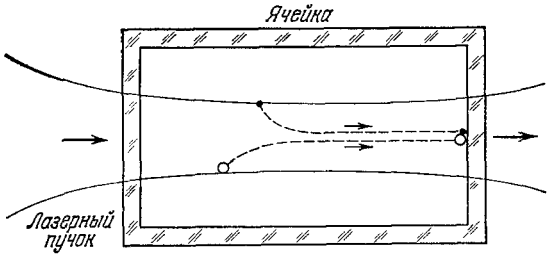


Рис. 2. Частички, находящиеся на краю лазерного пучка с гауссовским распределением, движутся не только вдоль пучка, но и втягиваются в центр пучка.

Теперь остается показать, как описанные наблюдения объясняются световым давлением. Величина силы, действующей на пластмассовую сферу, может быть найдена путем суммирования действия всех световых лучей, попадающих на частицу. Каждый луч, частично отражаясь и частично преломляясь на поверхности сферы, рассеивает часть света в различных направлениях и дает вклад в результирующую силу. По величине силы, действующей на частицу, находящуюся на оси светового пучка при использовании закона Стокса, можно рассчитать ожидаемую скорость сферы в воде. Расчетная скорость согласуется с измеренными скоростями в пределах ошибки эксперимента. Уже одно это совпадение показывает, что нет других больших сил.

Аналогично можно показать, как поперечные компоненты силы действуют на сферу, расположенную вне оси пучка с гауссовским распределением интенсивности. Представим себе пучок света падающим на пластмассовую сферу с показателем преломления, большим, чем у окружающей

среды (рис. 3). Рассмотрим типичную пару световых лучей, a и b, расположенных симметрично по отношению к центру сферы. Пренебрежем поверхностным отражением и рассмотрим только прошедшую часть каждого луча, так как это обычно бóльшая часть и она дает основной вклад в силу. Лучи искривляются таким образом, что возникают две силы F_a и F_b, направленные вдоль изменения импульса лучей. Так как луч a сильнее луча b, сила F_a больше F_b и следует ожидать появления поперечной силы, толкающей сферу, обладающую высоким коэффициентом преломления, по направлению к центру пучка, где интенсивность максимальна. Именно это и происходит в действительности.

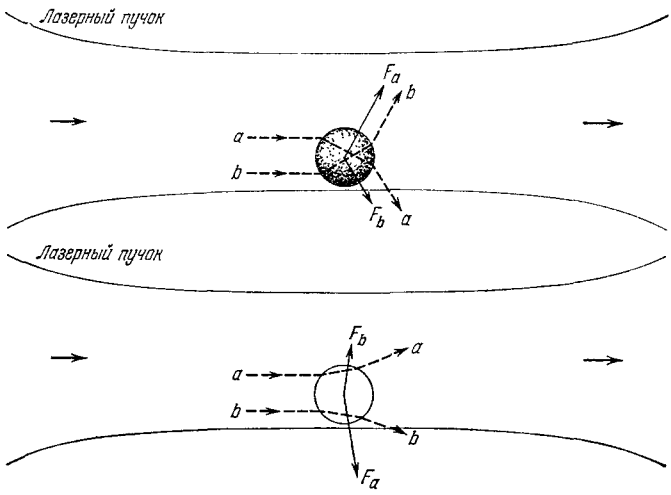


Рис. 3. Относительный коэффициент преломления частички определяет, будет ли лазерный луч втягивать ее или выталкивать.

На верхнем рисунке показаны силы, связанные с преломлением пары типичных световых лучей (a и b) при прохождении через сферу, расположенную на краю пучка и у которой коэффициент преломления больше, чем у окружающей среды. Сила F_a больше F_b, поэтому существует результирующая поперечная компонента силы, направленная в центр пучка. На нижнем рисунке показаны соответствующие силы для сферы с коэффициентом преломления меньше, чем у окружающей среды. Так как F_a все же больше F_b, но теперь направлена от центра, имеется результирующая поперечная сила, выталкивающая сферу из центра пучка. В обоих случаях F_a и F_b имеют также компоненты, толкающие сферу вдоль пучка.

Существует очевидное развитие этого объяснения. Если бы сфера имела коэффициент преломления более низкий, чем окружающая среда, силы F_a и F_b поменялись бы местами и такая сфера должна была бы выталкиваться из пучка, т. е. из области с максимальной интенсивностью света. Это также наблюдается на опыте. После тщетных поисков частиц с низким относительным показателем преломления мне пришло на ум использовать маленькие пузырьки воздуха в вязкой жидкости, например глицерине. В конечном счете пузырьки ведут себя подобно частицам и, кроме того, на поверхности пузырька имеется скачок показателя преломления, из-за чего свет должен вызывать силу, действующую на него. Более того, пузырек представляет собой предельный случай непоглощающей частицы с наименьшим возможным коэффициентом преломления. Маленькие пузырьки нужного размера можно получить, если взбалтывать глицерин, смешанный с водой. Когда на пузырьки падает лазерный свет, они двигаются, как и следовало ожидать, вперед и в сторону от лазерного луча. Они уходят из световой зоны, в отличие от частиц с высоким коэффициентом преломления.

Теперь картина появления поперечной силы полная. Представляется возможным подобрать такую форму светового пучка, который будет

захватывать частицы, образуя так называемую «световую бутылку». Частицы, имеющие высокий коэффициент преломления, помещенные в некоторой точке такого нематериального сосуда, должны были бы находиться в устойчивом равновесии, так как любое смещение приводило бы к появлению возвращающей оптической силы. Когда световая конфигурация этого типа была реализована в водяной ячейке, частицы, дрейфующие в пограничную область, всасывались в ловушку, где они оставались постоянно (рис. 4). Тот факт, что частица действительно захватывается, демонстрировался при временном выключении одного пучка.

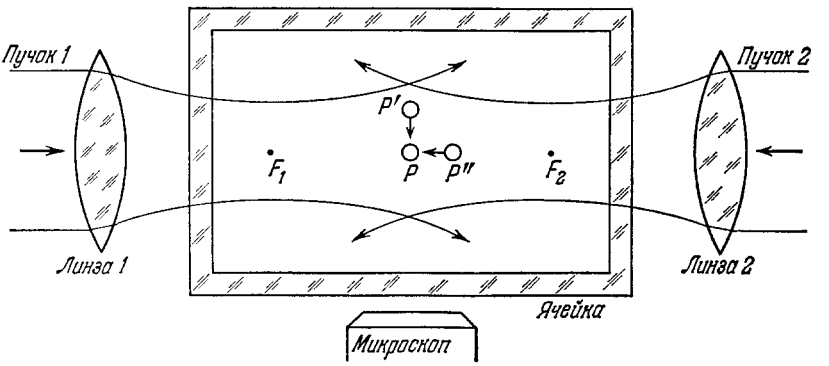


Рис. 4. Показанная на диаграмме «оптическая бутылка» создается двумя встречными лазерными пучками с гауссовским распределением интенсивности.

Точки F_1 и F_2 представляют собой фокусы пучков *1* и *2*, т. е. места наименьшего диаметра пучков. За фокусом пучки расходятся за счет дифракции. Сфера, помещенная в центр симметрии *P*, находится в устойчивом равновесии, так как любое смещение приводит к появлению возвращающей оптической силы. В точке *P'* поперечная сила каждого пучка толкает частичку назад в точку *P*. В точке *P''* сила, оказываемая пучком *1*, уменьшается из-за расхождения пучка, однако интенсивность пучка *2* увеличивается, следовательно, сила его воздействия возрастает, толкая частицу назад в точку *P*.

Частица, толкаемая вторым пучком, начинала быстро удаляться, после чего первый пучок снова включался. Тогда частица возвращалась в положение равновесия, только более медленно, так как на нее действовала разностная возвращающая сила. Процедура могла повторяться множество раз с выключением любого луча.

Таким образом, жидкость оказалась удобной средой для экспериментального исследования светового давления. Ее можно также предпочесть в качестве среды для многих приложений светового давления, таких как схемы для разделения частиц. В световом луче различные частицы будут перемещаться с различными скоростями, и, таким образом, их можно разделить. Я уже описал один пример разделения пластмассовых шариков диаметром 0,5 и 2,5 *мкм*, основанный только на различии размеров. Если требуется разделить биологические объекты, такие, как вирусы, макромолекулы или клетки, находящиеся в жидкости, разделение будет зависеть не только от их размеров, но и от таких факторов, как коэффициент преломления, форма и ориентация объектов. Таким образом, этот способ разделения частиц может оказаться более удобным, чем существующие методики разделения, основанные на использовании ультрацентрифугирования. Конечно, в таких экспериментах следует соблюдать осторожность для предотвращения чрезмерного нагрева.

В предшествующих экспериментах использовались частицы размером от 0,1 до 100 *мкм*. Для части этого диапазона возможны ускорения, равные 1000—10 000*g*. Интересно отметить, что не представляет трудности

наблюдение частиц меньше длины световой волны. Хотя они и неразличимы в оптический микроскоп, можно определить даже присутствие одиночной частицы по боковому рассеянию света.

Рассмотрим теперь частицы в более разреженных средах, таких как воздух или даже вакуум. При этих условиях частицы движутся более свободно и сила тяжести играет более существенную роль, чем в жидкостях. В частности, демонстрация «оптической бутылки» в воздухе была бы в сущности демонстрацией оптической левитации, при которой частицы поддерживаются оптической силой. В известном смысле это было бы реализацией ситуации, рассмотренной в 1909 г. Дебаем, в которой световое давление было достаточно велико, чтобы скомпенсировать силу тяжести. Это предложение содержалось в докторской диссертации Дебая, посвященной световому давлению. В качестве примера такой компенсации силы тяжести Дебай рассмотрел случай очень маленьких частиц вблизи Солнца. Левитация в этом случае дала бы лишь промежуточное равновесие. Однако, как показывает эксперимент, левитация с истинно стабильным равновесием возможна здесь, на Земле, в простой «оптической бутылке», состоящей только из одного светового луча.

Путем использования лазерной левитации было найдено, что для поддержания частицы диаметром около 20 *мкм* достаточно излучения лазера мощностью всего лишь 1 *вт*. Прозрачная стеклянная сфера помещалась на стеклянную пластинку внутри стеклянного колпака, предназначенного для уменьшения воздушных потоков. На сферу в вертикальном направлении фокусировался пучок мощностью 250 *Мвт*. Пучок вызывал вертикальную силу в несколько g, действующую на частицу. Целью эксперимента было поднять сферу над уровнем пластинки.

К сожалению, описанная схема не функционировала. Причиной было прилипание частиц к поверхности за счет сил молекулярного притяжения, называемых силами Ван-дер-Ваальса. Для частиц диаметром 20 *мкм* сила притяжения равна примерно 10 000g. Однако частицу можно было сдвинуть с места резким ударом по пластинке. Это наводит на мысль использовать более строгую методику разрывания ван-дер-ваальсовых связей, в частности с помощью акустических колебаний. Для этой цели достаточен импульс звуковой энергии, сообщаемый пластинке от пьезоэлектрического керамического цилиндра. Как только частица освобождается, световое давление подхватывает ее и частица начинает подниматься в расходящемся вертикальном пучке, останавливается в точке равновесия, где световое давление и сила тяжести уравновешиваются. Таким образом, левитация была реализована.

Так как в экспериментах использовалась частица с высоким коэффициентом преломления, было легко придать ей поперечную устойчивость по отношению к точке равновесия. Следовательно, можно получить левитацию для частицы, помещенной в точке устойчивого равновесия. Помимо методики, основанной на использовании сверхпроводящих частиц, все прочие схемы левитации, основанные на электромагнитных силах, предполагают некоторое движение левитирующей частицы. В таких схемах либо равновесие динамично, либо требуется некий род отрицательной обратной связи для коррекции положения частицы при ее движении.

Будучи захваченной, частица остается в воздухе, пока на нее сфокусирован свет. Движением линзы можно очень точно перемещать фокус луча и тем самым положение частицы. Такую частицу можно сфотографировать в рассеянном ею свете (рис. 5).

Левитирующую частицу можно также наблюдать с помощью микроскопа, сфокусированного непосредственно на нее. Эта возможность была

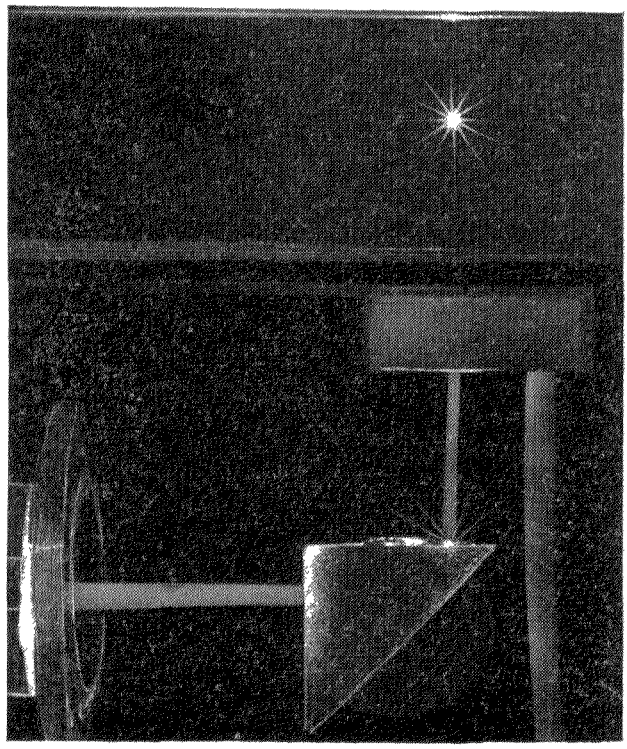


Рис. 5. На фотографии изображена оптическая левитация очень маленьких частиц при помощи вертикального пучка зеленого лазерного света.

Частица, прозрачная стеклянная сфера диаметром 20 *мкм*, висит в воздухе примерно на расстоянии 1 *см над стеклянной пластинкой* при *воздействии* пучка мощностью 250 *Мвт*. Хотя частица едва видна невооруженным глазом, за счет рассеяния света она ярко сияет. Яркие лучи, расходящиеся от изображения частицы, возникают из-за дифракции на лепестках диафрагмы внутри камеры. Для того чтобы сделать лазерный луч видимым, на его пути вдувался дым (нижний левый угол рисунка). Для разрыва слабых ван-дер-ваальсовых сил, удерживающих частицу на поверхности, использовалась конструкция из двух проволочек, прикрепленных к пьезоэлектрическому керамическому цилиндру. Интерференционная картина, видимая на фоне задней стенки сосуда, возникает из-за света, рассеянного частицей под углом 90°.

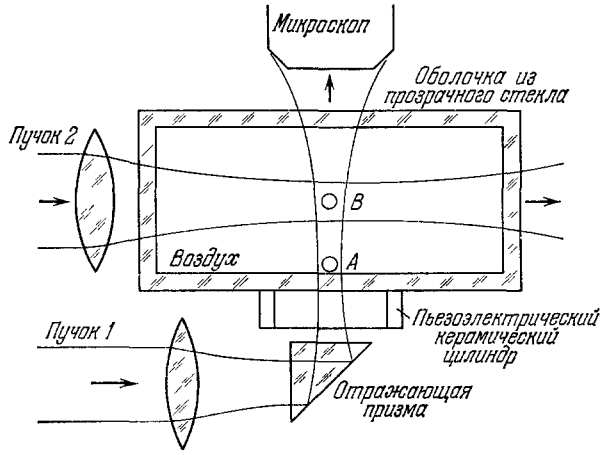


Рис. 6. Схема левитации с использованием однопучковой «оптической бутылки».

Вертикальный пучок *1* поднимает частицу из ее положения покоя в точке *A* и переносит ее в точку *B*, где световое давление уравновешивает силу тяжести. В более поздних экспериментах для измерения возвращающих сил использовался регулируемый зондовый пучок *2*, толкающий частицу в горизонтальном направлении.

использована в интересном эксперименте по измерению возвращающих сил в «оптической бутылке». При воздействии на частицу сбоку при помощи второго луча определялась мощность, необходимая для выталкивания частицы из «бутылки» (рис. 6). Таким путем было найдено, что поперечная возвращающая сила для внеосевых частиц может достигать $0{,}5g$ при вертикальной силе $\sim g$.

Таким образом, левитация позволяет осуществить точную микроманипуляцию маленьких частиц, что уже само по себе очень ценно. Например, для получения плазмы для термоядерных исследований очень важно с помощью лазера уметь вводить и поддерживать на весу маленькую частицу, играющую роль мишени для мощного импульсного лазера. Кроме того, левитация является идеальным средством для исследования рассеяния света маленькими диэлектрическими сферами — явления, известного как рассеяние Ми. Теория этого рассеяния, развитая Г. Ми в 1908 г, объясняет многие явления — от радуги до углового распределения света, рассеянного на неоднородностях в коэффициенте преломления, при прохождении через оптически прозрачные среды. При левитации единичной частицы известного размера и формы можно измерить Ми-рассеяние, свободное от всяких возмущений.

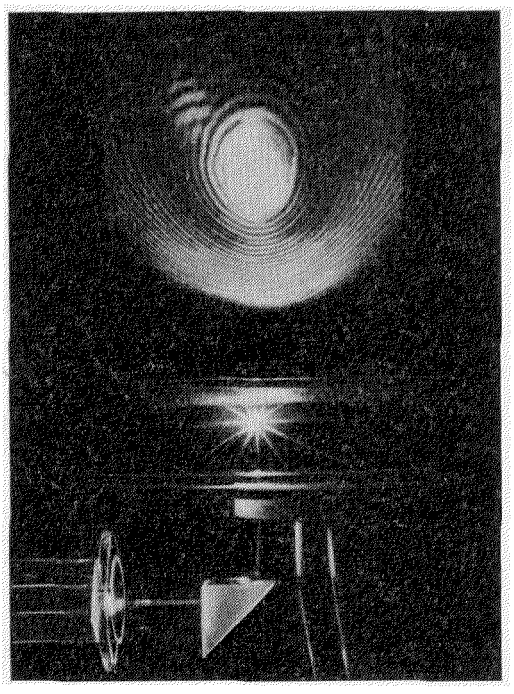


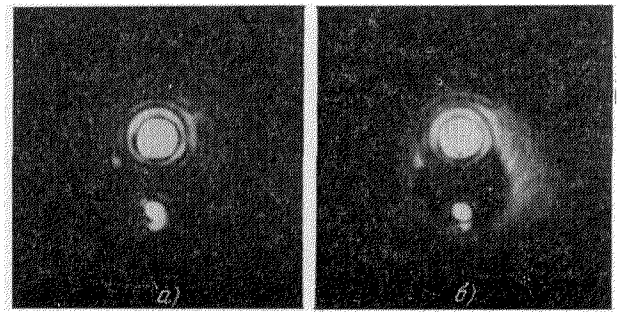
Рис. 7. Рассеяние Ми вертикального лазерного пучка диэлектрическими стеклянными сферами образует сложную серию интерференционных колец на экране, расположенном под углом над висящей частицей.

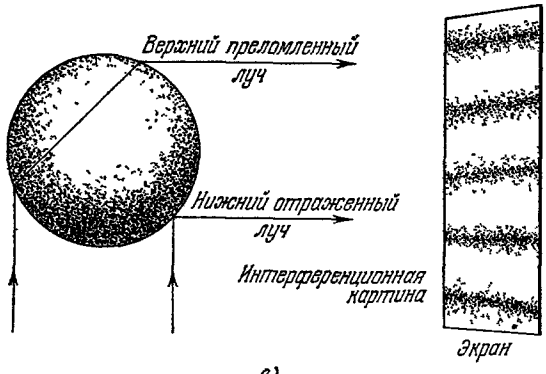
Характерная кольцевая структура, связанная с этим типом рассеяния, впервые описанная Ми в 1908 г., наблюдается в этом эксперименте с исключительной отчетливостью.

В эксперименте по рассеянию Ми самого лазерного луча вперед можно получить сложную серию интерференционных колец (рис. 7). Эти кольца видны с исключительной отчетливостью. Можно также по расстоянию между кольцами при рассеянии Ми на угол 90° измерить диаметр частицы. Дело в том, что при рассеянии на угол 90° кольца появляются в основном в результате интерференции двух ярких источников с известным расстоянием между ними (рис. 8).

Очевидно, что возможность левитации в вакууме открыла бы большое число возможностей. В высоком вакууме исчезают всякие силы вязкости, которые в воздухе гасят любое движение. Оптические силы, не считая слабого радиационного затухания, бесфрикционны, и поэтому частица, совершающая колебательное или вращательное движение, будет продолжать это движение бесконечно долго. В этом случае возможны интересные эксперименты, может быть, даже эксперименты с угловым или вращательным моментом света. Основная трудность состоит в предотвращении флуктуаций интенсивности лазерного света, возмущающих движение частицы. До сих пор удавалось наблюдать левитацию при давлениях вплоть до 1 *мм* рт. ст. При этом давлении вязкостное затухание уже мало,

что приводит к нарастанию колебаний, вызываемых возмущениями, и к последующему убеганию частицы. Стабилизация выходной мощности лазера и использование более мощных «оптических бутылок», состоящих из нескольких пучков, позволили бы наблюдать левитацию при еще более низких давлениях. Однако может оказаться необходимым использовать оптическую систему обратной связи, основанную на регистрации положения или скорости частицы. Это был бы способ одновременной стабилизации лазерной мощности и положения частицы, которая могла бы быть очень чувствительной.





в)

Рис 8. Когда висящая частица наблюдается при помощи микроскопа по рассеянному ею свету на угол 90°, появляются два разделенных ярких источника (рис *а*)

При наличии светового фона сзади частицы (б) можно непосредственно видеть контур частицы и положение источников по отношению к ней Рис *в*) объясняет происхождение двух источников под углом 90° Один преломленный луч возникает вблизи верхней части частицы, тогда как более слабый отраженный луч расположен несколько выше нижнего края частицы Эти два источника, интерферируя, дают горизонтальную систему полос, наблюдаемую на экране, расположенном вдали

Другим возможным использованием светового давления в высоком вакууме является ускорение маленьких нейтральных частиц до больших скоростей. Если мощный лазерный луч падает на частицу, она будет быстро ускоряться вдоль оси пучка, не изменяя положения в направлении, поперечном к лучу. Возникает вопрос: что ограничивает предельные достижимые скорости? Ограничением является, по-видимому, плавление и испарение частицы. Если считать плавление предельным случаем, при известном коэффициенте преломления можно найти и предельную допустимую мощность луча, а, следовательно, можно рассчитать и предельную скорость. Лучшие из имеющихся оптических стекол имеют коэффициент поглощения $3 \cdot 10^{-5}$ *см*$^{-1}$. Используя эту величину, получаем для частиц диаметром 0,5 *мкм* конечную скорость $3 \cdot 10^{8}$ *см/сек*,

т. е. невероятно большую скорость для макрочастицы. Если такую частицу направить на мишень или на другую частицу такого же размера и с такой же скоростью, то была бы получена мощность порядка 10^{11} *вт* в течение 10^{-13} *сек*. Частица испарилась бы и образовала плазму, температура которой была бы примерно в 50 раз выше температуры, необходимой для термоядерной реакции в дейтерии. Поэтому эта методика может представлять интерес в термоядерных исследованиях и в других областях, где необходимо иметь короткие импульсы большой мощности. Создание аппаратуры для такого ускорителя находится в пределах возможностей современной техники. К сожалению, он может оказаться столь же длинным, как двухмильный Стэнфордский линейный ускоритель, из-за необходимости поддерживать интенсивность на достаточно низком уровне, чтобы исключить нелинейное поглощение. Такой эксперимент был бы не простым предприятием.

До сих пор я описывал эффекты фокусировки лазерного света на маленьких непоглощающих частицах диаметром 0,1—100 длин волн света. Если мы рассматриваем действительно маленькие частицы, такие как атомы диаметром в несколько тысячных долей длины волны, то можем ожидать незначительный эффект давления, так как волны огибают столь малые объекты без сильного отклонения. Хотя обычно свет проходит через газы, лишь незначительно с ними взаимодействуя, имеется ряд важных исключений. При рассмотрении этих частных случаев следует исходить из квантовой теории, являющейся основой нашего современного понимания природы света и материи. Известно, что свет, будучи волновым явлением, имеет корпускулярную природу. Световой пучок представляет собой совокупность неделимых частиц энергии — фотонов, каждый из которых имеет определенную энергию и импульс. Известно также, что атом представляет собой резонансную систему, которая может существовать только в особых энергетических состояниях. Атомы сильно взаимодействуют со светом, когда энергия фотона в точности равна энергии, необходимой для того, чтобы перевести атом из одного энергетического состояния в другое. Это — резонансное явление. Мерой силы резонансного взаимодействия является величина, названная сечением поглощения.

Идея сечения поглощения основана на концепции, что любой фотон, попадающий в эту область, поглощается. Для атомов «в резонансе» сечение поглощения примерно равно квадрату длины волны. Так как теоретически лазерный луч можно сфокусировать в пятно с площадью, примерно равной квадрату длины волны, это означает, что единичный атом, соответствующим образом помещенный в фокусе такого луча, будет поглощать почти весь свет пучка. Это оказывается справедливым при малых интенсивностях, когда отсутствуют эффекты насыщения. В любом случае резонансные атомы являются объектами, наиболее сильно поглощающими свет. Это означает также наличие сильных эффектов радиационного давления.

При поглощении атому сообщается как энергия, так и импульс фотона. Рассмотрим, например, атом натрия, первоначально находящийся в основном состоянии, т. е. в состоянии с наинизшей энергией, который поглощает фотон резонансного излучения желтой *D*-линии. Атом не только переходит в возбужденное состояние, но и получает приращение скорости в направлении падающего света, равное примерно 2 *см/сек*. Прежде чем вернуться в основное состояние, атом остается в возбужденном состоянии в течение некоторого времени, называемого временем жизни. Этот возврат происходит спонтанно с испусканием фотона той же частоты в произвольном направлении. При этом атому сообщается еще один импульс

с произвольным направлением, соответствующий скорости 2 *см/сек*. Последующие поглощения и спонтанные испускания дают дополнительный импульс, направленный вдоль луча. В результате появляется сила, направленная вдоль светового луча. Этот эффект подобен силе, оказываемой брандспойтом на мяч, рассеивающий водяную струю во всех направлениях.

Эта оптическая сила, названная резонансным световым давлением, обладает рядом уникальных свойств. Во-первых, она не возрастает до бесконечности с увеличением оптической мощности, а насыщается при определенной максимальной величине, которая связана с конечным временем жизни возбужденного состояния. Если среднее время жизни порядка 10^{-8} *сек*, как это имеет место для натрия, можно ожидать, что атом сможет рассеять не более 10^8 фотонов в секунду. В действительности он может рассеять лишь половину этого количества, что связано с наличием вынужденного излучения атомов в возбужденном состоянии. В этом процессе, существенном при больших интенсивностях света, атомы отдают фотон обратно в пучок. Само по себе это дает пренебрежимо малый вклад в величину силы, но приводит к потере атомов, находящихся в возбужденном состоянии. Конечный результат дает, однако, при насыщении давление, в расчете на один атом равное 100 000 *g*.

Другим уникальным свойством этого эффекта является требование точного резонанса. Рассмотрим лазерный пучок, настроенный в резонанс с покоящимся атомом. Если атом начинает перемещаться в направлении света под действием светового давления, то в результате допплеровского смещения он больше не будет находиться в точном резонансе и сила уменьшится.

Одним из возможных применений этой силы является разделение газов с использованием света в качестве насоса, который селективно

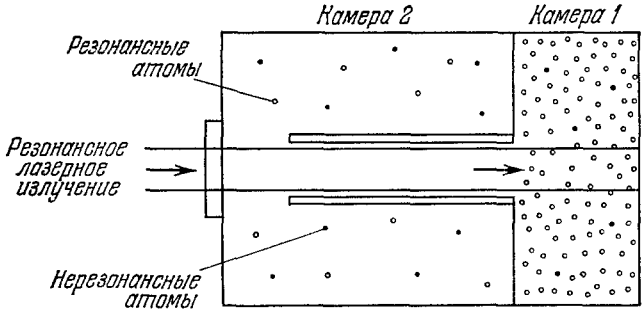


Рис. 9. Газы можно разделять при помощи резонансного светового давления лазерного излучения.

В предлагаемой схеме лазерный свет действует как насос, толкая резонансные атомы (кружки) в камеру *1*, не действуя на нерезонансные атомы (точки).

действует на резонансные атомы (рис. 9). Предположим, что двухкамерный сосуд наполнен двумя различными газами и что свет находится в резонансе только с одним из газов. Постоянная сила при насыщении, действующая на резонансные атомы, вызывает экспоненциальное распределение давления вдоль трубки, соединяющей камеры, наибольшее значение которого находится в дальней камере, и падающей до наименьшего значения в ближней камере, когда система приходит в равновесие с силой светового давления. На второй газ свет не действует. Этот механизм аналогичен разделению газов в земной атмосфере за счет различия в весах, когда каждому газу соответствует свой закон экспоненциального распре-

деления давления. При помощи резонансного светового давления можно, по-видимому, получить разделение даже различных изотопов одного элемента за счет изотопического сдвига резонансной частоты.

Другое возможное использование методики, основанной на световом давлении, связано с атомными и молекулярными пучками. С помощью таких пучков было получено много фундаментальных сведений при исследовании их отклонения в статических полях, а также по их взаимодействию с электромагнитными волнами и другими частицами. Теперь возможно было бы исследовать атомные пучки по отклонению силами светового давления. В одной из возможных схем анализатора скоростей

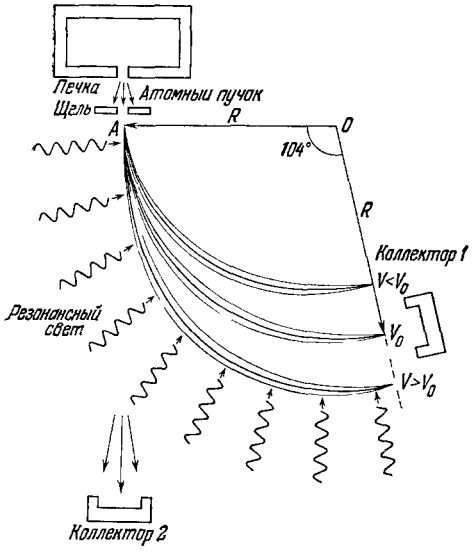


Рис 10 Скоростной анализатор атомного пучка, использующий резонансный лазерный свет, позволил бы селектировать атомы с определенной скоростью из многоскоростного пучка.

Резонансный свет, распространяющийся в радиальном направлении в точке O, перпендикулярен круговой орбите радиуса R Коллектор *1* детектирует атомы с различной скоростью, сфокусированные на различных радиусах после отклонения на угол 104° Нерезонансные атомы попадают на коллектор *2*

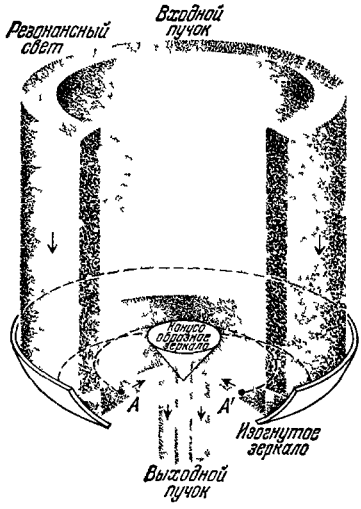


Рис. 11. Гипотетический аппарат для оптического захвата атомов на устойчивых круговых орбитах (AA') был бы подобен «оптической бутылке» для макрочастиц

Принцип действия представляет собой вариацию схемы скоростного анализатора со сходящимся кольцевым световым пучком с некоторой дополнительной сходимостью вдоль поля

из пучка селектируются атомы с определенной скоростью. При этом резонансное излучение фокусируется в точку, чтобы получить однородное центральное поле оптических сил (рис 10). Благодаря эффекту насыщения возможно постоянство радиальной силы, даже если интенсивность света изменяется в пространстве. Это поле обладает интересной особенностью, заключающейся в том, что все резонансные атомы, инжектируемые в определенную точку с определенной скоростью, будучи отклоненными на угол 104°, снова фокусируются, причем на расстоянии, зависящем от скорости. При таких больших отклонениях допплеровского сдвига нет, и такие отклонения возможны, так как атомы движутся по орбитам, близким к круговым, проходящим через входное отверстие. На орбите постоянная сила светового давления и центробежная сила в точности скомпенсированы, и, таким образом, вдоль направления распространения света никакого движения нет. Этот случай аналогичен движению частицы, «подвешенной на конце веревки» и совершающей равномерное круговое движение. Итак, если коллектор установлен под углом 104°, он может

собирать атомы с различной скоростью, перемещаясь вдоль радиуса. Все нерезонансные частицы не отклоняются и попадают на второй коллектор. Для скоростного анализатора этого типа, в котором пучок атомов натрия, выходящий из нагретой печи, имел бы радиус кривизны 5 *см*, потребовалась бы мощность резонансного излучения около одного ватта. Если сходящемуся световому пучку придать кольцевую форму и некоторую сходимость вдоль оси поля, то можно получить резонансные атомы, стабильно вращающиеся на орбитах, близких к кольцевым (рис. 11). Для атомов такое устройство было бы ближайшим аналогом «оптической бутылки» для макрочастиц. Для описанной методики необходимы лазеры с достаточно высокой мощностью и перестраиваемостью. Можно надеяться, что быстрые успехи, достигнутые в создании перестраиваемых лазеров на основе красителей и перестраиваемых параметрических генераторов, сделают возможными эти эксперименты.

Многие аспекты этой работы имеют исторические прецеденты. Отдача электрона при единичном столкновении высокоэнергетичного фотона, известная как эффект Комптона, представляет собой пример светового давления (хотя и нерезонансного). В 1939 г. О. Фриш в очень тонком эксперименте с атомными пучками наблюдал незначительную отдачу атомов натрия при поглощении и испускании единичного фотона от слабой резонансной лампы. Идея этого эксперимента, очевидно, принадлежит Эйнштейну, так как Фриш назвал наблюдаемое явление «эйнштейновской отдачей».

Позднее были открыты эффекты светового давления в космических масштабах. Из наблюдений далеких ультрафиолетовых резонансных линий, выполненных при помощи ракет, запускаемых за пределы земной атмосферы, Мортон из Принстонского университета показал, что очень горячие звезды испускают большое количество газа со скоростями $2 \cdot 10^8$ *см/сек*. Л. Люси и Ф. Соломон из Колумбийского университета связывают это явление с тем, что резонансное световое давление, оказываемое звездами за счет сильного теплового излучения в ультрафиолетовой области спектра, для различных ионизованных атомов может значительно превосходить гравитационное притяжение. Благодаря непрерывному характеру спектра теплового излучения допплеровское смещение при увеличении скорости атомов не приводит к уменьшению силы светового давления. Силы, действующие в этом случае, гораздо меньше сил насыщения, которые, можно надеяться, будут получены при использовании лазеров.

В другой области Дж. Каттер и П. Саведов из Рочестерского университета объясняют световым давлением происхождение планетарных туманностей. С их точки зрения планетарные туманности (газовые облака, наблюдаемые вокруг многих белых карликов) являются результатом вспышек на поверхности звезд.

Очевидно, что история изучения светового давления тесно связана с историей самой науки. Эта связь является одним из примеров неразрывности науки как целого. Новые знания и методики, открытые в одной области, неизбежно приводят к новым знаниям и методам в других областях.

ЛИТЕРАТУРА

E. F. Nichols, G. F. Hull, Phys. Rev. **17**, 26 (1903).— A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156; **25**, 1321 (1970). — A. Ashkin, J. M. Dziedzic, Appl. Phys. Lett. **19**, 283 (1971).

ДОПОЛНЕНИЕ

534.214

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ В ЛУЧЕ ЛАЗЕРА

Движение частиц в лучах мощного лазерного излучения — вопрос весьма важный и актуальный. Еще в 1962 г. в статье [1] было показано, что мощный световой луч способен оказывать сильное действие на заряженные и поляризующиеся частицы, причем сила может менять знак при переходе через резонансную частоту поляризуемости. Были отмечены возможности применения такого воздействия для сдерживания перепада концентрации частиц, транспортировки частиц, создания разрежений или сгущений в средах.

Краткий обзор этих и других, более сильных и «драматических» возможностей движения частиц в лучах лазеров мы дадим в дополнение к статьям Эшкина [2] и его популярной статье, перевод которой публикуется в этом выпуске журнала.

Остановимся сначала на чисто электромагнитных воздействиях мощного светового (или радио-) излучения на частицы. Анализ значительно упрощается, если предположить, что размер частицы (или амплитуда ее колебаний) меньше длины волны света. Тогда в электромагнитном поле $E(\mathbf{r})\,e^{i\omega t}$ на частицу действуют две силы *): градиентная сила

$$\mathbf{F}_{\nabla} \approx \alpha \nabla (E^2)_{\text{ср}}$$

и сила светового давления, связанная с рассеянием:

$$\mathbf{F}_{\text{св}} \approx (2/3)\,\alpha^2 (E^2/\lambda\!\!\!^{-4})\,\mathbf{n}$$

(при $\lambda\!\!\!^{-} \ll a$ для преломляющей частицы $F \sim a^2E^2/4$ и $F_{x\perp} \approx (\pi/2)\,a^3\partial E^2/\partial x_{\perp}$), где $\alpha(\omega)$ — поляризуемость частицы ($\alpha \approx a^3(\varepsilon - \varepsilon_0)/(\varepsilon + 2\varepsilon_0)$ в случае квазисферической частицы вещества с диэлектрической проницаемостью ε в среде с проницаемостью ε_0 и $\alpha \approx -e^2/m(\omega^2 - \omega_r^2)$ для заряженной частицы с зарядом e, массой m и резонансной частотой связи ω_r) и $\lambda\!\!\!^{-}$ — приведенная длина волны излучения. Отношение сил

$$F_{\nabla}/F_{\text{св}} \approx \lambda\!\!\!^{-4}/\alpha L,$$

где L — характерная длина изменения интенсивности поля. Вблизи фокуса обычно поперечные размеры концентрации поля $L_{\perp} \approx L_{\parallel}\theta_{\text{фок}}$, где угол фокусировки $\theta_{\text{фок}} \approx r/F$ зависит от начального радиуса луча r и фокусного растяжения линзы F. В случае одномодового лазера обычно $L_{\perp} \sim \lambda$ и $\theta \sim \lambda\!\!\!^{-}/L_{\perp}$ и $L_{\parallel} \sim L_{\perp}^2/\lambda$, т. е. порядка френелевской длины. В случае $L_{\perp} \sim \lambda$ получим $F_{\nabla}/F_{\text{св}} \approx (\lambda\!\!\!^{-}/a)^3(\lambda/L) \gg 1$ при $\alpha \approx a^3$; $\lambda\!\!\!^{-} \gg a$, т. е. градиентная сила может преобладать над силой светового давления.

Из приведенных выражений легко получаются все случаи поведения частицы в луче: втягивание частицы с $\varepsilon_1 > \varepsilon$ в луч и выталкивание при $\varepsilon_1 < \varepsilon$. К этому случаю $\lambda\!\!\!^{-} \gg a$ относятся силы воздействия света на атомы, размеры которых на три порядка меньше длины волны света. (Именно поэтому случаю $\lambda\!\!\!^{-} \gg a$ было уделено основное внимание в работе [1].)

В случае малого градиента поля, достаточно больших размеров частиц или больших величин поляризуемостей световое давление может превосходить градиентную силу. При задании силы, действующей на частицы в среде, движение частицы определится: при небольших силах — из приравнивания электромагнитной силы силе Стокса $F \sim 2\pi\eta a u$, а при больших силах — силе газодинамического давления $F \approx \pi a^2\beta\rho u^2$, где u — скорость движения частицы, β — форм-фактор частицы, ρ — плотность среды. Например, при $F \approx a^2E^2/4$ $u \approx E\,(4\pi\beta\rho)^{1/2}$. Например, при $E \sim 10^5$ CGSE, что соответствует сфокусированным мощностям в сотни мегаватт, получим $u \approx 3\cdot 10^4 - 10^5$ *см/сек*, т. е. скорость частицы, рассеивающей свет, приближается к звуковой, что должно проявиться в изменении спектра рассеянного света.

Очень большая градиентная сила может быть использована для ускорения частиц до больших скоростей [4]. Большие успехи в получении очень мощных световых импульсов с очень короткими длительностями и фронтами позволяют достичь в фокусе лазера градиентных сил, действующих на электрон,

$$E_{\text{эфф}} \approx (e/2m\omega^2)\,E_0^2/L \sim 1 - 10\ \textit{Мв/см}.$$

При движении фокуса синхронно с движением ускоряемой частицы можно получить ультрарелятивистские электроны с энергиями, во много раз превышающими энергии осцилляции [4].

*) Использованию этих сил для ускорения частиц в радиоволнах были посвящены статьи [3].

Рассмотрим теперь силы, связанные с поглощением света. Три типа сил могут быть связаны: с нагревом и движением самой среды (конвекционное увлечение), с нагревом среды от поглощающей поверхности частицы (радиометрическое давление) и с давлением от испарения самой частицы (светореактивное давление [5]). Отметим, что все эти эффекты могут при заметном поглощении во много раз превосходить световое давление и проявляться с большой вероятностью в экспериментах. Например, светореактивное давление [5]

$$p_{\text{реакт}} \sim \dot{M} v_{\text{ист}} \sim Iv/[\lambda + (1/2)\, v^2] \approx (p_{\text{св}} cv)/[\lambda + (1/2)\, v^2],$$

где λ — удельная теплота испарения, $v_{\text{ист}}$ — скорость истечения паров вещества, $I \approx p_{\text{св}} c$ — плотность потока световой энергии, т. е.

$$p_{\text{реакт}}/p_{\text{св}} \approx cv/[\lambda + (1/2)\, v^2] \sim cv/\lambda \sim 10^4.$$

При этом по величине светореактивное давление может достигать 10^{12} *атм.* Такое давление можно использовать, в частности, для ускорения макрочастиц [5, 6] до скоростей 10^6—10^8 *см/сек*, для получения искусственных микрометеоров, частиц, дающих большие локальные концентрации энерговыделения при столкновении с мишенью или друг с другом. В последнее время появились предложения использовать мощные непрерывно действующие газодинамические лазеры для изменения траектории спутников.

При умеренных плотностях потока света существенную роль в радиометрических эффектах с прозрачными частицами может играть так называемое «поверхностное» поглощение света (хотя доля света, поглощенного на поверхности, невелика, но поглощенная энергия выделяется в очень узком слое и может дать большие перегревы). Существенна фокусирующая роль самой частицы. В случае поглощающих частиц их движение в лучах мощного света целиком связано с радиометрическими и реактивными силами [7]. Эта проблема весьма интересна в связи с прохождением лучей мощных газовых лазеров через туман, дымку и облака [7].

Г. А. Аскарьян

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ **42**, 1567 (1962).
2. A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156; **25**, 1321 (1970).
3. В. И. Векслер, АЭ **2**, 427 (1957); А. В. Гапонов, М. А. Миллер, ЖЭТФ **34**, 242, 751 (1958).
4. Г. А. Аскарьян, С. Д. Манукян, ЖЭТФ **62**, 2156 (1972).
5. Г. А. Аскарьян, Е. М. Мороз, ЖЭТФ **43**, 2319 (1962).
6. Г. А. Аскарьян, М. С. Рабинович, М. М. Савченко, В. К. Степанов, В. Б. Студенов, Письма ЖЭТФ **5**, 258 (1967).
7. В. И. Букатый, Ю. Д. Копытин, В. А. Погодаев, С. С. Хмелевцов, Л. К. Чистякова, Изв. вузов (Физика), № 3, 41 (1972).