

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики
и астрономии Российской академии наук

(22 апреля 2002 г.)

22 апреля 2002 г. в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. Крохин О.Н. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Размышления: состояние и перспективы лазерного термоядерного синтеза.*

2. Летохов В.С. (Институт спектроскопии РАН, Троицк). *Лазерный эффект в космосе.*

Краткое содержание представленных докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 28.52.-s, 52.57.-z

Размышления: состояние и перспективы лазерного термоядерного синтеза

О.Н. Крохин

За прошедшие 40 лет с момента появления первого лазера и почти стольких же лет после первых предложений о применении лазеров для возбуждения реакции ядерного синтеза отношение к возможности осуществления программы "ЛТС" (лазерного термоядерного синтеза) менялось. Ясно, что технические трудности реализации этой программы чрезвычайно велики, несмотря на исходную простоту идеи: есть необходимая концентрация мощности светового потока, есть наиболее легко воспламеняющееся топливо — смесь дейтерия и трития. И сами по себе масштабы требующейся для инициирования реакций энергии лазерного импульса не являются слишком уж большими и вполне могут быть реализованы. Однако и сегодня проблема ЛТС заключается в том, каким способом можно осуществить подходящие условия для "вспышки" реакции в термоядерной мишени.

Начиная с 70-х годов прошлого века в качестве основной "стратегической" линии в ЛТС была принята концепция сжатия сферических термоядерных мишеней до высоких плотностей порядка 100 начальных плотностей жидкого или твердого ДТ. Если, скажем, взять мишень в виде шарика из дейтерия и трития радиусом 1 мм с плотностью жидкого состояния ($0,2 \text{ г см}^{-3}$, т.е. с плотностью атомов $n = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$), то для нагрева его до температуры 2 кэВ потребуется не более 0,1 МДж

энергии, при этом критерий зажигания $nt \sim 10^{14}$ (где τ — время разлета) будет выполнен, поскольку τ при скорости порядка 10^8 см с^{-1} будет составлять около 10^{-9} с . (В ЛТС вместо nt чаще используется критерий ρr ; $nt = 10^{14}$ соответствует $\rho r \sim 5 \times 10^{-2}$ для смеси дейтерия и трития.) Казалось бы, это осуществимо. Но здесь вступают в силу законы физики — можно ли ввести энергию в ДТ-плазму так, как нам хотелось бы?

Одно из главных препятствий — невозможность ввести лазерное излучение в плазму большой плотности. Лазерное излучение слишком мягкое, т.е. низкочастотное, для наших целей. Например, излучение с длиной волны 1 мкм (лазер на неодимовом стекле излучает волну с длиной 1,06 мкм) имеет циклическую частоту $\omega = 2 \times 10^{15} \text{ рад с}^{-1}$. Электромагнитная волна, распространяющаяся в плазме, должна иметь частоту выше некоторой величины, которую называют ленгмюровской частотой $\omega_p = (4\pi n e^2 / m)^{1/2}$, где e и m — заряд и масса электрона. Плотность плазмы, при которой выполняется условие $\omega = \omega_p$, называется критической. Для $\lambda = 1 \text{ мкм}$ критическая плотность составляет 10^{19} см^{-3} , т.е. более чем на три порядка меньше плотности жидкой фазы водорода.

Таким образом, с одной стороны, нагрев прямым способом плазмы с высокой плотностью представляется проблематичным. С другой стороны, при малой плотности вещества скорость реакции, пропорциональная n^2 , тоже мала — в этом случае необходимо дополнительное удержание плазмы. И если мы хотим осуществить реакции синтеза в режиме свободного разлета вещества (инерционное удержание), необходимо искать способ увеличения плотности плазмы.

Эта концепция разрабатывается с начала 1970-х годов и основывается на сжатии сферических мишеней за счет облучения их внешней поверхности мощными потоками лазерного излучения, вызывающего испарение (абляцию) внешней части сферической мишени и, следовательно, возникновение на поверхности мишени давления, приводящего к сжатию мишени вовнутрь. Эта концепция логически замкнута и, безусловно, может быть осуществлена. Вопрос только в том: какой ценой? где тот необходимый минимум дорогой энергии лазерного импульса?

В этом подходе есть чрезвычайно важное полезное обстоятельство: чем выше степень сжатия, тем меньше требуется энергии для инициирования реакции (обратно пропорционально квадрату степени сжатия). Однако

есть и минусы, и трудности. На мой взгляд, наиболее слабым местом в таком подходе является низкий коэффициент передачи энергии, идущей на сжатие за счет абляции. Он составляет всего около 10%; остальная энергия бесполезно остается в разлетающейся плазме. Другой важный момент — необходимость одновременно осуществить на конечной стадии высокую степень сжатия и нагрев DT-объема в центре мишени. Эта задача решается выбором подходящей конструкции мишени (как правило, это тонкие оболочки с замороженным на внутренней стенке слоем DT) и подбором скорости подачи энергии лазерного излучения на поверхность мишени. Однако процесс сжатия подвержен неустойчивостям Рэлея–Тейлора, развитие которых определяет состояние вещества на конечной стадии сжатия, ограничивая параметры плазмы как по плотности, так и по температуре ("размазывая" их и перемешивая вещество) по сравнению с теми, которые мы могли бы ожидать при идеальной кумуляции.

Перечисленные обстоятельства вызывают некоторые сомнения в правильности выбора этого пути осуществления зажигания. Естественно поставить вопрос: оправдано ли расходовать такую высокоорганизованную форму энергии, какой является лазерное излучение, таким "любовым" способом? Поэтому, как мне представляется, необходимо изобретать другие схемы и способы, которые могут оказаться более эффективными.

Я уверен, что в области, которую мы обсуждаем, пока не сказано последнее слово, и пути выхода за пределы разрабатываемой сейчас схемы существуют. Когда-то давно у нас в ФИАНе мы рассматривали возможный вариант прямого нагрева замороженного DT, заключенного внутри тяжелой оболочки, коротким лазерным импульсом через тонкие отверстия в оболочке. Позже появились предложения по конструированию мишеней, получивших название "парник", в которых излучение лазера подается в слой малоплотного вещества. Наконец, лет шесть назад были высказаны идеи (в том числе и у нас в ФИАНе), в дальнейшем названные "быстрый поджиг" (fast ignition), в которых предполагается "разрыв" процессов сжатия и нагрева — поджиг сжатой мишени очень коротким, хорошо сфокусированным лазерным импульсом. Последнее заслуживает внимания и исследования, в особенности потому, что включает в себя новую физику, правда, с неясными пока конечными результатами.

Суть концепции, разрабатываемой в Ливерморе, состоит в том, что при очень высоких плотностях потока в тонком канале, в котором распространяется лазерное излучение, можно ожидать образования условий, способствующих глубокому проникновению световой энергии в плазму высокой плотности, выше критической.

Предполагается, что за счет действия на электроны пондеромоторных сил, направленных в противоположную градиенту квадрата амплитуды поля лазерного излучения сторону, электроны и вместе с ними ионы будут вытолкнуты из светового пучка. Кроме того, на электроны действует огромная сила и в продольном направлении. Образуется канал пониженной плотности (так называемая самофокусировка) и вполне можно ожидать, что плотность будет подкритической и энергия будет доставлена к плотному предварительно сжатому ядру мишени. Поглощенная световая энергия нагреет вещество и произойдет зажигание.

Сейчас эта концепция интенсивно исследуется экспериментально в модельных условиях. Основной обнаруженный факт — образование большого количества быстрых электронов с энергиями в сотни килоэлектронвольт, выбрасываемых из области локализации поля. Эти результаты, однако, пока не дают достаточных оснований для окончательных прогнозов.

Оптимизм в решении проблемы ЛТС, на мой взгляд, может быть основан также на том факте, что мы являемся сейчас свидетелями бурного (без преувеличения) развития техники генерации мощного лазерного излучения. Примерно 5–6 лет назад появилось два фундаментальных достижения в этой области, которые, безусловно, сильно повлияют на дальнейшее развитие программы ЛТС, как в равной степени и других областей применения лазеров. Я имею в виду, во-первых, осуществление полупроводниковой накачки (посредством инжекционных полупроводниковых лазеров) кристаллических и стеклянных лазеров. Можно ожидать увеличения полного к.п.д. до 30–35%, и это уже достигнуто на уровне нескольких киловатт непрерывной генерации.

Во-вторых, реализован режим генерации сверхкоротких импульсов фемтосекундного диапазона. Получен импульс длительностью до нескольких периодов колебаний (в пространстве — несколько длин волн). Кроме того, достигнуты внушительные плотности потока энергии в фокусе — до 10^{18} Вт см⁻². Вполне серьезно рассматривается возможность построить лазер с энергией до нескольких сот килоджоулей и длительностью импульса десятки-сто фемтосекунд!

В случае реализации этих проектов программа ЛТС получит в распоряжение современные уникальные инструменты, что потребует пересмотра нынешних подходов и разработки новых идей. Одна из возможностей — переход к ультрарелятивистским условиям, когда энергия осциллирующего электрона в электрическом поле превышает mc^2 . Это наступает при плотности потока больше 10^{18} Вт см⁻² (для излучения с длиной волны 1 мкм). Переход к ультрарелятивистским условиям уменьшает частоту плазменных колебаний с увеличением "массы" электрона, в результате чего сдвигается граница прозрачности плазмы в сторону более высоких плотностей. Кроме того, отклик среды становится сильно нелинейным, что должно сопровождаться перерасеянием лазерного излучения в высокие гармоники. Во всяком случае, переход к очень коротким во времени импульсам даст возможность более рационально использовать энергию лазерного излучения.

Конечно, высказанные соображения не являются простым прогнозом на будущее, но на меня огромное впечатление производит тот факт, что спустя 42 года после первого осуществления генерации светового излучения в последнее время мы наблюдаем огромный "прорыв" в области практического применения лазеров. Когда появились оптоволоконные линии связи? когда появились компакт-диски, вытеснившие механическую и магнитную запись? лазеры с полупроводниковой накачкой, нашедшие применение в разных технологиях? и т.д. Все это мы наблюдаем в течение последних лет, и осуществлено это в результате сочетания новых идей и технологий. Поэтому я верю, что в области ЛТС будут найдены неожиданные и, может быть, чрезвычайно простые решения.