

## КОНТРОЛЬ ЗА ВООРУЖЕНИЯМИ НА СТАДИИ НИОКР? (На примере термоядерного синтеза с инерциальным удержанием)

*Аннета Шепер*

В статье обсуждаются некоторые существенные аспекты контроля над вооружениями на стадии НИОКР, причем в качестве примера выбран термоядерный синтез с инерциальным удержанием, или инерциальный термояд (ИТ). Это большая программа НИОКР с многими военными и гражданскими приложениями. В начальной стадии проекта могут оказаться неопределенными его военные и гражданские выгоды - такая двойственность служит серьезным препятствием для контроля над вооружениями на этой стадии разработок. Мы исследуем осуществимость ряда потенциальных приложений ИТ и намечаем соответствующие научные требования для них. Показано, что цели гражданских или военных интересов приводят к различным направлениям последующих НИОКРов. Обсуждаются пути определения наиболее вероятных окончательных намерений "двойственной" программы НИОКР.

Автор работает в междисциплинарной исследовательской группе JANUS (наука, технология и безопасность), Институт ядерной физики, Высшая техническая школа, Дармштадт, Германия.

### ВВЕДЕНИЕ

Как учит нас история, соглашения по контролю над вооружениями обычно достигались только в одной из трех ситуаций:

(а) после развертывания хорошо проверенных систем оружия (Договор о запрещении ракет средней и меньшей дальности);

(б) после окончания фазы НИОКР, но еще до развертывания (Договор по ПРО);

(в) когда под соглашение попадали футуристические типы оружия, которые казались маловероятными для разработки любой из стран-участниц договора в обозримом будущем (Договор о морском дне).

Эта статья касается одной из основных трудностей раннего контроля над НИОКР - проблемы военно-гражданской двойственности. Широко распространено мнение, что такая двойственность неизбежна, потому что во многих случаях можно представить себе как гражданские, так и военные приложения. Однако эта точка зрения не предполагает, что различные приложения часто играют различную роль в определении структуры НИОКР. -

Очевидно, что этот метод будет наиболее успешным для тех программ НИОКР, которые масштабны, дороги и централизованно управляются. Поэтому мы будем рассматривать только такой тип НИОКРов.

В частности, мы проанализируем ИТ - типичный пример "большой науки", очень

дорогой и длительной программы НИОКР, где военно-гражданская двойственность фундаментальных исследований демонстрируется очень явно. С самого начала вид этой программы формировался идеями потенциальных приложений, гражданских и военных.

В статье поначалу дается краткое описание ИТ, включая исторические и политические аспекты. Затем обсуждаются наиболее важные возможные военные и гражданские приложения и оценивается потенциал для их реализации. Далее мы постараемся установить критерий для идентификации целей НИОКРов и рассмотрим, как применять эти результаты к контролю над вооружением.

### ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯД - ПРИМЕР БОЛЬШОЙ НАУКИ

Термоядерный синтез с инерциальным удержанием<sup>1-3</sup>, как и синтез с магнитным удержанием, - это процесс, направленный на использование освобождающейся при синтезе легких ядер энергии, которая в настоящее время выделяется в крупных масштабах при взрывах термоядерного оружия. В лабораторных условиях ИТ основан на микровзрывах, которые можно рассматривать как крошечные термоядерные взрывы. В природе синтез происходит в недрах звезд (гравитационное удержание). Некоторые детали

физики ИТ приведены в приложении А.

В водородных бомбах, как и в лабораторном ИТ, для создания условий, позволяющих проходить реакциям синтеза, сначала надо сжать термоядерное топливо, а затем нагреть его. Требуемые давления настолько высоки (в диапазоне  $10^{11}$  мегапаскалей; 1 мегапаскаль примерно равен 10 атмосферам), что создаваемые при химических взрывах давления (порядка  $10^5$  мегапаскалей, или  $10^6$  атмосфер) лежат гораздо ниже. Пока что единственным источником энергии, способным обеспечить достаточное количество энергии вместе с требуемой плотностью энергии, является ядерный взрыв. Поэтому у всех типов термоядерного оружия есть ядерный запал, или первичный компонент.

С ранних дней разработки ядерного оружия ученые искали методы сжатия и нагрева термоядерного топлива, для которых не требовалось использование ядерного взрыва. Одной из причин послужили радиоактивные осадки от ядерных испытаний в атмосфере. Похоже, что изобретение лазера в 1961 г. предложило альтернативу, поскольку плотность лазерной энергии может достигнуть соответствующих значений. Но поскольку количество выделяемой лазером энергии гораздо меньше энергии от ядерной бомбы, можно проводить только микромасштабные эксперименты. Оптимистические расчеты послужили основой для развертывания секретной экспериментальной программы лазерного термояда в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса в 1963 г.

Разработка лазеров высокой мощности на неодимовых стеклах и на двуокиси углерода увеличила интерес к лазерному термояду. Были начаты программы НИОКР разных масштабов в некоторых странах, включая СССР, Францию, Японию, Израиль и Западную Германию. Хотя поначалу в экспериментах использовались лазеры высокой мощности, в 70-х годах рос также интерес к пучкам частиц. Часто источник энергии называют драйвером.

Ближайшая научная цель НИОКРов состоит в получении настолько высокого, насколько это возможно, коэффициента усиления - отношения энергии синтеза к энергии драйвера. Наилучшее топливо для синтеза (следовательно, оно предпочтительнее при экспериментировании) - это смесь дейтерия D с тритием T, в которой протекает реакция  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$ . Ситуация с коэффициентом усиления  $G = 1$  называется зажиганием, а сам соответствующий реактор - демонстрационным (в нем выделение энергии уравнивает вложенную

энергию драйвера). Главной целью современных исследований является демонстрация возможностей достижения этого порога на основе ИТ.

Однако в ходе проведения НИОКР по ИТ теоретические оценки энергии драйвера, необходимой для зажигания, выросли на три порядка величины. Согласно первым расчетам Накколлса<sup>4</sup>, эта энергия составляла 1-10 кДж; сейчас она оценивается в 1-10 МДж. Результатом стали требования создавать серию все более крупных и все более дорогих лазеров большой мощности и экспериментальных устройств. В приложении Б приводятся некоторые подробности о текущих НИОКРах.

НИОКРы по ИТ зависят от крупного и очень дорогого экспериментального оборудования, требующего громадных финансовых возможностей. Мотивами для финансирования служат потенциальные приложения. Они носят как военный (НИОКР по термоядерному оружию), так и гражданский (энергетические реакторы) характер. Обычно в открытых научных публикациях упоминаются только гражданские приложения. С другой стороны, почти все запросы на финансовую поддержку в США основаны на потенциальной военной пользе. Кроме того в американских правительственных документах в качестве важной цели НИОКР по ИТ объявлена поддержка оборонных программ министерства энергетики<sup>5</sup>. Напротив, НИОКРы по ИТ в Германии обоснованы исключительно потенциальными гражданскими приложениями, в основном производством энергии. В соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия Германия отказано в его приобретении.

Часто утверждается, что невозможно различить гражданские и военные приложения технологии еще на начальных этапах НИОКР - могут появиться совершенно непредсказуемые прикладные результаты того или иного характера.

Но этот аргумент неприменим к дорогим проектам типа ИТ, зависящим от солидной финансовой поддержки и оправдываемым конкретными потенциальными прикладными целями. Без такого оправдания не проживет ни одна дорогостоящая программа. То же самое относится ко всем крупным гражданским или военным научным программам типа СОИ или борьбы с раком. Поэтому в следующей главе будут исследованы все потенциальные приложения ИТ в отношении их осуществимости.

## ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Обсуждается целый ряд гражданских и

военных приложений ИТ, а также приложений двойственного характера:

1) потенциальные гражданские приложения:

- реакторы для производства энергии;
- получение новых знаний в астрофизике;
- ускорение космических аппаратов;

2) потенциальные военные приложения:

- исследования по физике ядерного оружия;
- вклад в разработку новых концепций ядерного оружия;
- сохранение опыта специалистов по термоядерным взрывам в случае полного запрещения ядерных испытаний;
- изучение воздействия ядерного излучения на военную технику;

3) потенциальные применения двойственного характера:

- воспроизводство делящихся материалов и трития;
- источники питания лабораторных рентгеновских лазеров.

Потенциальные гражданские приложения<sup>6</sup>. Реакторные системы для производства энергии. Основанный на ИТ реактор обычно предполагает превращение значительного количества энергии, выделяемой при микровзрывах, в постоянный поток тепла, который движет турбины (смотрите ссылку<sup>2</sup>, стр. 555). Кроме того, в нем существует возможность воспроизводства тритиевого топлива из лития в соответствии с реакцией  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4,8 \text{ МэВ}$ . На рис. 1 изображен поток энергии через систему электрогенератора ИТ. Часть энергии, полученной от турбин и генератора, будет использована для подпитки драйвера. Потери энергии будут иметь место в системе турбина-генератор (похоже, что эффективность преобразования теплоты в электроэнергию не превысит 40%) и в драйвере (преобразование электроэнергии в энергию драйвера может обладать эффективностью только в несколько процентов). С учетом этих потерь можно подсчитать, что требуемый для экономически выгодного реактора коэффициент усиления должен быть равен по крайней мере  $G = 100$ .

Чтобы иметь значительную выходную мощность для оправдания капитальных затрат, требуется драйвер с частотой импульсов по крайней мере порядка 5-10 микровзрывов/с.

Эти технические требования, большинство из которых еще неразрешимо, настолько велики, что можно не ожидать осуществления коммерческого реактора в течение ближайших 30-50 лет. Оптимистич-

ные эксперты утверждают, что демонстрационный термоядерный реактор станет возможным где-то около 2020 г.<sup>7</sup>

Получение новых знаний, относящихся к астрофизике. В процессе термоядерного сгорания давление и температура достигают значений, которые найдены только в центрах звезд. Поэтому ИТ предоставляет возможность для экспериментальных исследований, чтобы узнать больше о процессах в центре звезд.

Ускорение космических аппаратов. Энергию микровзрывов можно было бы использовать для ускорения космических аппаратов (см. ссылку<sup>8</sup>, стр. 7). Расширяющаяся плазма отклоняется магнитным полем и создает отдачу в нужном направлении. Поскольку для этого требуются микровзрывы, где энергия выделяется в основном в виде кинетической энергии расширяющейся плазмы, а не кинетической энергии нейтронов, реакция дейтерия с тритием не подходит. Однако все остальные реакции синтеза требуют гораздо более высоких температур и более эффективного удержания, чем D-T реакция.

Потенциальные военные приложения. В то время как государства, не владеющие ядерным оружием, подчеркивают потенциальное гражданское использование ИТ, НИОКРы по ИТ в странах, обладающих ядерным оружием, большей частью сконцентрированы на военных приложениях. В США эти приложения служат главным обоснованием программы ИТ. Микро-ИТ основан на совершенно такой же физике, что и взрывы термоядерного оружия.

Термоядерное оружие (см. рис.2) в принципе состоит из вещества для синтеза (вторичный компонент) и ядерного первичного компонента.<sup>9-11</sup> Две эти части, размещенные пространственно, помещены в кожух из соответствующего материала. Выделившаяся при взрыве первичного компонента энергия создает изотропное поле чернотельного излучения внутри кожуха. Это приводит к сжатию вторичного компонента и вызывает поджиг его сердцевины, то-есть начало термоядерного горения (см. приложение А). Горение происходит настолько быстро, что оно реально завершается до того, когда вторичный компонент разваливается под воздействием расширяющегося ядерного запала.

И термоядерное оружие, и лабораторный ИТ имеют дело со взаимодействием изотропных рентгеновских лучей с веществом. Когда в качестве драйверов для микро-ИТ используются пучки частиц или лазеры в видимом диапазоне спектра, нагрев внешних слоев пылинки преобразует энер-

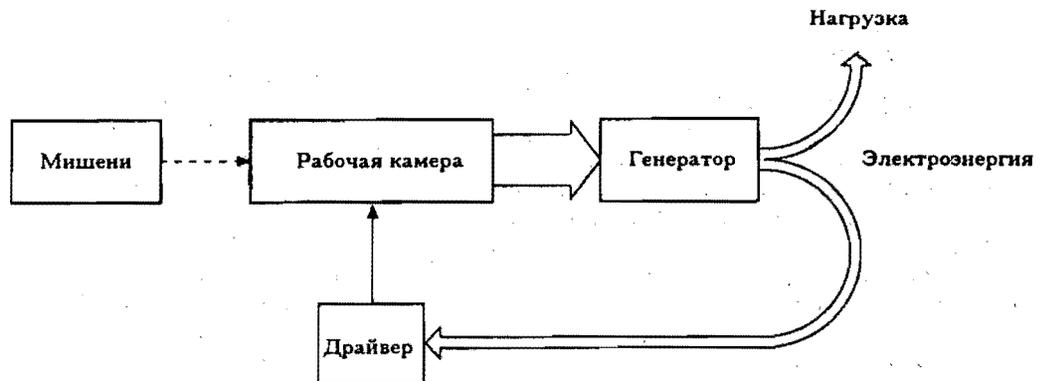


Рисунок 1

Кругооборот энергии в ИТ-реакторе.

Потери энергии имеют место в некоторых компонентах ИТ-реактора. Чтобы такой реактор стал экономичным, требуется коэффициент усиления  $G$  не менее 100.

гию драйвера в рентген, который затем сжимает пылинку (см. ссылку<sup>12</sup>, стр. 2 и приложение А к этой статье). Достижимая температура зависит от мощности драйвера и эффективности преобразования.<sup>13</sup>

И микро-, и макро-взрывы (водородные бомбы) зависят от принципа сжатия топлива, которое на первом этапе носит адиабатический характер, и запуска термоядерных реакций в поджигаемой сердцевине на втором этапе путем местного нагрева. В

обоих случаях сжатие<sup>14</sup> и распространение термоядерного горения<sup>11,15</sup> описываются теми же самыми формулами. Но есть ряд количественных и качественных различий. Количественные различия связаны с разными плотностями, температурами и временами сгорания. Качественные различия возникают в основном по той причине, что чем более миниатюризированы эксперименты, тем более опасными становятся неустойчивости. Это препятствует примене-

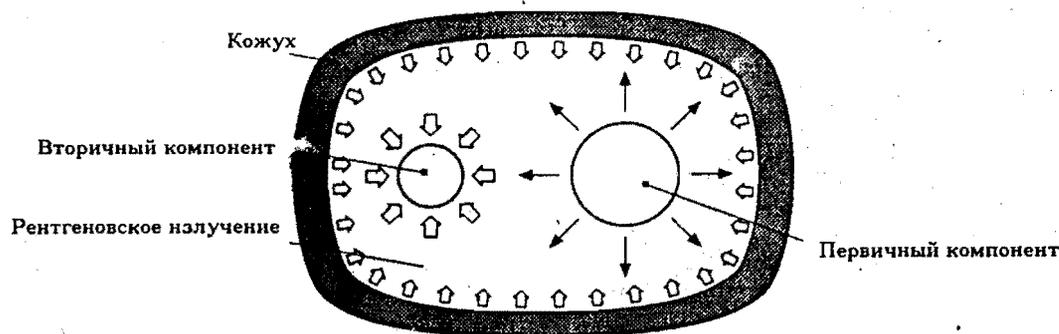


Рисунок 2

Простая схема принципа действия термоядерного оружия, фактически состоящего из ядерной взрывчатки (первичный компонент, или ядерный запал) и вторичного компонента, работающего на синтезе. При ядерном взрыве излучаются рентгеновские лучи, которые служат драйвером. Многократное поглощение и переизлучение этого вида энергии драйвера приводит к образованию изотропного поля излучения внутри полости (затененная центральная площадь), что и служит причиной симметричной имплозии вещества вторичного компонента.

нию законов подобия при переходе от макроэкспериментальных результатов (подземные ядерные взрывы) к микроэкспериментам и наоборот.

Оружейное топливо (например,  $\text{LiD}_{0,5}\text{T}_{0,5}$  или  $\text{LiD}$ ; см. работу<sup>11</sup>, стр. 84) также отличается от смеси D-T, используемой в микроэкспериментах по ИТ. Однако можно себе представить будущие эксперименты с другими веществами для синтеза, например,  $\text{LiD}_{0,5}\text{T}_{0,5}$  с температурой зажигания около 30 кэВ, после того, как будет достигнуто зажигание смеси D-T. При этом окружающее вещество может состоять из  $\text{LiD}_{0,5}\text{T}_{0,5}$ , а топливом для загорающей сердцевинки останется D-T. В данном случае внешняя область будет нагреваться бегущей волной горения, возникающей в сердцевине из D-T, которая сама поджигается при более низких температурах.

Другое различие между макровзрывами и микроэкспериментами (по крайней мере, до сих пор) состоит в том, что вторичный компонент термоядерного оружия может иметь не сферическую, а цилиндрическую форму<sup>10</sup>. Но и такие конфигурации кажутся вероятными в будущем для микроэкспериментов.

Сходство (фактическое и потенциальное) между микро-ИТ и макровзрывами предлагает вниманию ряд потенциальных военных приложений.

*Исследования по физике ядерного оружия.* Эти исследования по физике ядерного оружия касаются в основном взаимодействия нейтронов и рентгеновских лучей с веществом, динамики имплозии, уравнений состояния при экстремальных значениях давления и температуры и распространения термоядерного сгорания. Микро-ИТ предоставляет шансы для измерения данных, важных для компьютерного моделирования подземных и лабораторных взрывов, например, поперечных сечений реакций синтеза.

*Вклад в разработку новых концепций ядерного оружия*<sup>6</sup>. Часть подземных макроэкспериментов, необходимых для разработки новых концепций ядерного оружия, может быть в принципе заменена на лабораторные микроэксперименты. Однако разработка и испытание прототипа будет содержать гораздо более конструктивных деталей, нежели можно промоделировать в исследованиях по ИТ. Поэтому такие исследования не могут заменить полномасштабных испытаний новых конструкций оружия.

*Сохранение опыта специалистов при полном запрете на ядерные испытания.* Никогда не рассматривался запрет на иссле-

дования по микро-ИТ в рамках Договора о полном запрещении ядерных испытаний. Поэтому в режиме такого Договора можно до известной степени сохранить основополагающий научный опыт путем проведения НИОКР по ИТ<sup>7,16</sup>. Более того, НИОКР по ИТ может привлечь к себе внимание творческих личностей и сохранить их в военных лабораториях, что всегда было предметом обеспокоенности в США<sup>6</sup>. Так, было высказано предложение оставлять экспертов в американских военных лабораториях на дополнительные пять лет<sup>17</sup>.

*Изучение эффектов воздействия ядерного излучения на военную технику.* Источник микро-ИТ с высоким коэффициентом усиления сможет моделировать энерговыход (рентген, нейтроны, гамма-лучи, расширяющаяся плазма) ядерного оружия лучше, чем любой другой. Если достигнуть энерговыхода порядка 100-1000 МДж, то можно было бы проводить в лабораторных условиях многие эксперименты по уязвимости и порогу поражения военной техники, которые сейчас делаются при подземных испытаниях.

*Потенциальные приложения двойного назначения. Воспроизводство трития и делящихся материалов.* При D-T реакции выделяются быстрые нейтроны, которые можно использовать для воспроизводства трития или делящихся материалов. Не требуется, чтобы коэффициент усиления у подобного термоядерного воспроизводящего реактора был таким высоким, как у энергетического реактора, потому что он не обязательно должен обладать положительным энергобалансом.

*Лабораторный рентгеновский лазер.* ИТ-микровзрыв служит источником интенсивного кратковременного импульса некогерентных рентгеновских лучей. Это излучение можно использовать как энергию накачки для лазерного излучения в рентгеновском диапазоне<sup>18</sup>. Подобный лазер предоставит лабораторный источник интенсивного когерентного рентгена многоцелевого назначения. При биологических исследованиях становится возможным наблюдать молекулярные процессы в живых клетках (см. ссылку<sup>8</sup>, стр.5, и ссылку<sup>18</sup>, стр.155). Для того потребуются очень короткие длины волн (около 3 нм) и короткие (менее 1 нс) импульсы.

С другой стороны, такие эксперименты могут также оказаться полезными для НИОКР по разработке рентгеновского лазера с накачкой от ядерного взрыва - важного исходного компонента программы СОИ.

## КОНТРОЛЬ НАД ВООРУЖЕНИЯМИ И ИТ

Хотя контроль за НИОКР по ИТ затруднен, есть причины пытаться его осуществить. Без такого контроля может понизиться эффективность Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний и увеличиться опасность распространения ядерного оружия.

**Влияние на Договор о полном запрещении испытаний.** Существует несколько причин для полного запрета на ядерные испытания (критическая оценка аргументов в пользу продолжения испытаний дана в работах<sup>19,20</sup>), одной из которых служит блокировка разработки новых типов ядерных боеголовок, например, ядерного оружия третьего поколения. (В работе<sup>21</sup> рассматривается влияние сроков заключения такого Договора на разработку ядерного оружия третьего поколения.) Эта цель в какой-то степени может быть подорвана исследованиями по ИТ. Без подземных взрывов большой мощности ИТ самого по себе будет недостаточно, чтобы сделать возможным разработку такого оружия. Однако исследования по ИТ могли бы сократить число испытаний, которые необходимы для разработки новых типов ядерного оружия, если Договор о полном запрещении вдруг потерпит неудачу.

Хотя американские военные лаборатории утверждают, что нельзя решить поставленные перед ними задачи при ограничениях на число испытаний, они предпринимают меры подготовки на тот случай, если такие ограничения будут наложены. В число таких мер входит и испытательная установка для ИТ с большим коэффициентом усиления под названием "Афина"<sup>22</sup>.

**Опасность распространения ядерного оружия и ИТ.** НИОКР по ИТ подразумевает две опасности для распространения: во-первых, D-T реакция синтеза (ИТ или магнитный термояд) дает возможность воспроизводства плутония или трития в больших количествах<sup>23</sup>.

Во-вторых, микро-ИТ может дать знания о создании основанного на синтезе оружия. Первая американская водородная бомба была взорвана всего через год после того, как Теллер и Улам поняли принципы сжатия и нагрева вторичного компонента. Это идея, которая также очень важна для концепции мишени в поле чернотельного излучения (см. приложение А). В связи с этим следует иметь в виду, что Канада, Германия, Израиль и Япония - все имеют значительные программы по ИТ.

## КРИТЕРИИ ДЛЯ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЦЕЛЕЙ НИОКР

Не ко всем потенциальным приложениям ИТ применимы одни и те же технические требования. Например, ИТ-электростанции нужны драйверы с частотой импульсов свыше 5 в секунду и общий коэффициент усиления не менее 100. В то же время для военных приложений могут оказаться достаточными частота импульсов порядка одного в день и коэффициент усиления  $G = 1$  или даже меньше.

Поэтому особенности программы НИОКР по ИТ будут зависеть от того, на какие конкретные приложения она направлена. Рассмотрим, например, НИОКР по лазерным драйверам и конструированию мишеней для ИТ.

Как показывают теоретические оценки<sup>24</sup>, которые согласуются с полученными в Ливерморе на основе сложного и засекреченного компьютерного моделирования результатами<sup>25</sup>, для достижения превышающего единицу коэффициента усиления в принципе необходима энергия драйвера около 1 МДж. Единственный лазер, который обещает в ближайшем будущем выделять столь высокую энергию при достаточно малой длине волны, - это лазер на неодимовом стекле (Nd-лазер). Коэффициент усиления  $G = 100$  - минимальное требование для энергоактора на синтезе, потребует энергию драйвера в диапазоне 1-50 МДж. В этой оценке сделаны критические предположения: внешний слой вещества-топлива для синтеза, сжимается при минимальном начальном нагреве и без серьезных неустойчивостей, а на нагрев сердцевины тратится около 5-15% энергии драйвера.

За последние несколько лет в этом направлении достигнут хороший прогресс. Например, в Ливерморе была экспериментально проверена секретная конструкция мишени, удовлетворившая необходимым требованиям. Результаты были получены в рамках секретной программы подземных испытаний под названием "Центурион Соль", которую провели совместно Ливерморская ("Соль") и Лос-Аламосская ("Центурион") национальные лаборатории (см. работу<sup>26</sup>, стр.55). Энергия излучения от подземного ядерного взрыва была использована для превращения в энергию драйвера.

В Ливерморе утверждается, что последние результаты, в частности, на лазере "Нова" и в эксперименте "Центурион Соль", придают уверенность в том, что реально

достижимо получение высокого усиления с использованием драйвера, обладающего энергией 10 МДж. В Ливерморе существуют планы лабораторной установки по микро-синтезу с новой лазерной системой на неодимовом стекле, которая может получить такие энергии драйвера, но еще не ясно, будут ли выделены деньги на эту работу. Стоимость проекта "Афина" оценивается примерно в 750 млн. долларов.<sup>7,27</sup> Недостаток лазеров на неодимовом стекле состоит в том, что время охлаждения составляет несколько часов после каждого выстрела и поэтому нельзя надеяться на высокую частоту импульсов.

За последние годы продвинулись также теоретические и экспериментальные работы по драйверам с тяжелыми ионами в Германии (Физический институт в Дармштадте, Ядерный центр в Карлсруэ, институт плазменной физики в Гархинге) и в США (Лоуренсовская лаборатория в Беркли, Лос-Алamosская и Брукхейвенская национальные лаборатории)<sup>28-30</sup>. Тяжелые ионы предлагают вниманию высокие энергии, мощности и частоты, высокие эффективности и хороший энерговыход. Но исследования драйверов с тяжелыми ионами находятся еще в младенческом состоянии.

В табл.1 приведены преимущества и недостатки различных драйверов<sup>1</sup>, а в табл. 2 указаны основные технические требования для наиболее часто обсуждаемых потенциальных приложений: военные задачи и производство энергии.

Из этих таблиц вытекает, что существуют очевидные различия в стратегиях НИОКР по ИТ для гражданских и военных целей. Например, энергетическому реактору требуется частота повторения импульсов не менее пяти в секунду, но этого никогда не добиться с лазерным драйвером из неодимового стекла, который предложен в Ливерморе. Другие лазеры, которые в принципе могли бы достичь таких частот при большой энергии в импульсе, требуемой для ИТ, в обозримом будущем совсем маловероятны. Поэтому к любому утверждению, что важной целью НИОКР по ИТ служит производство энергии, следует относиться скептически, если НИОКР остается сосредоточенным на лазерных драйверах.

Драйверы на тяжелых ионах наиболее перспективны для реализации высоких частот повторения. В принципе кажется возможным разработать драйверы на тяжелых ионах, которые удовлетворяют всем необходимым требованиям, хотя это не столь очевидно: разработка таких драйверов находится еще в младенческом состоянии.

Различие между двумя этими направлениями изображено на рис. 3. Лазерное направление предлагает много военных приложений в скором будущем, но маловероятно, чтобы оно внесло вклад в наиболее важные гражданские задачи. Направление тяжелых ионов предлагает приложения лишь в отдаленном будущем, но оставляет надежды и для гражданских вариантов.

Таблица 1  
Преимущества и недостатки различных драйверов ИТ

Тип драйвера	Преимущества	Недостатки
Лазер	Возможность фокусировки в малом пятне Высокий технический уровень Переменная продолжительность и форма импульса	Малая энергия импульса Малая частота повторяемости импульсов Малая эффективность поглощения энергии
Легкие ионы	Большая энергия импульса Эффективное использование энергии Развитая технология Высокая эффективность Малые размеры и стоимость	Неопределенность фокусировки Малая интенсивность Неопределенное распространение пучка при требуемом значении тока
Тяжелые ионы	Большая энергия импульса Низкие токи пучка (по сравнению с легкими ионами) Высокая эффективность Высокая частота повторения импульсов	Высокая стоимость Неопределенность фокусировки и распространения пучка Необходимость высокого вакуума

Таблица 2  
Критерии оценки целей исследований по ИТ

Цель	Главное условие достижения цели	Технические особенности
Энергетический реактор	Большая энергия импульса Большая мощность в импульсе Высокая частота импульсов Высокая эффективность драйвера Эффективное поглощение энергии Быстрое изготовление мишеней	На современном техническом уровне может быть достигнута только с тяжелыми ионами Необходима простая конструкция мишеней
Физика термоядерного оружия	Хорошее понимание физических процессов Большая энергия импульса Большая мощность в импульсе Гибкое построение экспериментальных установок	Сложные методы диагностики, мишени-имитаторы черного тела Наиболее подходит неодимовый лазер Необходимы гибкое построение геометрии радиационного поля, геометрии мишеней и гибкость выбора материалов

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ КОНТРОЛЬ НАД ВООРУЖЕНИЯМИ В ПРИЛОЖЕНИИ К НИОКР ДВОЙСТВЕННОГО ХАРАКТЕРА?

На основе изучения этого случая мы приходим к заключению, что непереносимая предпосылка любой попытки контролировать военную технологию на стадии НИОКР - отождествление истинных целей НИОКР, не так уже безнадежно, если программа большая, планируется из одного центра и зависит от государственных субсидий. Так, например, наилучшим индикатором того, что американская программа по ИТ имеет военную направленность, служит ее приверженность к лазерным драйверам, а не к драйверам на тяжелых ионах.

Открытое международное сотрудничество кажется наиболее обещающим и наиболее реалистичным способом ограничения военных НИОКРов. Положение с международным сотрудничеством в области ИТ резко отличается от того, что существует в термоядерном синтезе с магнитным удержанием (МТ). До сих пор международное сотрудничество по исследованиям в области ИТ было маломасштабным с ограниченным числом участников, потому что в некоторых странах значительная доля работ засекречена. Напротив, МТ представляет из себя выдающийся пример международного сотрудничества, причиной чему служат в основном гражданские приложения - в данном случае это производство энергии (см. работу<sup>31</sup>, стр. 1646). Один из путей для создания уверенности в том, что исследования по ИТ

идут главным образом по мирному пути, состоит в открытом научном обмене исследовательскими работами. Государства должны стремиться снять всю секретность с научных исследований и приглашать сотрудников их других стран принять участие во всех крупных научных НИОКР. Но как правило все еще отсутствует политическая готовность принимать иностранных ученых и инспекторов в военных лабораториях. Всегда появляются опасения, что другая сторона может получить какие-то важные военные сведения. Поэтому контроль над вооружениями на стадии НИОКР кажется наиболее обещающим, когда обе стороны находятся на одном и том же уровне НИОКР.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Специальной благодарности заслуживает Эгберт Канкалайт за постоянный интерес и поддержку. Я особенно признательна многим коллегам за многочисленные полезные советы и стимулирующие дискуссии, особенно Вольфгангу Либерту, Гетцу Нойнеку и Уве Рейхерту. Хотелось бы также поблагодарить компанию "Фольксваген" за финансовую поддержку.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ А

##### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ИНЕРЦИАЛЬНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

В ИТ некоторая масса термоядерного топлива сжимается быстрым импульсом

Драйвер	Ближайшее будущее (10-20 лет)	Перспективы (более 20 лет)
Тяжелые ионы		Лабораторные рентгеновские лазеры Астрофизика Физика ядерного оружия Приобретение опыта Воздействие ядерного оружия Создание нового ядерного оружия Расщепляющиеся материалы Производство энергии Двигатели космических аппаратов
Лазеры	Создание нового ядерного оружия Воздействие ядерного оружия Приобретение опыта Физика ядерного оружия Астрофизика Лабораторные рентгеновские лазеры	Двигатели космических аппаратов Производство энергии Расщепляющиеся материалы

Рисунок 3

Пример раздвоения НИОКР.

Если исходить из предположения, что проекты НИОКР финансируются для практических результатов, то концентрация НИОКР по ИТ на лазерных драйверах, а не на драйверах с тяжелыми ионами, может быть интерпретирована как серьезный индикатор превосходства интереса к военным приложениям.

энергии от драйвера. Эта энергия вызывает испарение (абляцию) части топлива или удерживающей его оболочки (рис. 4). Оставшееся топливо сжимается к центру благодаря отдаче (абляционному давлению). Это может произойти с небольшим предварительным подогревом внутреннего топлива, чтобы достичь высокой плотности, в идеальном случае, как при адиабатическом сжатии. В конце стадии сжатия топливо в центральной части должно нагреться до таких температур, когда становятся возможными реакции синтеза. При таких реакциях синтеза энергия выделяется в виде кинетической энергии продуктов реакций.

Часть этой энергии вкладывается в соседние слои топлива, что приводит к волне горения, которая проходит через сжатое топливо, пока топливо не станет снова расширяться. В течение этого времени топливо удерживается только за счет своей инерции.

Чтобы достигнуть коэффициента усиления более единицы (зажигание), нужны

очень высокие температуры и давления, а также относительно большие времена удержания. Под временем удержания подразумевается то время, в течение которого можно сохранить высокие температуры и давления. Самое подходящее топливо для зажигания в микровзрывах - это смесь дейтерия и трития, которая реагирует следующим образом:  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$ . При этой реакции образуются ядро гелия и нейтрон - оба обладают кинетической энергией. Условие зажигания при данной температуре  $T$  описывается так называемым критерием Лоусона: для смеси дейтерия и трития он имеет вид:  $nt > 10^{14} \text{ с}\cdot\text{см}^{-3}$  для  $T = 10 \text{ кэВ}$ , где  $n$  - плотность топлива, а  $t$  - минимальное время удержания.

Таким образом произведение плотности  $n$  и времени удержания  $t$  (т.н. параметр удержания) должно превосходить некоторую величину, чтобы поджечь топливо. Минимальная температура, при которой скорость образования альфа-частиц превосходит

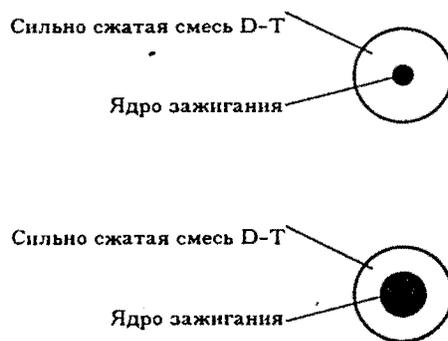
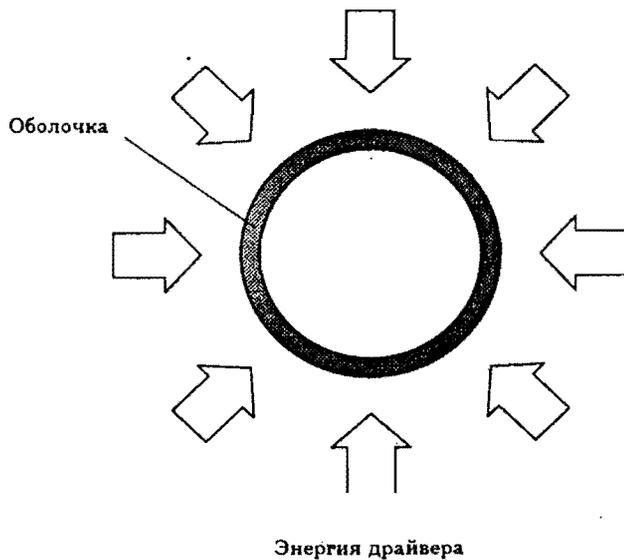


Рисунок 4

Схема трех стадий термоядерного горения с инерциальным удержанием

1. Внешняя часть стенки мишени испаряется под воздействием энергии драйвера и происходит имплозия оставшейся части мишени и сжатие дейтериевого-тритиевого топлива.
2. Топливо сжато очень сильно и его внутренняя часть ("ядро") нагревается до очень высоких температур.
3. Волна термоядерного горения очень быстро распространяется из ядра во внешние области мишени до тех пор, пока сжатый материал не начнет расширяться снова.

радиационные потери энергии, составляет  $T = 4$  кэВ. До сих пор зажигание было достигнуто только при использовании в качестве драйвера ядерной бомбы.

Выходная энергия ИТ должна быть достаточно малой, чтобы работать со взрывами в лабораторной установке. Практический предел составляет одну тонну тротилового эквивалента. Благодаря этому пределу на выделяемую энергию масса топливной мишеньки для ИТ не должна превосходить в

лабораторных экспериментах нескольких миллиграммов.

Существует две разные концепции микровзрывов, основанные на прямо или косвенно сжимаемых мишенях. Непосредственно сжимаемая мишень должна облучаться сферически симметричным интенсивным лазерным светом. Недостаток этого метода связан с тем, что присущие лазерному свету небольшие неоднородности усиливаются в процессе имплозии, и это при-



Рисунок 5

Схема косвенно сжимаемой мишени<sup>25</sup>

Мишень для синтеза помещается в центр области с чернотельным излучением и нагревается лазерными пучками, проникающими в полость через два небольших отверстия. Часть излучения преобразуется в рентгеновское излучение на внутренней поверхности полости благодаря процессам многократного поглощения и переизлучения. Это приводит к образованию изотропного поля излучения (область с легкой штриховкой на рисунке), где внутренняя мишень подвергается очень симметричной имплозии. Такие мишени составляют большую часть американской программы по ИТ.<sup>3</sup>

водит к неустойчивостям в процессе синтеза. Допуск на отклонения от сферической симметрии при имплозии менее 2%<sup>32</sup> и это требование пока что не выполняется при непосредственном сжатии.

Концепция косвенно сжимаемых мишеней (их называют также мишени с чернотельным излучением) более перспективна. Суть ее в том, что мишень для синтеза помещается внутри полости, которая нагревается лазером или пучком частиц, и это приводит к появлению внутри полости изотропного рентгеновского излучения (см. рис. 5).

Такое изотропное излучение способно вызывать очень симметричную имплозию. К сожалению, большинство американских исследований по этой теме засекречено. Однако, как сообщается, большинство подземных ядерных взрывов использовалось для косвенного нагрева мишеней рентгеном.<sup>33</sup>

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

#### СОСТОЯНИЕ НИОКР

Похоже, что наиболее важными лабо-

раториями для экспериментов по ИТ<sup>7,34-36</sup> являются Ливерморская национальная лаборатория, Лос-Аламосская национальная лаборатория<sup>37</sup>, Сандийская национальная лаборатория<sup>38</sup>, Рочестерский университет<sup>39</sup>, Исследовательская лаборатория ВМФ, Университет в Осаке<sup>40</sup>, Физический институт им. Лебедева в Москве<sup>41</sup> и Лимель во Франции. В табл. 3 приведены список используемых драйверов и их главные параметры.

Ряд меньших, но тем не менее очень важных программ развернуто в Германии, Великобритании, Израиле и Канаде.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. J. Duderstadt and A. Moses, "Inertial Confinement Fusion", New York John Wiley and Sons, 1982.
2. T.H. Johnson, "Inertial Confinement Fusion: Review and Perspectives," Proc. IEEE, 72 (1984), p.548.
3. J. Meyer-ter-Vehn, "Zur Physik des Fusionspellets", Phys.Blatter, 43 (1987), p.424.
4. A.J. Glass, "An Historic Overview of ICF:

Таблица 3  
Перечень наиболее интересных драйверов ИТ

Установка	Организация	Тип и длина волны в нм	Параметры импульса	
			Энергия, кДж	Длительность, нс
Нова	LLNL, Ливермор, США	Неодимовый лазер 1054 527 321	125 80 55	2 - 3
Аврора	LANL, Лос-Аламос, США	Лазер на KrF 248	10	5
PVFA II (проект)	Лаборатория Сандия, Альбу- керке, США	Ускоритель легких ионов	1 МДж	10 - 20
Омега	Рочестерский университет, США	Неодимовый лазер 1054, 527, 321	2 - 3	0,5 - 1
Фарос	Лаборатория ВМС, США	Неодимовый лазер 1054, 527	1,3	
Гекко XII	Университет в Осака, Япония	Неодимовый лазер 1054	5 - 30	0,1 - 1
Дельфин-1	Физический институт, Москва	Неодимовый лазер 1054	10	0,5 - 5
Фебус	Лимейл, Франция	Неодимовый лазер 1054 527	10 4	1 1
<p>Организации, наиболее активные в исследованиях ИТ, таковы:<sup>7,34-36</sup> Ливерморская национальная лаборатория, Лос-Аламосская национальная лаборатория,<sup>37</sup> Сандийская национальная лаборатория,<sup>38</sup> Рочестерский университет,<sup>39</sup> Исследовательская лаборатория ВМС США, Университет Осака,<sup>40</sup> Физический институт им. Лебедева в Москве,<sup>41</sup> и лаборатория в Лимейле, Франция.</p> <p>Менее крупные, но интересные программы реализуются в Германии, Великобритании, Израиле и Канаде.</p>				

- What Have We Learned?" J. Vac. Sci. Techn. A4 (1986), p.1098.
5. "National Defense Authorization Act for Fiscal Year 1989, "Report of the Armed Services Committee, House of Representatives on H.R. 4264, 100th Congress, second session, report 100-563, p.395.
  6. W.Happer, ed., Review of DoE's Inertial Confinement Fusion Program, (Washington DC; National Academy of Sciences, 1986).
  7. E.Storm, J.D.Lindl, E.M.Campbell, T.P.Berratt, L.W.Coleman, J.L.Emmett, W.J.Hogan, J.T.Hunt, W.F.Krupke, and W.H.Lowdemilk, Progress in Laboratory High Gain ICF: Prospects for the Future, (Livermore, California: UCRL-99427, December 1989).
  8. W.J.Hogan, "A Multiuser Development Scenario for ICF," in Laser Interaction and Related Phenomena, p.745.
  9. T.Cochran, W.M.Arkin, and M.M.Hoenig, Nuclear Weapons Databook Volume I: U.S. Nuclear Forces and Capabilities, (Cambridge, Massachusetts: Ballinger, 1984).
  10. H.Morland, "The H-bomb Secret," The Progressive, November 1979.
  11. W.Seifritz, Nuclear Explosive Devices - Threat of Energy Supply for Mankind? (Munich, Germany: Thiemig-Verlag, 1983).
  12. J.Meyer-ter-Vehn and M.Murakami, "Analysis of Heavy Ion Fusion Targets," Invited talk given at the International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Monterey, California, 6-9 December 1990.
  13. При использовании ионных пучков до сих пор получены температуры до 1 эВ; к 1992 г. ожидается подъем до 10-30 эВ. J.Meyer-ter-Vehn, S.Witkowski, R.Bock, D.H.H. Hoffmann, I.Hofmann, R.W.Muller, R.Arnold, and P.Mulser, "Accelerator and Target Studies for Heavy Ion Fusion at the Gesellschaft fur Schwerionenforschung," paper 214, Bull.Am.Phys.Soc. 34 (1989), p.1936.
  14. J.Meyer-ter-Vehn and C.Schalk, "Self-similar Compression Waves in Gas Dynamics," Zeitschrift.f.Naturforsch. 37a (1982), p.955.
  15. K.W.Brueckner and S.Jorna, "Laser Driven Fusion," Rev.Mod. Phys. 46, 325 (1974).
  16. Arms Control and Disarmament Agency, Washington DC, Fiscal Year 1981 Arms Control Impact Statements, p.460 ff.
  17. S.Younger, частное сообщение 1987 г.
  18. E.E.Fill, "X-ray Laser for the Laboratory", Phys.Blatter, 44 (1986), p.155.
  19. Toward a Comprehensive Nuclear Warhead Test Ban, (Washington DC: The International Foundation, January 1991).
  20. R.E.Kidder, Maintaining the U.S. Stockpile of Nuclear Weapons During a Low-Threshold or Comprehensive Test Ban, (Livermore, California: LLNL report UCRL-53820, 1987).
  21. D.L.Fenstermacher, "The Effect of Nuclear Test-ban Regimes on Third-generation-weapon Innovation," Science & Global Security 1 (1990), p.187.
  22. G.H.Miller, P.S.Brown, and C.T.Alonso, Report to the Congress on Stockpile Reliability, Weapon Remanufacture, and the Role of Nuclear Testing (Livermore, California: LLNL report UCRL-53822, 1987).
  23. T.Umezu and V.F.Demichev, "Interactions with Other Fields," Nucl.Fus. 30, p.1935.
  24. J.Meyer-ter-Vehn, "On Energy Gain of Fusion Targets: The Model of Kidder and Bodner Improved," Nucl.Fus. 22 (1982), p.561.
  25. J.H.Nickolls, in LLNL Laser Prog. Ann.Rep. 1979, 2, p.3.
  26. United States General Accounting Office, Briefing Report to the Chairman, Armed Services Committee, House of Representatives, "Performance of Participants in DoE's Inertial Confinement Fusion Program," GAO/RCED-90-113BR, March 1990.
  27. E.Storm, "Progress Toward High-Gain Laser Fusion," (Livermore, California: LLNL report CRL-98828, 1989).
  28. T.F.Goodlove, "Accelerator Research for Heavy Ion Inertial Fusion," Nucl.Instr.Meth. B24/25 (1987), p.736.
  29. R.C.Arnold and J.Meyer-ter-Vehn, "Inertial Confinement Fusion Driven by Heavy-Ion Beams," Rep.Prog.Phys. 50, 559 (1987).
  30. K.A.Long, "Range Shortening, Radiation Transport, and Raleigh Taylor Instability Phenomena in Ion-Driven ICF-Reactor-Size Targets: Implosion, Ignition, and Burn Phases," Phys.Rev. A35 (1987), p.2631.
  31. International Fusion Research Council, "Status Report on Controlled Thermonuclear Fusion," Nucl.Fus. 30, p.1641.
  32. M.Murakami and J.Meyer-ter-Vehn, "Radiation Symmetrization in Indirectly Driven ICF Targets," submitted to Nuclear Fusion, January 1991.
  33. William J.Broad, "Secret Advance in Nuclear Fusion Spurs a Dispute Among Scientists," New York Times, 21 March 1988, p.7.

34. S.Nakai, "Inertial Confinement," Nucl.Fus. 3, p.2863.
35. Ibid., p.1779.
36. W.Hogan, "Progress in ICF at Lawrence Livermore Laboratory," in Laser Interaction and Related Phenomena, p.689.
37. P.D.Goldstone, J.R. Ackerhalt, L.S.Blair, D.C.Cartwright, L.R.Foreman, C.A. Fenstermacher, A.Hauer, D.E.Hanson, J.K. Hoffer, R.Kristal, W.C.Mead, L.A.Rosocha, and D.C.Wolson, "ICF Research at Los Alamos," in Hora and Miley, eds., Laser Interaction and Related Phenomena, pp. 469-482.
38. D.L.Cook, "PBFA II Progress and Plans," in Heinrich Hora and George H.Miley, eds., Laser Interaction and Related Phenomena 8 (New York: Plenum Press, 1988), pp.619-632.
39. R.L.McCrory and J.M.Sores, "Laser Fusion Experiments at the University of Rochester," Nucl.Fus. 25 (1985), p.1333.
40. C.Yamanaka, "Inertial Confinement Fusion at Osaka," Nucl. Fus. 25 (1985), p.1343.
41. N.G.Basov, G.V.Sklizov, W.Brunner, and K.Junge, "Investigation of Laser-produced Plasmas for Nuclear Fusion," Ann. Phys. 42, 394 (1985).