

nuclear fusion

JOURNAL OF PLASMA PHYSICS AND THERMONUCLEAR FUSION

fusion nucléaire

JOURNAL DE PHYSIQUE DES PLASMAS ET FUSION THERMONUCLEAIRE

ядерный синтез

ЖУРНАЛ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

fusión nuclear

REVISTA DE FISICA DEL PLASMA Y FUSION THERMONUCLEAR

1962 SUPPLEMENT — PART 1

PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH

CONFERENCE PROCEEDINGS,
SALZBURG, 4–9 SEPTEMBER 1961



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – VIENNA 1962
AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE – VIENNE 1962
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ – ВЕНА 1962 г.
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA – VIENA 1962

NUCLEAR FUSION
FUSION NUCLEAIRE
ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ
FUSION NUCLEAR



1962 SUPPLEMENT

PART 1

PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE ON PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH,
4—9 SEPTEMBER 1961, SALZBURG, AUSTRIA

LES ACTES DE LA CONFERENCE SUR LA PHYSIQUE DES
PLASMAS ET LA RECHERCHE CONCERNANT LA FUSION
NUCLEAIRE CONTROLLEE, 4—9 SEPTEMBRE 1961,
SALZBOURG, AUTRICHE

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ
ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОГО ЯДЕРНОГО
СИНТЕЗА, 4—9 СЕНТЯБРЯ 1961 г., ЗАЛЬЦБУРГ, АВСТРИЯ

LAS ACTAS DE LA CONFERENCIA SOBRE LAS INVESTI-
GACIONES EN MATERIA DE FISICA DEL PLASMA Y
FUSION NUCLEAR CONTROLADA, 4 AL 9 DE SEPTIEM-
BRE DE 1961, SALZBURGO, AUSTRIA

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY . AGENCE INTERNATIONALE
DE L'ENERGIE ATOMIQUE . МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ
ЭНЕРГИИ . ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Selection and Program Committee — Comité de sélection et d'établissement du programme — Комитет по отбору докладов и разработке программы — Comité de Selección y del Programa

- P. HUBERT Chef du Service de recherches sur la fusion contrôlée, Commissariat à l'énergie atomique, France
- K. V. ROBERTS Theoretical Physics Division, Culham Laboratory, United Kingdom Atomic Energy Authority, United Kingdom
- C. VAN ATTA Associate Director, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, United States of America

Scientific Secretariat — Secrétariat scientifique — Научный секретариат — Secretaría Científica

- B. BURAS (*Co-ordinating Scientific Secretary*) Division of Research and Laboratories, International Atomic Energy Agency
- P. A. DAVENPORT (*Scientific Secretary*) Culham Laboratory, United Kingdom
- C. ETIEVANT (*Secrétaire scientifique*) Association Euratom — CEA, Service de recherches sur la fusion contrôlée, Fontenay-aux-Roses, France
- W. F. GAUSTER (*Scientific Secretary*) Oak Ridge National Laboratory, United States of America
- Е. В. ПИСКАРЕВ (*Ученый секретарь*) Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, Москва, СССР
(E. V. PISKAREV)
- B. TORKI (*Assistant Scientific Secretary*) Division of Research and Laboratories, International Atomic Energy Agency
- I. DRUTMAN (*Technical Secretary*) Division of Research and Laboratories, International Atomic Energy Agency

Editor of "Nuclear Fusion" — Rédacteur de la revue «Fusion Nucléaire» — Редактор журнала «Ядерный синтез» — Redacteur de "Fusión Nuclear"

- J. G. BECKERLEY Division of Scientific and Technical Information, International Atomic Energy Agency

Executive Secretary — Secrétaire exécutif — Исполнительный секретарь — Secretario Ejecutivo

- W. LISOWSKI Division of Scientific and Technical Information, International Atomic Energy Agency

Conference Services — Services linguistiques — Обслуживание конференции — Servicios de la Conferencia

- A. BERNSTEIN (*Chief Interpreter*) International Atomic Energy Agency
- L. S. LIEBERMAN (*Records Officer*) International Atomic Energy Agency

Public Information — Information — Общественная информация — Información pública

- P. FENT (*Press Officer*) International Atomic Energy Agency
- MISS M. NAPIER (*Special Media Officer*) International Atomic Energy Agency

FOREWORD — AVANT-PROPOS — ПРЕДИСЛОВИЕ — PREFACIO

In 1958, at the Second United Nations Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, the results of research on controlled nuclear fusion obtained in a few technically advanced countries were first disclosed to the world at large. Since then, it has become more and more evident that a better understanding of fundamental phenomena is needed before the goal of energy extraction from nuclear fusion may be reached. Consequently, the intensive research undertaken in recent years has been primarily basic research in plasma physics.

The fact that such research is most complex and costly has enhanced the desirability of co-operation and exchange of information and experience between all those engaged in this field of nuclear science and technology. It has become obvious that the International Atomic Energy Agency can play an important part in promoting such co-operation on a world-wide scale.

After consultation with a number of leading scientists, the Agency convened an international conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. The extent of the interest shown by Member States did not merely confirm that such a conference was actually needed at the present time, but greatly exceeded expectations. The quality and volume of the papers submitted, the number of participants and of countries represented, all bore witness to this interest.

Today, plasma physics and controlled thermonuclear fusion research is a more-or-less academic study. All that can be said at this stage is that it should eventually lead to a practical energy source. The day may come when the energy from nuclear fusion will be needed and when the well-being of mankind may depend on the ability to draw on this almost limitless reservoir.

The publication of the conference proceedings is intended to promote international co-operation and accelerate progress in this most important field of scientific endeavor.

INTRODUCTION – ВВЕДЕНИЕ – INTRODUCCIÓN

The Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research was held in Salzburg, Austria, on 4—9 September 1961. More than 500 scientists, representing 29 nations and 6 international organizations, participated in the Conference. The Proceedings are published in three parts as a 1962 supplement to this journal.

Because of the many interconnections between the various problems of plasma physics, it was decided to have no parallel plenary sessions. Accordingly, nine sessions were held during the six days of the Conference. During these sessions, 111 papers were presented. The “free” afternoons and evenings were devoted to at least fourteen informal discussions of topics of special interest to the participants. The present Proceedings do not include the records of these informal discussions (the discussions would have ceased to be “informal” if recorded), although it seems certain that new ideas generated in these discussions will lead to publication of papers elsewhere.

“Part 1” contains the texts (in original language only) of all papers delivered in Sessions I, II and IV of the Conference, the records (in English) of the discussions of these papers, as well as the texts (in English and Russian) of the two concluding speeches by Prof. Artsimovich and Dr. Rosenbluth summarizing the Conference. Translations of the abstracts of each paper (Sessions I, II, IV) are given at the end of this part of the Proceedings. In addition there is an author index.

The remainder of the Proceedings is published in “Part 2” (Sessions III, V, VI, VIII) and in “Part 3” (Sessions VII, IX). The abstracts of those papers accepted but not presented to the Conference, a list of participants, subject and author indexes for the entire Proceedings are included in the third part.

In preparing the Proceedings the Editor gratefully acknowledges the substantial help of B. Buras, P. A. Davenport, C. Etievant, W. F. Gauster, W. A. Newcomb and E. V. Piskarev.

CONTENTS — SOMMAIRE — СОДЕРЖАНИЕ — INDICE

SUMMING UP SESSION — SYNTHÈSE DE LA CONFÉRENCE—ИТОГОВОЕ ЗАСЕДАНИЕ—RECAPITULACIÓN DE LA CONFERENCIA

Л. А. АРЦИМОВИЧ: Состояние исследований по управляемому ядерному синтезу на сентябрь 1961 г. Обзор результатов экспериментальных работ	9
L. A. ARTSIMOVICH: Controlled nuclear fusion research, September 1961: Review of experimental results	15
M. N. ROSENBLUTH: Controlled nuclear fusion research, September 1961: Review of theoretical results	21
M. H. РОЗЕНБЛЮТ: Состояние исследований по управляемому ядерному синтезу на сентябрь 1961 г. Обзор результатов теоретических работ	25

SESSION I — SÉANCE I — ЗАСЕДАНИЕ I — SESIÓN I

H. ALFVÉN, C.-G. FÄLTHAMMAR, R. B. JOHANSSON, E. A. SMÅRS, B. WILNER, E. WITALIS: Gas insulation of hot plasma: theory and experiment	33
B. ANGERTH, L. BLOCK, U. FAHLESON, K. SOOP: Experiments with partly ionized rotating plasmas	39
G. VON GIERKE, K. H. WÖHLER: On the diffusion in the positive column in a longitudinal magnetic field	47
H. A. BLEVIN, P. C. THONEMANN: Plasma confinement using an alternating magnetic field	55
H. GRAD, R. VAN NORTON: Non-adiabatic orbits in a cusped magnetic field	61
T. K. ALLEN, R. W. P. McWHIRTER, I. J. SPALDING: Experiments on cusp compression	67
D. C. HAGERMAN: Some experimental studies of plasma injected into a cusped magnetic field	75
Н. Г. КОВАЛЬСКИЙ, С. Ю. ЛУКЬЯНОВ, И. М. ПОДГОРНЫЙ: Исследование поведения плазмы в магнитной ловушке «Орех»	81
И. М. ПОДГОРНЫЙ, В. Н. СУМАРОКОВ: Захват плазмы в ловушку с магнитным полем, нарастающим к периферии	87
Discussions (Session I) — Discussions (Séance I) — Дискуссии (Заседание I) — Debates (Sesión I)	93

SESSION II — SÉANCE II — ЗАСЕДАНИЕ II — SESIÓN II

R. F. POST: Critical conditions for self-sustaining reactions in the mirror machine	99
F. H. COENSGEN, W. F. CUMMINS, W. E. NEXSEN, Jr., A. E. SHERMAN: Production and containment of hot deuterium plasmas in multistage magnetic compression experiments	125
B. LEHNERT: Stability of an inhomogeneous plasma in a magnetic field	135
M. N. ROSENBLUTH, N. A. KRALL, N. ROSTOKER: Finite Larmor radius stabilization of "weakly" unstable confined plasmas	143
G. GIBSON, W. C. JORDAN, E. J. LAUER: Containment of positrons in an asymmetric mirror geometry	151
N. CHRISTOFILOS: Energy balance in the Astron device	159
H. P. FURTH: The "mirror instability" for finite particle gyro-radius	169
М. С. ИОФФЕ, Е. Е. ЮШМАНОВ: Экспериментальное исследование неустойчивости плазмы в ловушке с магнитными пробками	177
J. KILLEEN, W. HECKROTTE, G. BOER: Energy transfer from hot ions to cold electrons in plasma	183
W. STODIEK, R. A. ELLIS, Jr., J. G. GORMAN: Loss of charged particles in a stellarator	193
R. W. MOTLEY: Diffusion of plasma from the stellarator	199
D. J. GROVE, R. M. SINCLAIR, W. STODIEK, W. L. HARRIES, L. P. GOLDBERG: Some preliminary results on containment time in the Model C Stellarator	203
Discussions (Session II) — Discussions (Séance II) — Дискуссии (Заседание II) — Debates (Sesión II)	207

SESSION IV — SÉANCE IV — ЗАСЕДАНИЕ IV — SESIÓN IV

Г. Ф. БОГДАНОВ, И. Н. ГОЛОВИН, Ю. А. КУЧЕРЯЕВ, Д. А. ПАНОВ: Свойства плазмы, образующейся в «Огре» при инжекции пучка быстрых молекулярных ионов водорода	215
А. Е. БАЖАНОВА, В. Т. КАРПУХИН, А. Н. КАРХОВ, В. И. ПИСТУНОВИЧ: Циклотронное и тепловое излучение плазмы в «Огре»	227
J. L. DUNLAP, C. F. BARNETT, R. A. DANDL, H. POSTMA: Radiation and ion energy distributions of the DCX-1 plasma	233
W. F. GAUSTER, G. G. KELLEY, R. J. MACKIN, Jr., G. R. NORTH: Calculation of ion trajectories and magnetic fields for the magnetic trapping of high-energy particles	239

P. R. BELL, G. G. KELLEY, N. H. LAZAR, R. J. MACKIN, Jr.: The DCX-2 program of plasma accumulation by high-energy injection	251
Р. А. ДЕМИРХАНОВ, Ю. С. ХОДЫРЕВ, Н. И. ЛЕОНТЬЕВ, Т. И. ГУТКИН: Взаимодействие высокочастотного электромагнитного поля с плазмой	259
C. GOURDON, F. PRÉVOT: Formation d'un plasma par injection de particules rapides	265
D. R. SWEETMAN: Mirror machine experiments and related atomic cross-section measurements at A.W.R.E. Aldermaston	279
Н. Н. БРЕВНОВ, М. К. РОМАНОВСКИЙ, Ю. Ф. ТОМАЩУК: Исследование плазмы в адиабатической ловушке «Огренок»	289
H. DREICER, H. J. KARR, E. A. KNAPP, J. A. PHILLIPS, E. J. STOVALL, Jr., J. L. TUCK: Cyclotron resonance in the static magnetic field of a helix	299
В. А. СИМОНОВ, Б. Н. ШВИЛКИН, Г. П. КУТУКОВ: Получение чистой высокотемпературной плазмы в квази-стационарных системах. Процессы, приводящие к поступлению примесей в плазму	313
В. А. СИМОНОВ, Г. Ф. КЛЕЙМЕНОВ, А. Г. МИЛЕШКИН, В. А. КОЧНЕВ: Поддержание сверхнизких давлений нейтрального газа в процессе накопления высокотемпературной плазмы в магнитных ловушках с инжекцией	325
M. VUILLEMIN: Effet d'une paroi conductrice sur la stabilité des configurations à miroirs magnétiques	341
M. C. BECKER, R. A. DANDL, H. O. EASON, Jr., A. C. ENGLAND, R. J. KERR, W. B. ARD: An investigation of electron heating at the cyclotron frequency	345
Discussions (Session IV) — Discussions (Séance IV) — Дискуссии (Заседание IV) — Debates (Sesión IV)	353
Abstracts in English	361
Résumés en français	367
Аннотации по-русски	378
Resúmenes en español	386
Author index	397

SUMMING UP SESSION

SYNTHÈSE DE LA CONFÉRENCE

ИТОГОВОЕ ЗАСЕДАНИЕ

RECAPITULACIÓN DE LA CONFERENCIA

9 SEPTEMBER 1961 — 9 SEPTEMBRE 1961

9 СЕНТЯБРЯ 1961 Г — 9 DE SEPTIEMBRE DE 1961

Chairman — Le président — Председатель — El Presidente

G. Vendryès (*France*)

Scientific Secretary — Secrétaire scientifique — Ученый секретарь — Secretario Científico

B. Buras (*International Atomic Energy Agency*)

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ НА СЕНТЯБРЬ 1961 г. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ*

Л. А. АРЦИМОВИЧ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР,

МОСКВА, СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

Г-н Председатель,

Закончившаяся сегодня Конференция продемонстрировала широкий размах исследований, связанных с проблемой управляемого термоядерного синтеза. Более 250-ти экспериментальных и теоретических работ было представлено в качестве материалов для Конференции и более 30-ти часов стремительный поток новой научной информации низвергался с этой кафедры на головы многочисленных слушателей. Обмен мнениями и результатами как в рамках официальных заседаний, так и во время так называемых «неформальных» дискуссий и отдельных бесед был очень интенсивным и обсуждение научных вопросов носило плодотворный, хотя иногда, быть может, и очень горячий характер.

И все же, подводя итоги работы Конференции, мы вынуждены признать, что за много лет интенсивного труда пройден лишь первый, сравнительно небольшой этап на пути к поставленной великой цели и мы еще только приближаемся к главному барьеру, преграждающему вход в область сверхвысоких температур.

Нагретая до высокой температуры плазма очень легко освобождается от накопленной тепловой энергии посредством различных механизмов неустойчивости. В экспериментах, осуществленных до сих пор, плотную плазму удавалось удерживать при относительно высокой температуре в течение промежутков времени по порядку величины, не превышающих сотни микросекунд. До сих пор интенсивность так называемых настоящих термоядерных реакций в плазме оказывается настолько малой, что они могут быть полностью замаскированы различными ускорительными процессами. Пока еще не установлен достаточно тесный контакт между результатами экспериментальных исследований и теоретического анализа. В особенности это относится к важнейшему вопросу об устойчивости плазмы. Вследствие этого пока еще слабо продвинута разработка методов стабилизации плазменных неустойчивостей. Ответственность за такое положение вещей ложится, конечно, прежде всего на экспериментаторов. Однако у них есть все же серьезное оправдание. Оно следует из специфических свойств изучаемого объекта, которые крайне осложняют постановку и проведение экспериментов.

Получение достаточно чистой водородной или дейтериевой плазмы само по себе представляет нелегкую задачу, т. к. из-за взаимодействия со стенками вакуумной камеры сгустки горячей плазмы очень быстро загрязняются атомами и ионами примесей тех веществ, которые адсорбируются на поверхности стенок, вследствие чего возникают очень большие радиационные потери. В качестве примера заметим, что в опытах с тороидальными плазменными шнурами, даже после длительной вакуумной тренировки, при каждом разряде вспыхивает интенсивное излучение примесей. Это один из основных факторов, мешающих подъему температуры плазмы в опытах подобного рода. Очень большие трудности возникают при самой попытке исследования свойств плазмы в таких кольцевых шнурах, так как здесь проявляется своеобразный принцип неопределенности, состоящий в том, что чистота условий опыта находится в непримиримом противоречии с использованием диагностической методики.

Спрятанный за металлическими оболочками и сложными обмотками, плазменный шнур, оказывается, вследствие своей недоступности и крайней чувствительности к любому прикосновению, исключительно неудобным объектом для исследования. В установках, принцип действия которых основан на инъекции быстрых частиц в магнитное поле, нас встречает другая трудность: из-за малой эффективности источников потоки частиц имеют сравнительно небольшую интенсивность и поэтому для заполнения ловушек требуется длительное время. За это время даже сравнительно слабые неустойчивости или же такие явления, как перезарядка на остаточном газе, успевают увести частицы из объема и поэтому не удается получать плазму с заметной концентрацией.

Если же мы пытаемся инжестировать в ловушку струю плазмы, то возникает сразу три до сих пор нерешенные проблемы: 1) как добиться, чтобы произошел захват плазмы, 2) как превратить направленный поток частиц струи в сгустки с более или менее изотропным распределением скоростей, и 3) как избавиться от нейтрального газа, который вместе с плазменной струей выходит из инжектора.

После этих общих замечаний, которые в какой-то степени оправдывают сравнительно медленное

* Речь проф. д-ра Арцимовича на заключительной сессии. Зальцбург, 9 сентября 1961 г.

продвижение вперед интересующей нас области науки, я перехожу к очень краткому и естественно также очень поверхностному обзору основных результатов, установленных в работах последних лет.

В целом в состоянии проблемы несомненно произошел очень большой сдвиг по сравнению с тем уровнем, который был продемонстрирован на Женевской конференции в 1958 году. Тогда основной объем научной информации по существу представлял собой нечто такое, что можно назвать выставкой идей. Эти идеи в большинстве своем были лишь слегка задрапированы грубыми и плохо проверенными экспериментальными данными, имевшими рекогносцировочный характер. В противоположность этому, сейчас почти по каждому разделу общей термоядерной программы можно назвать большое число тщательно выполненных экспериментальных работ и очень ценных результатов, образующих в своей совокупности достаточно надежный фундамент, опираясь на который можно будет в дальнейшем значительно ускорить темп исследований.

Знаменательно, что при этом запас основных физических идей практически остался неизменным. — за последние три года не было предложено ни одного существенно нового метода получения высокотемпературной плазмы. Вместе с тем произошло заметное перемещение центра тяжести в усилиях, направленных на разработку отдельных направлений общей программы. В начальной стадии разработки проблемы управляемых термоядерных реакций большое внимание уделялось исследованию простейшего способа получения высоких температур, в основе которого лежит использование линейных импульсных разрядов очень большой мощности и очень малой длительности (это так называемый быстрый линейный пинч). Усилия, направленные на исследование быстрого пинч-эффекта позволили еще до Женевской конференции получить ясную картину явлений, происходящих при разрядах такого типа, и найти механизм, лежащий в основе динамики плазменного шнура. Как известно, этот механизм заключается в ускорении плазмы под действием электродинамических сил. Одной из наиболее интересных черт, характерных для процессов указанного рода, является возникновение жестких излучений: нейтронов (в дейтериевой плазме) и гамма-лучей. В настоящее время мы знаем, что в типичных условиях эксперимента жесткие излучения обусловлены ускорительными процессами, причиной которых являются определенные формы неустойчивости, свойственные плазменным шнурам с большой силой тока. Повидимому, главную роль в возникновении быстрых положительных ионов, (а следовательно и нейтронов), играют неустойчивости типа перетяжек, а за возникновение быстрых нейтронов ответственна винтовая неустойчивость; связанная с тенденцией плазменного шнура к образованию так называемых «бессильных конфигураций».

Хотя в опытах с линейными пинчами удалось получить в плазме температуры, превышающие 1 млн. градусов, однако вскоре выяснилось, что вряд ли может быть серьезная надежда на практическое использование такого метода для получения интенсивных термоядерных реакций в масштабе, представляющем техническое значение. Поэтому интересы естественным образом переместились в сторону изучения систем несколько иного типа, в которых быстрое сжатие плазмы происходит под действием нарастающего внешнего поля. Речь идет о процессах, получивших название тета-пинч.

При тета-пинч-эффекте достигается максимальная концентрация магнитной энергии в малых объемах. Поэтому сжатие плазмы внешним полем представляет значительно более эффективный метод создания высоких температур, чем линейный разряд. Сравнительная простота экспериментальной аппаратуры и заманчивые перспективы исследований в этой области привели к тому, что изучение свойств тета-пинч стало за последние годы одной из наиболее популярных тем в репертуаре исследований по управляемому синтезу. Об интересе к этому направлению говорит с достаточной ясностью большое количество докладов, представленных на конференцию, — 20 по сравнению с 2—3 в Женеве. Если дело так пойдет и дальше, то мы скоро приблизимся к осуществлению лозунга: «каждая домашняя хозяйка должна иметь свой собственный тета-пинч». Основные факты, установленные при исследовании устройств, в которых образуется тета-пинч, сводятся к следующему: обычно в таких процессах внутри плотного цилиндрического слоя сжимающейся плазмы сохраняется захваченное магнитное поле, по направлению противоположное тому, которое давит на внешнюю поверхность плазмы. Работа сил магнитного сжатия расходуется в начальной стадии процесса главным образом на ускорение ионов, а релаксация захваченного внутреннего магнитного поля может вносить существенный вклад в нагревание электронной компоненты. Тета-пинч не является устойчивым плазменным образованием. Это обнаруживается особенно отчетливо на фотографиях свечения плазмы, полученных с помощью СФР.

В плоскости, перпендикулярной силовым линиям поля, сжимающийся комок плазмы напоминает чернильную кляксу или отдыхающего осминога с дырой посередине. Мы имеем здесь дело с типичным случаем магнитогидродинамической неустойчивости, так называемого желобкового типа. Она обусловлена, во-первых, тем, что в процессе быстрого сжатия и последующих радиальных пульсаций плазма испытывает сильное ускорение и, во-вторых, тем, что линии поля имеют неблагоприятную форму (выпуклостью наружу). Несмотря на недостаточную согласованность данных, которые приводятся различными авторами, можно все же принять, что на установках с предельными параметрами, построенных в Вашингтоне и Лос-Аламосе, удастся на время порядка нескольких

микросекунд получать сгустки плазмы концентрации 10^{16} и температурой порядка 10^8 эв. Я не хочу здесь затрагивать вопрос о природе нейтронного излучения, наблюдаемого в некоторых случаях быстрого сжатия дейтериевой плазмы, так как этот вопрос имеет чисто спортивный интерес.

Заметим, что если бы кто-либо из счастливых наблюдателей этого эффекта привез с собой в Зальцбург горсточку чистых нейтронов, образующихся в среднем за один разряд, то ее вряд ли хватило бы для того, чтобы подарить в качестве сувенира всего по одному нейтрону каждому гражданину гостеприимной Австрии.

Следует признать, что несмотря на многочисленные ценные исследования свойств тета-пинч, выполненные в Англии, СССР, США и других странах, природа этих процессов остается в достаточной степени темной во многих отношениях (сюда относится вопрос о механизме релаксации захваченного поля, о причинах вращения плазменного сгустка, об утечке частиц и т. д.). Неизвестно также, можно ли рассчитывать на то, что с помощью быстрого сжатия удастся в дальнейшем без существенных изменений формы магнитного поля получить достаточно устойчивый комок горячей плазмы. Анализируя вопрос о дальнейшей судьбе этого направления исследований, мы должны принять во внимание, что в настоящее время нет способов, которые позволяли бы создавать более плотные сгустки горячей плазмы, чем те, которые получаются в устройстве типа тета-пинч. Поэтому можно предположить, что на протяжении ближайших лет экспериментальные исследования сверхбыстрого сжатия плазмы нарастающим полем будут продолжаться, хотя, по-видимому, мало вероятно, чтобы они имели самостоятельные практические перспективы в рамках термоядерной программы.

Традиционным разделом термоядерной программы является исследование так называемых квазистационарных или медленных разрядов в тороидальных камерах. В этом разделе до сих пор было два основных направления. Первое из них происходит от идеи создания парамагнитного плазменного шнура с током, впитывающего в себя продольное магнитное поле сравнительно небольшой напряженности. Эта идея, как известно, реализована в установке «Зета», в установках «Альфа» и «Скептр». Второе направление основано на идее стабилизации тороидального разряда продольным полем, во много раз превышающим магнитное поле тока. Установки, принадлежащие к семейству «Токамак», являются материальным воплощением этого принципа. По существу, к тому же типу можно отнести стелларатор, если он работает в режиме омического нагрева.

Рассмотрим сначала ту ситуацию, которая сложилась на первом из указанных здесь основных направлений. Уже из доклада работников Харуэлла и Олдермастона на Женевской конференции выяснилось, что парамагнитный плазменный шнур становится жертвой неустойчивости. Последующие

работы, выполненные как в Англии, так и в СССР на установке «Альфа», подтвердили эти первоначальные заключения. Однако это не должно было привести, и в действительности не привело к прекращению работ. Эксперименты продолжались и дали ряд ценных сведений о поведении парамагнитных шнуров и свойствах образующей их плазмы. Мы укажем здесь только наиболее значительные результаты этих исследований.

Из-за малой величины газокинетического давления в плазменном шнуре создается бессильная геометрия магнитного поля, т.е. ток везде течет почти точно вдоль линии результирующего магнитного поля. Заметим, между прочим, что в квазистационарном режиме такая конфигурация поля и тока формально эквивалентна состоянию с предельной анизотропией электропроводности. Энергия, вводимая в плазму от источника электрического питания, в режимах с относительно небольшой мощностью уходит в виде излучения примесей, а в более напряженных режимах выбрасывается на стенку потоками частиц.

Спектроскопические измерения, выполненные на всех трех перечисленных выше установках, обнаруживают полное согласие в одном пункте. Из них следует, что средняя энергия ионов в разряде значительно выше, чем тепловая энергия электронов. По поводу зависимости энергии ионов от заряда Z и массы M единого мнения, по-видимому, не существует. Из измерений, выполненных в Харуэлле, как будто бы следует, что энергия ионов растет линейно с M и практически не зависит от заряда. Опыты на «Альфе» дают существенно иной результат, указывая на то, что энергия многозарядных ионов приблизительно пропорциональна Z и не очень сильно зависит от массы. Происхождение быстрых ионов пока еще не выяснено. Очень интересным эффектом является обнаруженное на «Зете» аномальное сопротивление плазмы, которое играет существенную роль в общем ходе процесса при низком начальном давлении газа в камере. Априори ответственность за резкое увеличение сопротивления плазмы можно возлагать на самые различные формы неустойчивости. Однако от этого еще очень далеко до настоящего объяснения. Несмотря на большое количество важной и интересной научной информации, представленной на конференцию различными лабораториями, в которых ведутся исследования парамагнитных плазменных шнуров, все же складывается впечатление, что это направление приближается к тому моменту, когда источник свежих данных будет исчерпан.

Говоря о результатах работ, выполненных на установках типа «Зета», нельзя не отметить, что эти работы стимулировали развитие целого ряда новых методов диагностики плазмы. Одним из самых блестящих методических достижений последнего времени является разработанный в Харуэлле способ измерения излучения плазмы на длинах волн субмиллиметрового диапазона. Несомненным методическим достижением является

также тонкая техника измерения энергетического спектра частиц плазмы, разработанная в Ленинграде и использованная на установке «Альфа».

Изучение процессов омического нагревания плазмы, находящейся в сильном магнитном поле, пока прошло только начальную стадию. Установлено, что при достаточно большой величине отношения $H_z H_\phi$ (H_z — напряженность продольного поля, а H_ϕ — напряженность поля тока) внешние признаки грубой нестабильности как будто бы исчезают. Вместе с тем обнаружено, что диффузия плазмы поперек силовых линий в таких системах имеет аномальный характер. Коэффициент диффузии на много порядков превышает значение, вытекающее из классической теории и приближается к той предельной величине, которую дает эвристическая формула Бома. Аномальная диффузия приводит к очень быстрому уходу частиц из плазменного шнура и в существующих установках ограничивает время его существования в лучшем случае несколькими сотнями микросекунд. Однако имеются некоторые экспериментальные факты, указывающие, что измерение скорости ухода частиц характеризует только поведение периферических областей плазменного кольца в тороидальной камере, в то время как внутри этого кольца существует более плотный ствол, в котором концентрация частиц удерживается на довольно высоком уровне (10^{12} – 10^{13}) в течение длительных промежутков времени. Истинный механизм процессов, являющихся причиной аномальной диффузии, в системах типа «Токамак» и «Стелларатор» в настоящее время является предметом обсуждения.

Теория может предложить несколько возможных объяснений этого явления — магнитогидродинамические неустойчивости высших мод, неустойчивость, характерная для плазмы с неоднородным распределением температуры, генерация ионного звука и т. д., однако имеющихся экспериментальных данных пока еще недостаточно для того, чтобы произвести окончательный выбор между этими возможностями. Пуск в ход «Стелларатора С», с которым мы все должны поздравить ученых и инженеров, работающих в Принстоне, вероятно, позволит значительно ускорить получение информации, необходимой для окончательного разъяснения механизма аномальной диффузии при омическом нагреве плазмы.

Вряд ли могут существовать какие-либо надежды на то, что с помощью одного лишь омического нагрева плазму в системах «Токамак» или в «Стеллараторах» удастся довести до термоядерных температур, однако не исключено, что этот метод создания горячей плазмы может быть очень полезен на первой стадии, когда температура поднимается до нескольких сотен электронвольт.

Исследования квазистационарных разрядов в сильном магнитном поле представляют несомненную ценность также с точки зрения физики плазмы. В таких разрядах плазма с высокой концентрацией заряженных частиц впервые предстает

перед нами как объект с достаточно хорошо очерченной геометрической формой, освобожденный от тех катастрофических деформаций, которые за несколько микросекунд меняют все параметры в мощных разрядах малой длительности.

Наиболее широкий размах за последние годы приобрела разработка широкого класса систем, которые можно объединить под общим названием магнитных ловушек. Сюда относятся различные типы так называемых «зеркальных» машин, магнитные системы с остроконечной геометрией, «Астрон» и системы, в которых плазма должна удерживаться высокочастотным полем. К этой же категории следует отнести и стелларатор, так как по основному принципу действия он не связан с квазистационарными разрядами. В магнитных ловушках функции удержания плазмы возлагаются на внешние поля, и величина R , может быть в принципе сколь угодно мала по сравнению с $H^2/8\pi$. При малой величине $8\pi R/H^2$ плазма не оказывает существенного влияния на сильное внешнее поле, и это облегчает задачу стабилизации некоторых опасных форм плазменной неустойчивости.

Рассмотрим сначала состояние экспериментальных исследований «по зеркальным» машинам. Системы, в которых плазма образуется путем инъекции и последующего захвата быстрых частиц, представлены в настоящее время «Огрой» и DCX (я говорю только о действующих установках). На Огре в течение последних лет изучался метод образования плазмы, основанный на инъекции молекулярных ионов, которые затем диссоциируют при столкновении с молекулами остаточного газа в камере. Обнаружено, что получающаяся таким путем плазма с низкой концентрацией подвержена действию характерной неустойчивости, которую, по-видимому, можно рассматривать как предельный случай желобковой неустойчивости магнитогидродинамического типа. Эту неустойчивость можно резко ослабить с помощью электрического поля. Однако даже при наличии такой стабилизации и при большой величине инжектируемого ионного тока концентрацию быстрых ионов пока удалось поднять только до уровня порядка 10^7 см³. На установке DCX, в которой диссоциация молекулярных ионов происходит на дуге, также наблюдаются явления, свидетельствующие о наличии неустойчивости (изменение энергетического спектра и распухание области, занятой плазмой). Однако в этом случае механизм процессов, приводящих к потере устойчивости, может носить совершенно иной характер, чем в других магнитных ловушках, так как в DCX мы имеем дело с совершенно своеобразным коллективом частиц (большая ионная карусель в атмосфере привязанного к ней электронного газа).

У тех, кто в настоящее время изучает свойство ловушек рассматриваемого типа, заботы связаны не только с поисками методов подавления неустойчивости, но еще в большей степени с разработкой новых методов инъекции и захвата частиц, так как метод инъекции, основанный на диссоциа-

ции молекулярных ионов, не представляется особенно эффективным. В связи с этим полезную роль могут сыграть интересные опыты, сделанные в Олдермастоне. Речь идет об образовании атомов с высшими возбужденными уровнями в процессе диссоциации молекулярных ионов водорода.

Ионизация потока таких возбужденных атомов магнитным полем дает новый механизм захвата заряженных частиц в ловушку. Однако условия для того, чтобы такой метод-захвата был достаточно эффективным, очень критические, так как вероятность ионизации должна экспоненциально зависеть от величины $V \times H$.

Существенное значение для выяснения важнейшего вопроса об устойчивости плазмы в зеркальных ловушках имеют тщательные исследования свойств плазмы, которые в течение ряда лет проводились в Институте атомной энергии Академии наук СССР на установке, получившей название ионного магнетрона. Плазма с концентрацией быстрых ионов порядка 10^9 — 10^{10} , заполняющая камеру ионного магнетрона, обнаруживает характерную неустойчивость, которая ограничивает длительность удержания частиц в магнитном поле промежутками времени порядка ста микросекунд. Анализ спектра и геометрического распределения высокочастотных колебаний плазмы показывает, что в данном случае имеет место типичный случай развития желобковой неустойчивости. Вместе с тем этот результат интересен еще в одном отношении — он демонстрирует, что грубая оценка времени распада неустойчивой плазменной конфигурации, в которой не учитывается стабилизирующее действие стенки и скорость развития деформации определяется в линейном приближении, может давать результат, на два порядка отличающийся от полученного на опыте. Это означает, что к интерпретации измерений времени удержания плазмы нужно подходить с очень большой осторожностью* — благодаря действию целого ряда стабилизирующих факторов бурная неустойчивость, разбрызгивающая сгустки плазмы за время, измеряемое долями микросекунды, может превратиться в медленное рассасывание плазмы, продолжающееся десятки доли миллисекунды.

Несомненный интерес представляют исследования магнитных ловушек с динамическими полями, которые уже в течение многих лет проводятся в Ливерморской лаборатории. В этой лаборатории разработана остроумная техника обращения с плазмой, с помощью которой сгусток плазмы в несколько этапов передвигается из одного участка ловушки в другой, постепенно сжимаясь и нагреваясь. Таким путем, повидимому, удастся получать плазму с энергией ионов в несколько киловольт и концентрацией частиц порядка 10^{12} — 10^{13} , существующую в течение нескольких десятков микросекунд. Это, безусловно, очень ценный результат.

Вопрос об устойчивости плазмы в этих опытах пока остается открытым.

За последние годы появился ряд экспериментальных работ, посвященных исследованию удержания плазмы в ловушках с так называемой остроконечной геометрией. Магнитная система такой ловушки создает поле с силовыми линиями, имеющими гиперболическую форму. Напряженность этого поля возрастает во все стороны от центральной области, в некоторой точке, в которой $H=0$. Согласно предсказаниям теории, плазма, наполняющая такую ловушку, должна быть магнитогидродинамически устойчивой. Однако это преимущество по сравнению с системами типа обычных зеркальных машин покупается дорогой ценой. Простые соображения показывают, что заряженные частицы могут ускользнуть из ловушки, подходя достаточно близко к боковому краю области, занятой плазмой (она имеет форму детского волчка). Подсчет числа частиц, уходящих из плазмы таким путем (через кольцевую щель), очень сильно зависит от конкретных предположений, которые делаются при теоретическом анализе. Поэтому оценка времени удержания плазмы в ловушке с остроконечной геометрией поля может быть получена только из прямых экспериментов.

Имеющиеся до сих пор в СССР, в Англии и США экспериментальные данные по ловушкам с гиперболическим полем носят лишь предварительный характер. Метод заполнения ловушки плазмой в большинстве экспериментов один и тот же. Струя плазмы из инжектора проходит ловушку и частично захватывается в ней под действием процессов, механизм которых еще не очень ясен. В согласии с предположениями простейших теорий, оказывается, что частицы уходят из магнитной системы в радиальном направлении через кольцевую «щель». Время удержания плазмы в таких установках составляет несколько десятков микросекунд. Большинство опытов до сих пор было проделано со сравнительно холодной плазмой $T_E \sim 10$ эв, и поэтому в механизме ухода частиц могли играть определенную роль кулоновские столкновения. Следует отметить, что поведение плазмы в ловушке должно существенно зависеть от характера ее распределения в пространстве. Механизм ухода частиц может иметь совершенно различный характер в случае, когда плазма сосредоточена в объеме, из которого поле вытеснено, и в случае, когда плазма и поле перемешаны друг с другом. В проделанных до сих пор экспериментах имел место второй из указанных случаев.

Первые опыты, в которых плазменный сгусток, впущенный в ловушку рассматриваемого типа, подвергается быстрому сжатию в нарастающем магнитном поле, пока еще не дали достаточно определенных результатов, но зато продемонстрировали хорошую экспериментальную технику.

В связи с тем, что как «зеркальные машины», так и ловушки с встречными магнитными полями обладают (по крайней мере, теоретически) крупными дефектами и, вероятно, не могут служить для длительного удержания высокотемпературной плазмы, естественно возникает мысль о создании

магнитной ловушки с полями комбинированного типа, в которой должны объединиться достоинства простых систем и исчезнуть их недостатки. Простым примером такой ловушки может служить устройство, в котором к полю магнитных зеркал добавляются поля токов, текущих по металлическим проводникам, расположенным вдоль линий магнитного поля зеркальной системы симметрично относительно ее оси. Первые же опыты с этой комбинацией полей, выполненные в Институте атомной энергии, позволили обнаружить интересные факты. Оказалось, что с помощью проводников с таким расположением можно повысить время жизни быстрых частиц, примерно на порядок величины.

Одновременно с увеличением длительности удержания ионов наблюдается резкое снижение амплитуды высокочастотных колебаний в плазме. Если этот, сугубо предварительный, результат получит дальнейшее развитие, то это будет означать, что имеется эффективное средство борьбы с той формой магнитогидродинамической неустойчивости, которая представляет главную опасность для системы с магнитными пробками.

Наиболее совершенной ловушкой с комбинированными полями, очевидно, является стелларатор. Однако он представляет собой настолько сложную установку, что проведение экспериментальных работ на нем является очень нелегкой задачей. Поэтому необходимо искать также другие пути создания полей, обеспечивающих устойчивость плазменных конфигураций.

Следует сказать несколько слов о так называемой проблеме «универсальной аномальной» диффузии, которая время от времени появляется на горизонте в качестве мрачного предвестника грядущих бедствий. В настоящее время мы вряд ли можем согласиться с тем, что аномальная диффузия является неизбежным пороком плазмы, запертой в магнитном поле. Гораздо вероятнее, что она связана с характерными свойствами магнитных ловушек и зависит от тех манипуляций, которые проводятся с плазмой. Так, например, создается впечатление, что при омическом нагреве аномальная диффузия трудно устранима. Если же плазма не подвергается воздействию тока, текущего вдоль линий магнитного поля, то аномальная диффузия может полностью отсутствовать или же проявляться в сильно ослабленной форме.

Разрешите мне перейти к заключению. Проблема управляемого термоядерного синтеза по своей трудности оставляет позади все другие научнотехнические проблемы, порожденные успехами естествознания в 20 веке. Эти трудности особенно резко заметны по контрасту с простотой тех физических идей, на которых основаны конкретные методы удержания и нагревания плазмы.

При оценке дальнейших перспектив наибольшую неопределенность представляет вопрос о том, какая опасность связана с различными формами неустойчивости плазмы. И вместе с тем именно

этот вопрос и есть единственное по-настоящему большое место всей проблемы. Мы видим, что теоретические исследования все время обнаруживают новые механизмы возникновения неустойчивости. Вместе с тем они отнюдь не идут в сторону доказательства универсальной нестабильности плазмы. Нужно также иметь в виду, что степень убедительности всех прогнозов на устойчивость не очень велика, и поэтому практическое применение теории устойчивости дает скорее осторожные рекомендации, чем строгие правила. Хотя это и невозможно доказать, но все же создается убеждение, что при дальнейшем развитии способов нагревания и термоизоляции плазмы, известных в настоящее время, удастся, используя достаточно сильные магнитные поля, создать высокотемпературную плазму с довольно высокой плотностью, устойчивую, в первом приближении, и способную генерировать интенсивные термоядерные реакции. При этом, вероятно, величина $\beta = 8\pi P/H^2$ будет не велика. Это удастся выполнить, если разрабатываемые в настоящее время методы устранения наиболее опасной магнитогидродинамической формы неустойчивости дадут успешные результаты. Такой ход событий не будет, однако, означать достижения окончательной практической цели, а лишь преодоление первого большого барьера на пути к ней. За этим барьером нас могут поджидать другие неприятности, роль которых станет возрастать по мере того, как мы будем шагать в сторону более высоких температур. Заметим, что если в плазме существует флюктуация электрического поля, с частотой порядка 1 мегагерц при напряженности всего лишь порядка 10 вольт/см, то и этого может оказаться достаточно, чтобы свести время жизни быстрых частиц до нескольких миллисекунд.

Сейчас всем ясно, что первоначальные предположения о том, что двери в желанную область сверхвысоких температур откроются без скрипа при первом же мощном импульсе творческой энергии физиков, оказались столь же необоснованными, как и надежда грешника войти в царство небесное, минуя чистилище.

И все же вряд ли могут быть какие-нибудь сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена. Неизвестно только, насколько затянется наше пребывание в чистилище. Из него мы должны будем выйти с идеальной вакуумной технологией, отработанными магнитными конфигурациями с точно заданной геометрией силовых линий, с программированными режимами электрических контуров, несая в руках спокойную, устойчивую высокотемпературную плазму, чистую как мысль физика-теоретика, когда она еще не запятнана соприкосновением с экспериментальными фактами.

От имени советской делегации я хочу выразить искреннюю признательность бургомистру города Зальцбург, г-ну Беку за гостеприимство и Секретариату МАГАТЭ за хорошую организацию конференции.

CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH, SEPTEMBER 1961: REVIEW OF EXPERIMENTAL RESULTS*

L. A. ARTSIMOVICH

ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS

MOSCOW, UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS

Mr. Chairman,

The Conference ending today has demonstrated the wide scope of research connected with the problem of controlled thermonuclear fusion. Over 250 experimental and theoretical papers have been presented as material for the Conference and for more than 30 hours a mighty stream of new scientific information has poured from this platform. The exchange of views and of data on results obtained, both in the official sessions and during the informal discussions and private conversations, has been highly intensive and the debates on scientific questions have borne a fruitful, although at times perhaps, a very forceful, character. And yet, when we assess the work of the Conference, we are forced to admit that, after many years of intensive work, all that emerges is a first, initial step towards the great goal we have set ourselves, and that as yet we are only making an approach to the main barrier blocking our entry into the desired region of ultrahigh temperatures.

Plasma heated to a high temperature very readily rids itself of accumulated heat energy by means of various instability mechanisms. In the experiments done thus far, dense plasma has been successfully contained, at relatively high temperature, for time intervals of an order of magnitude not exceeding hundreds of microseconds. Thus far, the so-called true thermonuclear reactions in plasma are still of such low intensity that they can be completely masked by various accelerating processes. As yet, there has not been sufficiently close correlation between the results of experimental research and theoretical analysis. This is especially true with respect to the extremely important subject of plasma stability. Consequently, there has been very little progress in the development of methods to overcome plasma instabilities. The responsibility for this state of affairs naturally lies primarily with the experimenters, but there are serious arguments in their defense. These are connected with the specific characteristics of the subject under study, which involves major complications in setting up and performing experiments.

The production of a sufficiently pure hydrogen or deuterium plasma is itself a difficult task since, due to interaction with the walls of the vacuum chamber, the bunches of hot plasma very rapidly become contaminated with impurity atoms and ions which are adsorbed on the surface of the walls—resulting

in very high radiation losses. For example, in experiments with toroidal plasma rings, there are intense flashes of radiation from impurities, even after prolonged vacuum conditioning. This is one of the basic factors preventing a rise in plasma temperature in experiments of this kind. Very serious difficulties arise merely in the attempt to study the properties of the plasma in such annular columns, since in this case we are confronted with a characteristic uncertainty principle, by which the purity of the experimental conditions is in irreconcilable opposition to the use of diagnostic methods.

A column of plasma concealed behind metal sheaths and complex windings is, by reason of its inaccessibility and extreme sensitivity to any contact, an extremely inconvenient subject for investigation. In apparatus where the principle of operation is based on the injection of fast particles into a magnetic field, we encounter another difficulty: due to the low efficiency of the sources, the streams of particles are of relatively low intensity and therefore a very long time is required for filling the traps. During this time even comparatively weak instabilities or such phenomena as capture and loss charge-exchange in the residual gas can carry off particles from the body of the plasma, and for this reason a plasma of appreciable concentration cannot be obtained. If, however, we attempt to inject a stream of plasma into a trap, we are confronted with three problems which are as yet unresolved. Firstly, how do we ensure that trapping of the plasma takes place? Secondly, how do we transform a directed beam of particles into bunches with more or less isotropic distribution of velocities? Thirdly, how do we eliminate the neutral gas which emerges from the injector together with the plasma stream?

After these general observations, which afford some justification for the comparatively slow progress in the branch of science with which we are concerned, I shall turn to a brief and, naturally, very superficial survey of the main results achieved in the work of the last years. On the whole, with respect to the status of the problem, there can be no doubt that very great progress has been made, by comparison with the situation which was revealed at the 1958 Geneva Conference. At that time the main body of scientific information was, essentially, something that might be called a display of ideas. Most of these ideas were only thinly draped with rough

* Address (translated from Russian) given by Dr. Artsimovich at the Concluding Session, 9 September 1961.

and insufficiently verified experimental data, exploratory in character. By contrast, we can now point in nearly every part of the general thermonuclear program to a large number of carefully executed experimental studies and to valuable and reliable results which, in the aggregate, constitute a sufficiently reliable foundation for a substantial acceleration in the rate of research in the future.

It is significant in this connection that the stock of fundamental physical conceptions has remained practically unchanged. During the past three years not one essentially new method for obtaining a high-temperature plasma has been proposed. At the same time there has been a noteworthy shift of emphasis in the efforts to develop the various trends within the overall program. In the initial stage of work on the problem of controlled thermonuclear reactions, much attention was paid to experimental investigation of the simplest method of obtaining high temperatures. The basis of this method is the use of linear impulse discharges of very great magnitude and very short duration. This is what is known as the fast linear pinch. The efforts devoted to investigating the fast pinch enabled all concerned even before the Geneva Conference, to get a clear picture of the phenomena taking place in discharges of this type and to discover the basic mechanism underlying the dynamics of a plasma column. As is known, this mechanism consists in the acceleration of the plasma under the action of electrodynamic forces. One of the most interesting features characteristic of processes of this type is the appearance of hard radiation, consisting of neutrons in a deuterium plasma, and of gamma rays. At present, we know that in typical experimental conditions the hard radiation is due to accelerating processes caused by a particular form of instability characteristic for high intensity plasma columns. The main role in the appearance of fast positive ions, and therefore of neutrons as well, is apparently played by instabilities of the "sausage" type, whereas a helical instability, connected with the tendency of a plasma column to form so-called force-free configurations, is responsible for the appearance of fast neutrons. Although plasma temperatures of over one million degrees were obtained in experiments with linear pinches, it soon became clear that serious consideration could hardly be given to this method as a practical means of obtaining intensive thermonuclear reactions on a scale which was of technological interest. For this reason, interest naturally shifted to the study of systems of a somewhat different type, in which a rapid compression of plasma takes place under the action of a rising external field. The processes in question have been named theta pinch processes.

In the theta pinch effect, a maximum concentration of magnetic energy is obtained in small volumes. For this reason, the compression of the plasma by an external field is a considerably more efficient method than linear discharge for producing high temperatures. In view of the comparative simplicity of the experimental apparatus involved and the

alluring prospects of research in this field, investigation of the properties of the theta pinch effect has, during recent years, become one of the most popular subjects in the whole range of controlled fusion research. Sufficient evidence of the interest in this trend is provided by the number of papers presented at the present Conference: i.e. twenty, as compared with two or three at Geneva. If things go on this way, we shall soon come nearer to the realization of the slogan: "Every housewife should have her own theta pinch".

The basic facts established by research on theta pinches can be summarized as follows. In processes of this kind within a dense cylindrical layer of plasma under compression, the trapped magnetic field is generally maintained in a direction opposite to that of the forces pressing against the external surface of the plasma. The work of the forces of magnetic compression is spent, in the initial stage of the process, mainly in accelerating the ions, and relaxation of the trapped internal magnetic field can make a substantial contribution to the heating of the electron component, although this is not entirely clear to me personally. The theta pinch is not a stable plasma process. This is especially clear from photographs of plasma luminescence, obtained by means of high-speed streak cameras. In a plane perpendicular to the lines of force, the lump of plasma undergoing compression resembles an ink blot or a resting octopus with a hole in the middle. We are dealing here with a typical case of a magneto-hydrodynamic instability of the so-called flute type. It is due, in the first place, to the fact that in the processes of rapid compression and of subsequent radial pulsations, the plasma undergoes strong acceleration; and in the second place, to the fact that, the lines of the field have an unfavorable form which is convex. Despite the inadequate agreement between the data cited by various authors, it can nevertheless be assumed that, in the installations with maximum parameters built at Washington, D.C., and Los Alamos, plasma bunches having a concentration of about 10^{16} cm⁻³ and a temperature in the region of 1000 eV can be obtained for periods of the order of a few microseconds. I do not wish to deal here with the question of the nature of the neutron radiation observed in some cases of fast compression of a deuterium plasma because this problem is of interest only as a sport. I would point out that if any of the fortunate persons who have observed this effect have brought with them to Salzburg a small handful of pure neutrons formed, on the average, during one discharge, there would hardly be enough of them to give one neutron apiece as a souvenir to the inhabitants of hospitable Austria.

It must be recognized that in spite of the many valuable studies on the properties of the theta pinch which have been done in the United Kingdom, the Soviet Union, the United States and elsewhere, the nature of these processes continues to be rather obscure in many respects. This applies to the