1977 г. Май *Том 122, вып. 1(500)*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

533.92(049.3)

ИНЕРЦИАЛЬНОЕ УДЕРЖАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ: НОВЫЙ ЭТАП

Проблемы лазерного термоядерного синтеза. Сост. и ред. А. А. Филюков. М., Атомиздат, 1976, 295 с.

Прогнозы грядущего энергетического кризиса, в избытке публикуемые научными и околонаучными изданиями и организациями, неизбежно подогревают интерес к термоядерной проблеме. Э. Теллер, выступивший 9 мая 1972 г. в Монреале на Международной конференции по квантовой электронике, вольно или невольно дал толчок к резкому обострению интереса к «термояду» лазерному, ассигнования на который, надо думать, выросли после его речи уже примерно на порядок, причем в эту гонку исследовательских работ все активнее включаются Франция, ФРГ, Англия, Япония и Австралия. В США эта гонка стимулируется солидными вложениями частного капитала.

О сущности новейшего этапа термоядерных исследований инерциального удержания плазмы до последнего времени многие знали лишь понаслышке. Правда, на нашем книжном рынке появлялись 55 000 экз. бестселлера по лазерному термояду [1], тут же ставшего модным раритетом. Но даже хорошая популярная публикация не значила сколько-нибудь существенного заполнения «вакуума». Требовалось нечто более основательное, начиная с перевода первоисточников.

Именно такую роль призван сыграть новый сборник, преимущественно переводных работ, посвященных лазерному термояду в «горячий» период 1972—1973 гг. Речь идет о серьезной книге, по-современному освещающей проблемы лазерного термояда. Читателям сборника предоставлена неплохая возможность поднять свою культуру до уровня, позволяющего усваивать новейшие работы.

Не будем углубляться в такие нюансы, как достаточность изложения истории проблемы во вступительной статье, целесообразность отождествления старых терминов «изоэнтропический» и «адиабатический», а также введения терминов новых вроде «лазерное обжатие», не говоря о досадных опечатках (перепутанные обозначения на рис. 6, с. 115, и др.). Рискнем утверждать, что к несомненным недостаткам книги можно отнести разве что ее весьма малый тираж (2 500 экз.) и замалчивание дат и мест публикации оригиналов статей.

Во вводной статье «Новый подход к использованию лазеров для управляемого синтеза» Е. П. Велихова и А. А. Филюкова, написанной в умеренных тонах, подчеркивается историческая важность работ, начатых в ФИАНе: «...Только после приоритетной публикации [2] советских ученых, академика Н. Г. Басова и О. Н. Крохина, о возможности достижения термоядерных температур с помощью лазеров, организация работ в США приняла форму проектов».

Вслед за этой обстоятельной статьей читатель знакомится со знаменитой речью Теллера в Монреале, провокационно-скромно озаглавленной «Современные двигатели внутреннего сгорания», где нарочито небрежно излагается внешне простая идея Дж. Накколса о том, что термоядерное топливо, как это полагается и для воздушно-топливной смеси автомобильного мотора, гораздо выгоднее сначала сжимать, правда не в 10, а раз в 1000—10 000 и более, и только затем поджигать, вызывая локальное вначале горение, затем распространяющееся по остальному горючему.

Интересно, что наделавшая столько шума речь Теллера была и не первым открытым сообщением об идее низкоэнтропийного «холодного» сверхплотного сжатия термоядерного топлива, разрабатываемой в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса с 1960 г. Сам Дж. Накколс и его ближайший сотрудник Л. Вуд за полгода до Теллера докладывали [3] о том же довольно детально. Однако ни участники упомянутого сове-

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1977 г.

щания, ни иные осведомленные лица не пожелали прореагировать на выступление под броским названием «Перспективы необычного подхода к проблеме управляемого термоядерного синтеза», зачитанное никому не известными авторами, пусть даже один из них назвался руководителем отдела ядерных боеголовок Ливерморской лаборатории: в печати эти имена почти не встречались. Теллер — другое дело!

Открыто обсуждавшаяся в 1963—1972 г. программа сводилась к попыткам нагрева не слишком плотной высокоэнтропийной мишени лазерным импульсом, который мыслился более или менее случайным по форме, но максимальной возможной энергии и мощности [4, 5], для одновременного инициирования практически всей массы топлива. По нынешним представлениям [6, 7] такой способ требует лазерных импульсов с энергией ≈ 1000 *Мдж* и мощностью $\approx 10^{18}$ *вт*. Поскольку же критерий Лоусона говорит об обратной пропорциональности минимальной массы термоядерной мишени квадрату ее плотности, сжатие обещает снижение и этой массы, и соответствующей энергии инициирования.

Статьи сборника посвящены, коротко говоря, растолковыванию той истины, что процессы сжатия, инициирования и утилизации термоядерного микровзрыва не в пример сложнее — и для понимания, и для реализации — аналогичных процессов в двигателе внутреннего сгорания образца XIX века, причем низкий уровень энтропии и возможность ограничиться начальным поджиганием лишь менее 1% сжатого горючего позволяют снизить требования к энергии лазерного импульса на ≈ 5 порядков, а к мощности — на ≈ 3 порядка. Дальнейшее снижение потребной мощности достигается, если от сочетания простой мишени и резко «обостренного» импульса перейти к системе со сложной мишенью в сочетании с импульсом, в среднем менее обостренным, но, по-видимому, достаточно «хитрым» [6, 8].

За сокращенным вариантом доклада Теллера следует статья «Лазерное сжатие вещества до сверхвысоких плотностей и его использование в управляемом термоядерном синтезе» из сентябрьского номера «Nature» за 1972 г. Кстати, именно этот журнал был первым и в публикации ключевых идей ядерной энергетики 40-х годов. Среди ее авторов — Дж. Накколс, долгие годы работавший без публикаций (случай исключительный для послевоенной Америки!) и публикующийся затем почти еженедельно. Несмотря на многочисленные, нередко преднамеренные, недомолвки, статья эта читается и сейчас как вполне свежая. Здесь если и не разъясняются, то упоминаются все или почти все идеи, которые явились фундаментом для работ, публикуемых с 1972 г. сотнями авторов, которых статья эта избавила от психологического барьера обыкновенных плотностей.

Эта и многие другие работы могут внушить мысль о решающей роли ЭВМ в создании теории лазерного термояда. Тем не менее в 1960—1973 гг. ЭВМ сыграли, пожалуй, все-таки скорее уточняющую, нежели принципиальную роль: для понимания и количественной оценки быстрого сверхплотного сжатия, с поджиганием малой доли топлива, достаточно карандаша и бумаги. Без ЭВМ, разумеется, невозможно найти рациональные режимы, особенно с учетом реальных уравнений состояния и процессов переноса [6]. Но само по себе быстрое сверхплотное сжатие (существующее в виде центрированных изэнтропических волн вопреки стандартной университетской термодинамике) было известно еще по трудам классиков — от Римана и Рэлея до Гюгонио и Буземанна.

Как и следовало ожидать, реакция специалистов на идеи Накколса оказалась далеко не однородной. Можно предположить, что и среди читателей нового сборника мнения будут по крайней мере трех категорий:

1. «Это тривиально, ибо по частям в принципе уже было известно, а Накколс просто вовремя и к месту собрал нужные решения».

2. «Абсурдно, так как ключевая идея о сверхплотном сжатии топлива, поддерживаемого в низкоэнтропийном вырожденном состоянии, не более чем красивая игрушка, требующая для своей реализации лазеров нереальной мощности 10^{15}—10^{16} *вт*; лазерный термояд будет получен по иной схеме, если вообще будет получен».

3. «Но ведь и паровая тяга, и мотор автомобиля были осуществлены не по идеальному циклу Карно; реалистические циклы Стирлинга, Ренкина, Отто, Дизеля приходят и уходят, а цикл Карно остается, причем его оригинальность не страдает от тривиальности каждого отдельного этапа цикла. Идея низкоэнтропийного сверхплотного сжатия преобразила ход работ [1-3, 6-10], породила новые идеи и надежды, произвела такое же впечатление, какое пережили американские индейцы при объяснении принципа колеса, сделавшего ненужным вековечное использование и летом саней, унаследованных от северных предков».

А пока лазерный термояд не стал еще фактом и вряд ли станет до начала 80-х годов, прогресс исследований 1974—1976 гг. дал обильную дополнительную аргументацию в пользу сторонников каждой из упомянутых позиций...

Автор следующих двух статей —«Управляемый термоядерный синтез», «Лазерный термоядерный синтез» виднейший теоретик ядерной материи К. Брюкнер, переквалифицировавшийся в небезуспешного конкурента ливерморско-лос-аламосской школы — в качестве главного теоретика частной кампании лазерного термояда KMS-

fusion, физики которой первыми в США получили общепризнанно термоядерные нейтроны в результате лазерной имплозии стеклянных оболочек с DT-газом.

В статье «Сжатие сферических DT-мишеней лазерным импульсом до условий термоядерного горения» Кларка, Фишера и Мейсона из Лос-Аламосской лаборатории с мощнейшим парком ЭВМ, излагаются результаты расчета поведения сферических оболочек, испытывающих ускорение до сотен километров в секунду одновременно с уплотнением более чем в 10^3 раз, причем неравновесность учитывается введением отдельных температур квазинезависимых подсистем — электронов, ионов и планковского (по определению) излучения, а также нелокальным законом вложения энергии продуктов термоядерных реакций — альфа-частиц — в инициируемые плотные и относительно холодные слои сжатого топлива. Довольно существенным упрощением, частично снятым в более поздних публикациях этих же авторов, является «целенаправленное» предположение об эффективном превращении энергии лазерного излучения с $\lambda_{CO_2} = 10{,}6$ *мкм* в устойчивый гидродинамический процесс ускорения — уплотнения оболочки 1,6—2%-ной толщины Столь идеализированная модель все же позволяет узнать многое, например выяснить, что коэффициент усиления, т. е. отношение «полезного» термоядерного энергетического выхода к затрачиваемой лазерной энергии, весьма чувствителен, в частности, к величине начальной интенсивности облучения $\dot{E}_0$ «обостряющегося» импульса, особенно — для мишеней малой массы. Рассмотрен диапазон $\dot{E}_0 = 10^8$—10^{11} *вт* для полых сфер DT весом от 3 до 250 *мкг*. Приведены и простейшие законы подобия для лазерно-термоядерных мишеней — сплошных и полых сфер.

Кстати, во вступительной статье обойдена молчанием проблема эффективности преобразования лазерной энергии в энергию имплозии, рассмотренная намеренно упрощенно в статьях сборника. Такое умолчание отвечает основному замыслу составителя — опубликовать работы авторов, уделяющих главное внимание гидродинамическим эффектам, остающимся в силе при достаточно разнообразных механизмах вложения лазерной (или иной — электронной, ионной) энергии в плазму мишени. Ведь именно гидродинамическая схема является ключевой идеей нового этапа работ по достижению инерциального удержания термоядерной плазмы.

Автор следующей статьи Рей Киддер из Ливермора — хорошо известен по более ранним публикациям [4, 5]. Интересным результатом опубликованной здесь его работы «Взаимодействие фотонных пучков большой интенсивности с плазмой» является ударная волна разрежения, вызываемая давлением излучения, не исследованная автором, однако, на устойчивость.

Из других статей упомянем обзор Бойера (Лос-Аламос) и заметку ранних энтузиастов оболочечных мишеней американцев Альштрома и Штейнхауэра, французских теоретиков из Лимея во главе с Бобеном, а также немецко-американского физика-изобретателя Винтерберга — пионера электронно- и ионно-пучкового инициирования термоядерных микровзрывов, снискавшего себе славу также идеей (пусть далекой от реализации) снижения на многие порядки критической массы делящихся материалов посредством сверхплотного сжатия их микрограммовых крупинок. Здесь явно не хватает редакторского комментария с упоминанием значительных успехов, достигнутых коллективом Института атомной энергии им. И. В. Курчатова под руководством Л. И. Рудакова в экспериментах по получению термоядерных DD-нейтронов при воздействии релятивистских электронных пучков на оригинальные мишени [9].

Особое внимание привлекает статья ведущих ливерморских теоретиков о перспективах создания ракетных двигателей, работающих на микровзрывах лазерного синтеза, дающих струи плазмы, истекающие со скоростями до $\approx 10^4$ *км/сек*, т. е. с удельными импульсами $\approx 10^6$ *сек*, позволяющие всерьез планировать высадку на Марс космонавтов (химическое топливо значило бы длительность перелета, вызывающую недопустимую атрофию организма человека). Составитель мог бы здесь добавить ссылки на следующий этап исследований Ливерморской лаборатории, посвященных разработке разнообразных лазерно-термоядерных двигателей аэропланов и кораблей, не говоря о ссылках на работы школы А. М. Прохорова [7].

Есть и проблемы, более или менее не зависящие от достижений в изобретении рациональных термоядерных мишеней: как использовать для производства электроэнергии микровзрыв? Предварительный ответ на этот насущный вопрос дает статья калэмских физиков Хэнкокса и Сполдинга (Калэм, Англия), в которой устанавливаются определенные общие черты для любого ЛИТР-лазерного термоядерного реактора.

В последней работе «Автомодельные режимы сжатия плазмы конечной массы» сборника сотрудники ИПМ АН СССР Н. В. Змитренко и С. П. Курдюмов обобщают теорию, аналогичную результатам Р. Киддера, на автомодельные процессы сверхплотного сжатия с учетом диссипативных процессов и моделированием объемных источников и стоков энергии, т. е. при нарушении и адиабатичности, и изоэнтропичности. Авторы указывают на нетривиальную взаимосвязь таких процессов с неадиабатическим разлетом плазмы, а также анализируют при монотонном внешнем воздействии

на плазму новый эффект появления немонотонной структуры (нескольких максимумов температуры обусловленных зависимостью коэффициента ионной вязкости от температуры и т. д.), которую можно считать нелинейной стадией развития «перегревной неустойчивости». При всей важности этой работы авторы фактически оставляют открытым вопрос о ее значимости для реализации лазерного термояда или иных, смежных проблем.

Осталось упомянуть еще две предпоследние статьи, несколько иного направления —«Цепные реакции синтеза» Дж. Мак-Нелли (Окридж) и «Ядерный синтез в неравновесных условиях» А Бобылева, А. Филюкова и В. Чуянова (ИПМ АН СССР). Мак-Нелли рассматривает цепной процесс синтеза ядер, аналогичный уже не горению, а локально термодинамически неравновесным реакциям по Н. Н. Семенову, в мегаэлектрон-вольтной плазме без охлаждения горячих ядер холодными электронами, когда легкие ядра, от протона до гелия, служат катализаторами синтеза, если топливом служит литий-6, впрыскиваемый в горячую плазму. Редактор сборника с соавторами рассматривает пространственно неограниченную DT- или D^3He-плазму, сжатую, по-видимому, изоэнтропически (или с потерей энтропии) до плотности в 10^5—10^6 раз превышающей твердотельную. Развивая предварительные соображения Грызиньского (вероятно, навеянные замечаниями А. Эддингтона 30-х годов), авторы анализируют цепную реакцию синтеза D + T, инициируемую, например, нейтронами, дающими высокоэнергетичные ядра отдачи. Горячие продукты синтеза в столь плотной холодной плазме рассеивают свою энергию среди ядер, а не среди электронов (здесь сильно вырожденных и поэтому малоспособных к восприятию энергии). Достаточно высокие значения коэффициента размножения поддерживаются в основном за счет нейтронов, вклад же заряженных продуктов реакций синтеза оказывается малым. Особо следует отметить условие критичности такой системы, полученное авторами в аналитическом виде.

Итак, широкому читателю предоставлена возможность перейти от слухов и поверхностных сообщений к основательному изучению классических работ. Но скоро ли лазерно-термоядерная энергетика войдет, если не в быт, то в промышленное производство?

Прямой ответ на этот законный вопрос читатель напрасно будет искать в статьях данного сборника. Здесь, правда, упоминается лазерный импульс до 10 *кдж* как достаточный для осуществления «критического» эксперимента. Между тем, по мере строительства 10-*кдж* установок, за 3—4 года цифра эта сдвинулась к 100 *кдж* [8]. Далее, сам Э. Теллер еще в конце 1973 г. уверенно предрекал [11] пальму первенства не лазерному термояду, а установкам магнитного удержания разреженной плазмы, типа Токамак; другой, не менее видный классик термояда Г. Бете выразил уверенность, что [12] и к 2020 г. управляемый термоядерный синтез любой разновидности не даст и пятой части промышленной выработки электроэнергии США. Значит, лазерно-термоядерный бум не означает еще революции энергетики?

Не рискуя навязывать собственные прогнозы, позволим себе еще одну историческую параллель: стоило ли волноваться сторонникам аэропланов из-за первенства монгольфьеров и дирижаблей? Ведь «хотя мы и являемся всецело продуктом исторического развития, все же именно мы — продолжатели этого развития; история отнюдь не тащит нас по предустановленному пути». И любители чистой науки и прикладники согласятся, видимо, в этом с Э. Шрёдингером [13].

В. А. Белоконь

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Филюков, Лазерный термоядерный синтез, М., «Знание», 1975.
2. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, ЖЭТФ **46**, 171 (1964).
   Н. Г. Басов, А. А. Кологривов, О. Н. Крохин, А. А. Рупасов, Г. В. Склизков, А. С. Шиканов, Письма ЖЭТФ **23**, 474 (1976).
3. L. L. Wood, J. H. Nuckolls, Environment **14**, 29 (1972).
4. Лазеры и термоядерная проблема. Под ред. Б Б. Кадомцева, М., Атомиздат, 1973.
5. Физика высоких плотностей энергии. Под ред. П. Кальдиролы и Г. Кнопфеля. Перев. под ред. О Н. Крохина, М., «Мир», 1974.
6. Термоядерные процессы сверхплотного сжатия. Под ред. Р. З. Сагдеева, М., «Мир», 1977.
7. А. М. Прохоров, С. И. Анисимов, П. П. Пашинин, УФН **119**, 3 (1976).
8. J. H. Nuckolls, Paper on Conference Quantum Electronics, Amsterdam, 1976.
9. Л И. Рудаков и др., Письма ЖЭТФ **24**, 4 (1976).
10. В А. Белоконь, Ю. А. Ильинский, Р. В. Хохлов, Письма ЖЭТФ **24**, 509 (1976).
11. E. Teller, in: Laser Interaction, N.Y., Plenum Press, 1974.
12. H. Bethe, Sci. American **234** (1), 21 (1976) (имеется перевод: УФН **120**, 455 (1976)).
13. Э. Шрёдингер, Избранные труды, М., «Наука», 1976, с. 262.