

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR BRUNO COPPI**

PAGINA BIANCA

PRESENTAZIONE RIGUARDANTE LO STATO ED I PROBLEMI
DELLE RICERCHE SULLA FUSIONE NUCLEARE

alla

COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA CAMERA

da parte di

BRUNO COPPI

Docente al Massachusetts Institute of Technology

Palazzo di Montecitorio

11 Dicembre 1986

INDICE

1. Preambolo: dono della profezia e senno di poi.
2. Reattore a fusione: complessità della fisica del plasma e problemi di conoscenze.
3. Il problema dei costi.
4. I tempi della fusione.
5. Scalata al limite di Lawson: cronistoria istruttiva.
6. Produrre Plutonio con reattori a fusione: obiettivo a breve termine ma non raccomandato.
7. Reattori "Candidi".
8. Utilità della filiera macchine compatte (Alcator, FT, Ignitor).
9. Benefici immediati.
10. Relazioni internazionali.
11. Risorse umane.
12. Necessaria pluralità di enti ed istituzioni interessate.
13. Conclusioni - Ringraziamenti.

Riferimenti.

Appendice A - Minimi requisiti di una indagine conoscitiva.

Appendice B - Programma statunitense.

Appendice C - Fusione a confinamento inerziale.

2. Preambolo: dono della profezia e senno di poi

Nel 1975, ricorrendo il trentesimo anniversario dell'esplosione della bomba atomica su Hiroshima, un gruppo internazionale di rappresentanti delle maggiori discipline scientifiche negli Stati Uniti di cui facevo parte, formulò una dichiarazione (vedi Fig. 1-1) che dice fra l'altro: "Pertanto raccomandiamo, con un senso di urgenza, una drastica riduzione nell'inizio di costruzione di nuove centrali nucleari finchè non siano stati raggiunti sostanziali progressi nella ricerca e nella risoluzione delle presenti controversie riguardanti la sicurezza, lo smaltimento delle scorie, ed i controlli riguardanti il plutonio...".

Tale dichiarazione fu firmata da più di 2.000 colleghi ed ebbe molta risonanza a livello internazionale perchè le motivazioni apportate furono ritenute valide e parecchi di noi (me compreso, avendo una laurea in ingegneria nucleare) avevano familiarità con la fisica e la tecnologia dei reattori a fissione.

Durante la stessa estate scrissi il primo lavoro (vedi Fig. 1-2) in cui dimostravo che, sulla base di risultati sperimentali in gran parte inaspettati, eravamo in grado di progettare e costruire il primo esperimento, in seguito conosciuto come Ignitor, avente come scopo il raggiungimento dell'accensione per reazioni di fusione di una miscela di deuterio-trizio (ignizione).

Come la dichiarazione sopracitata, questo lavoro venne accolto molto bene dalla comunità scientifica internazionale. Infatti, una sua versione successiva venne ripubblicata in un volume antologico, a cura d'uno dei pionieri dell'energia nucleare, R. Peierls, che raccoglieva una serie di scritti usciti nel 1976 e giudicati fra i più significativi nei vari campi della fisica (vedi Fig. 1-3).

Non credo che sia il caso di recriminare sulla mancanza di un'eco in Italia undici anni fa. E' piuttosto opportuno accennare al tipo di considerazioni che vengono fatte ora negli Stati Uniti su questi temi. In particolare mi riferisco alle affermazioni conclusive del Dr. J.F. Ahearne in un lungo articolo che egli ha presentato recentemente in una conferenza

al MIT e che contiene le sue riflessioni. J.F. Ahearne era il Chairman della Nuclear Regulatory Commission designato dal Presidente Carter quando accadde l'incidente di Three Mile Island e fu perciò al centro dell'uragano che si scatenò. John è anche un amico personale fin dai tempi in cui eravamo insieme all'Università di Princeton, in quel tempo il maggior centro mondiale di ricerche sulla fusione. Le sue affermazioni (vedi Fig. 1-4) sono: "...alcuni anni riassunti così le mie conclusioni. Perché l'industria nucleare negli Stati Uniti si riprenda sono necessari: a) domanda di energia, cioè un'economia crescente che, nonostante il risparmio e le nuove tecnologie, richieda più energia elettrica; b) una soluzione al problema della gestione delle scorie, cioè una effettiva localizzazione e deposito in costruzione; c) nessun incidente grave; e d) gestione manageriale competente. C'è ora una crescente domanda per l'energia elettrica. Non vi è soluzione al problema della gestione delle scorie in termini di localizzazione di un deposito. Vi è stato un altro incidente grave e io non vedo alcuna drastica iniziativa che cerchi di migliorare la competenza manageriale relativa".

Il caso ha voluto che un altro amico E. Velikhov, attualmente vicepresidente dell'Accademia delle Scienze in URSS, venisse incaricato da Gorbachov di dirigere tutte le operazioni di intervento subito dopo l'incidente di Chernobyl. Velikhov rimase personalmente molto scosso da questa esperienza. Infatti, egli mi aveva espresso in precedenza il parere che nell'ambiente scientifico occidentale fossero diventate eccessive, quasi paranoiche le preoccupazioni riguardanti il problema dei reattori a fissione. A fine maggio '86 essendo io di passaggio a Mosca e ospite di un comune amico, ascoltammo il racconto della sua esperienza che si concluse raccomandando di adoperarci per accelerare i tempi della fusione.

Uno dei motivi per concordare su questo è che molti di noi nella comunità scientifica ritengono che sia azzardato il pensare che l'uso dei combustibili fossili possa rappresentare una soluzione a lungo termine al problema dell'energia. Infatti già da ora il riscaldamento generale del clima, provocato dall'eccesso di CO₂ nell'atmosfera (effetto serra), comincia a destare serie preoccupazioni. Un altro aspetto da tenere presente è che le ricerche sulla fusione hanno subito anni di ritardo per motivi che non hanno relazione con difficoltà tecniche o scientifiche incontrate. Perciò esse sono certamente accelerabili.

Scientist's Declaration on Nuclear Power

From the Declaration presented to Congress and the President of the United States on the 30th anniversary of the atomic bombing of Hiroshima and signed by more than 2,000 biologists, chemists, engineers and other scientists.

"... the country must recognize that it now appears imprudent to move forward with a rapidly expanding nuclear power plant construction program. The risks of doing so are altogether too great. We, therefore, urge a drastic reduction in new nuclear power plant construction starts before major progress is achieved in the required research and in resolving present controversies about safety, waste disposal, and plutonium safeguards. For similar reasons, we urge the nation to suspend its program of exporting nuclear plants to other countries pending resolution of the national security questions associated with the use by these countries of the by-product plutonium from United States nuclear reactors."

August 6, 1975

Fig. 1-1

BRUCE M. ALBERTS — Professor of Biochemical Sciences, Princeton University.

HANNES ALJVEN — Professor of Physics, University of California at San Diego, Nobel Laureate.

CHRISTIAN B. ANFINSEN — Chief, Laboratory for Chemical Biology, United States National Institutes of Health, Nobel Laureate.

DAVID BALTIMORE — American Cancer Society Professor of Microbiology, Massachusetts Institute of Technology.

CARLOS G. BELL, JR. — Cabot Professor of Civil Engineering, University of North Carolina at Charlotte.

HARRIET BERNHEIMER, Ph.D. — State University of New York, Downstate Medical Center.

NINA BYERS — Professor of Physics, U.C.L.A.

EARL CALLEN — Professor of Physics, American University.

RICHARD L. CASPERSON — Associate Scientist, Thermal Reactor Safety Division, Idaho National Engineering Laboratory (formerly known as Atomic Energy Commission National Reactor Testing Site).

SAUL COHEN — Professor and Head of Department of Chemistry, Brandeis University.

JAMES BRYANT CONANT — President Emerita, of Harvard University; Chairman, National Defense Research Committee during World War II; Member of Manhattan Project Steering Committee; United States High Commissioner in Germany; General Advisory Committee of the AEC; "Atomic Pioneer's Award" from President Nixon, among other honors.

BRUNO COPPI — Professor of Physics, Massachusetts Institute of Technology.

ARI E. COPI — Visiting Professor of Biological Chemistry, Harvard Medical School, Nobel Laureate.

MURRAY EDEN — Professor of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

JOHN T. EDSALL — Professor of Biochemistry Emerita, Harvard University; Member, National Academy of Sciences; President, VI International Congress of Biochemistry.

ANNE EHRLICH — Senior Resident Associate of Biology, Stanford University.

PAUL EHRLICH — Professor of Biology, Stanford University.

HERMAN N. EISEN — Professor of Immunology, Center for Cancer Research, Massachusetts Institute of Technology.

JAMES A. FAY — Professor of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; Chairman, Massachusetts Port Authority.

MARION FAY — President Emerita, The Medical College of Pennsylvania.

C.D. HAAGENSEN, M.D. — Professor Emeritus of Clinical Surgery, College of Physicians and Surgeons, Columbia University.

A. CARL HELMHOLTZ — Professor of Physics, University of California at Berkeley.

EDWIN C. KEMBLE — Professor of Physics Emerita, Harvard University.

HENRY W. KENDALL — Professor of Physics, Massachusetts Institute of Technology.

KATE KIRBY DOCKEN, Ph.D. — Physicist, Harvard Smithsonian Observatory.

PAUL KIRKPATRICK — Professor of Physics Emerita, Stanford University.

GEORGE B. KISTIAKOWSKY — Professor of Chemistry Emerita, Harvard University; Head of the Explosives Division of the Manhattan Project; Former Vice-President of the National Academy of Sciences; Science Advisor to President Eisenhower.

VERA KISTIAKOWSKY — Professor of Physics, M.I.T.

WILLIAM N. LIPSCOMB — Abbott and James Lawrence Professor of Chemistry, Harvard University.

SALVATORE LURIA — Professor of Biology, Massachusetts Institute of Technology; Nobel Laureate.

BORIS MAGASANIK — Professor and Chairman of the Biology Department, Massachusetts Institute of Technology.

EDWIN E. MOISE — Distinguished Professor of Mathematics, Queens College, City University of New York.

PHILIP MORSE — Professor of Physics Emerita, Massachusetts Institute of Technology; Past President of the American Physical Society.

STANLEY J. PICKART — Professor and Chairman of the Physics Department, University of Rhode Island.

ROBERT O. POHL — Professor of Physics, Cornell University.

JULIAN SCHWINGER — Professor of Physics, University of California at Los Angeles; Nobel Laureate.

IRVING J. SELIKOFF — Director, Environmental Health Laboratory, Mount Sinai School of Medicine of the City University of New York.

... ..

JEROME STEFFENS — Chairman, Technology and Society Division, American Society of Mechanical Engineers.

WALTER H. STOCKMAYER — Professor of Chemistry, Dartmouth College.

ALBERT SZENT-GYORGYI — Research Biologist, Woods Hole Marine Biological Laboratory; Nobel Laureate.

HAROLD C. UREY — Professor of Chemistry Emerita, University of California at San Diego; Manhattan Project; Nobel Laureate.

GEORGE WALD — Professor of Biology, Harvard University; Nobel Laureate.

JAMES D. WATSON — Professor of Biology, Harvard University; Director of Cold Spring Harbor Laboratory; Nobel Laureate.

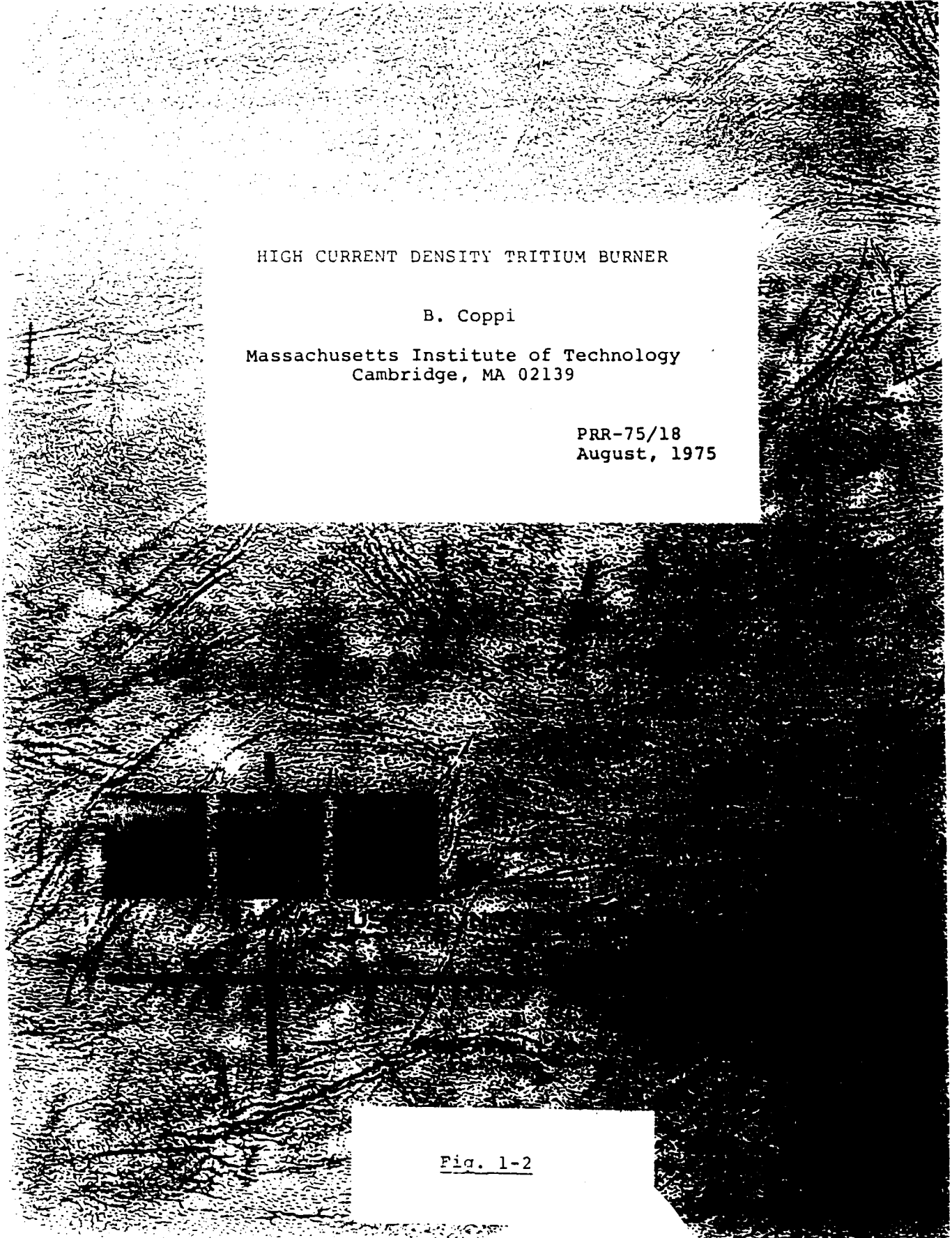
RALPH WEYMOUTH — Vice Admiral (Ret.), United States Navy, Former Director of Research, Development, Test and Evaluation, Office of the Chief of Naval Operations.

ARTHUR S. WIGHTMAN — Professor of Mathematical Physics, Princeton University.

HULEN B. WILLIAMS — Professor of Chemistry and Dean of the College of Chemistry and Physics, Louisiana State University.

NORMAN D. ZINDER — Professor of Molecular Genetics, Rochester University.

Fig. 1-1



HIGH CURRENT DENSITY TRITIUM BURNER

B. Coppi

Massachusetts Institute of Technology
Cambridge, MA 02139

PRR-75/18
August, 1975

Fig. 1-2

devices. One (Ignitor-Oh) in which the ohmic heating system plays a major role and peak densities of about 10^{21} cm⁻³ can be adopted during the preheating phase, as has been previously considered in this report. Another (Ignitor-Au) in which an auxiliary heating system plays a major role, such as for the case discussed in Ref. 3, the relevant magnet systems are chosen in order to accommodate the needed access ports and/or plasma volume, and densities lower than for the former type of devices have to be adopted during the preheating phase.

Finally, when comparing the high plasma density approach as represented by the Ignitor line of devices with that of large volume, relatively low density experiments, we may make the following remarks:

1) Since in the former case the ion temperature is kept very close to the electron temperature, ignitors can equally profit from heating systems that couple directly to the electrons or to the ions. Either system can, in fact, be used to control the current density distribution and, if possible, to improve the conditions for macroscopic stability of the plasma column.

2) The ratio of the torus major radius to the collision mean free path, indicating the degree of collisionality of the plasmas that can be obtained, is closer to that of presently operating experiments, for equal values of n_i and T_i . Under the same conditions, the numerical values of the energy replacement time are lower and make high density plasmas more immune to the excitation of slowly growing modes for which there has not yet been adequate investigation.

3) While the typical values of the streaming parameter ζ are not higher than those for the large volume, relatively low-density experiments, the linear particle density λ_0 is considerably higher. Thus the neutral mean free path for ionization, charge exchange, etc., is considerably shorter than the radius of the plasma column. As indicated by the high density Alcator experiments, the impurity influx should be relatively low.

Acknowledgements

It is a pleasure to thank T. Casoli and H. Stangard for pointing out the appealing characteristics of the low-frequency heating systems mentioned above, and L. DeLorenzis and A. Taroni for their remaining collaboration and their suggestions. The work reported herein was performed in part under the sponsorship of CNEN of Italy, in part privately, and in part with the support of the Italian Government through the Alcator program of the Massachusetts Institute of Technology at Braintree, Massachusetts, in the 1976 International School of Fusion Reactor Technology at Braintree in September 1976.

B. COPPI
 Department of Physics,
 Massachusetts Institute of Technology,
 Cambridge, Mass.

Compact Experiments for α -Particle Heating

Introduction

Recent experiments, and scalings deduced from them, have indicated that relatively high density plasmas can be produced and well confined in toroidal configurations capable of sustaining high current densities without inducing macroscopic instabilities.^{1,2} Here we propose to develop a line of compact devices in which sufficiently high plasma currents can be induced to confine the 3.5 MeV α -particles that are produced in D-T reactions. This line is suggested as a parallel program to the development of large volume tokamaks which is being undertaken on a worldwide basis.

The experimental apparatus we envisage have the following features:

a) A relatively high ohmic heating rate so that, given the high particle densities at which they can operate, they can produce a substantial amount of D-T fusion power.

b) The central core of the machine is reduced to a basic minimum of elements with little concession to diagnostic access ports. Thus the complexity and expenditure in remote handling systems are greatly reduced in comparison to those foreseen for other types of tritium-burning experiments.³

c) The core can be produced in duplicate, one of which can be tested with D-D plasmas in existing laboratories which do not have tritium handling facilities. Another possibility, that obviously cannot be considered or the largest size device which are presently under development, is to test the core in a laboratory and then transport it to a site having the necessary power sources and tritium handling facilities.

d) Their main scientific goal is to investigate the effects of α -particle heating and all the problems (diffusion, instabilities, etc.) connected with it. In particular, they can lead to a relatively fast paced and low cost program to demonstrate ignition experimentally.

International Plasma Phys. Conf. Fusion
 1977, Vol. 3, No. 2, pp. 91-93

Fig. 1-3

A PERSPECTIVE OF PHYSICS

Volume 2

Selections from 1977 *Comments on Modern Physics*.
 Introduced and put into perspective by

Sir RUDOLF PEIERLS

GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS
 London New York Paris

Nuclear Power After ChernobylJohn F. Ahearne¹

Resources for the Future

1 October 1986

(Revised 25 November 1986)

A few years ago I gave a summary: "To recover in the United States, the nuclear industry needs the following: (a) energy demand, i.e., a growing economy that in spite of conservation and new technologies still needs more electrical energy; (b) a solution to the waste-management problem, i.e., an actual location and repository under construction; (c) no major accidents; and (d) competent management."

There is a growing demand for electrical energy. There is no solution to the waste management problem in terms of location of a repository. There has just been another major accident. And I do not see any sweeping moves to improve the competence of management.

Stralcio dall' articolo di J. Ahearne,
Chairman della Nuclear Regulatory
Commission al tempo dell' incidente
di Three Mile Island.

Fig. 1-4

2. Reattori a fusione: complessità della fisica del plasma e problemi di conoscenze

I fallimenti incontrati subito dopo la realizzazione della bomba H nel tentativo di produrre in breve tempo un reattore a fusione, furono dovuti al fatto che per progredire in questo campo è necessario acquisire una conoscenza approfondita della materia in uno stato estremamente rarefatto che viene chiamato plasma. Gran parte dell'Universo è occupato da plasmi, suggestivamente noti come quarto stato della materia e soltanto di recente si è stabilita una buona base teorica per comprenderne e descriverne il comportamento

Per documentare quanto insolito questo sia, mostro la figura (Fig. 2-1) della distribuzione di velocità dei protoni che compongono il plasma interplanetario (chiamato "vento solare"). Agli esperti tale figura, ottenuta da misure eseguite con una sonda spaziale europea, dice che per il plasma interplanetario non valgono i concetti ordinari della termodinamica. Infatti se il vento solare seguisse le leggi normali della termodinamica, invece delle curve di livello mostrate si otterrebbero dei cerchi concentrici. Questa è infatti una delle osservazioni sperimentali più drammatiche che ci siano state date dai programmi di ricerche spaziali nell'ultimo decennio /1/.

Lo stesso si può dire per il comportamento di un plasma composto da una miscela di nuclei isotopi dell'idrogeno o dell'elio, immersa in un gas di elettroni che ne neutralizzano la carica elettrica, la quale è portata a "bruciare" ad alte "temperature" per reazioni di fusione. Pertanto la ricerca nel campo della fusione termonucleare controllata è strettamente legata, attraverso la fisica dei plasmi allo studio dello spazio interplanetario, all'astrofisica e, anche per la sua genesi connessa con la bomba H, a ricerche di interesse militare.

Per concludere, raccomando che questa Commissione, nel valutare le opinioni ascoltate durante l'indagine conoscitiva, accerti in quali campi o discipline le personalità consultate siano effettivamente esperte ed il grado in cui questi campi sono connessi ai metodi ed ai problemi della fisica del plasma.

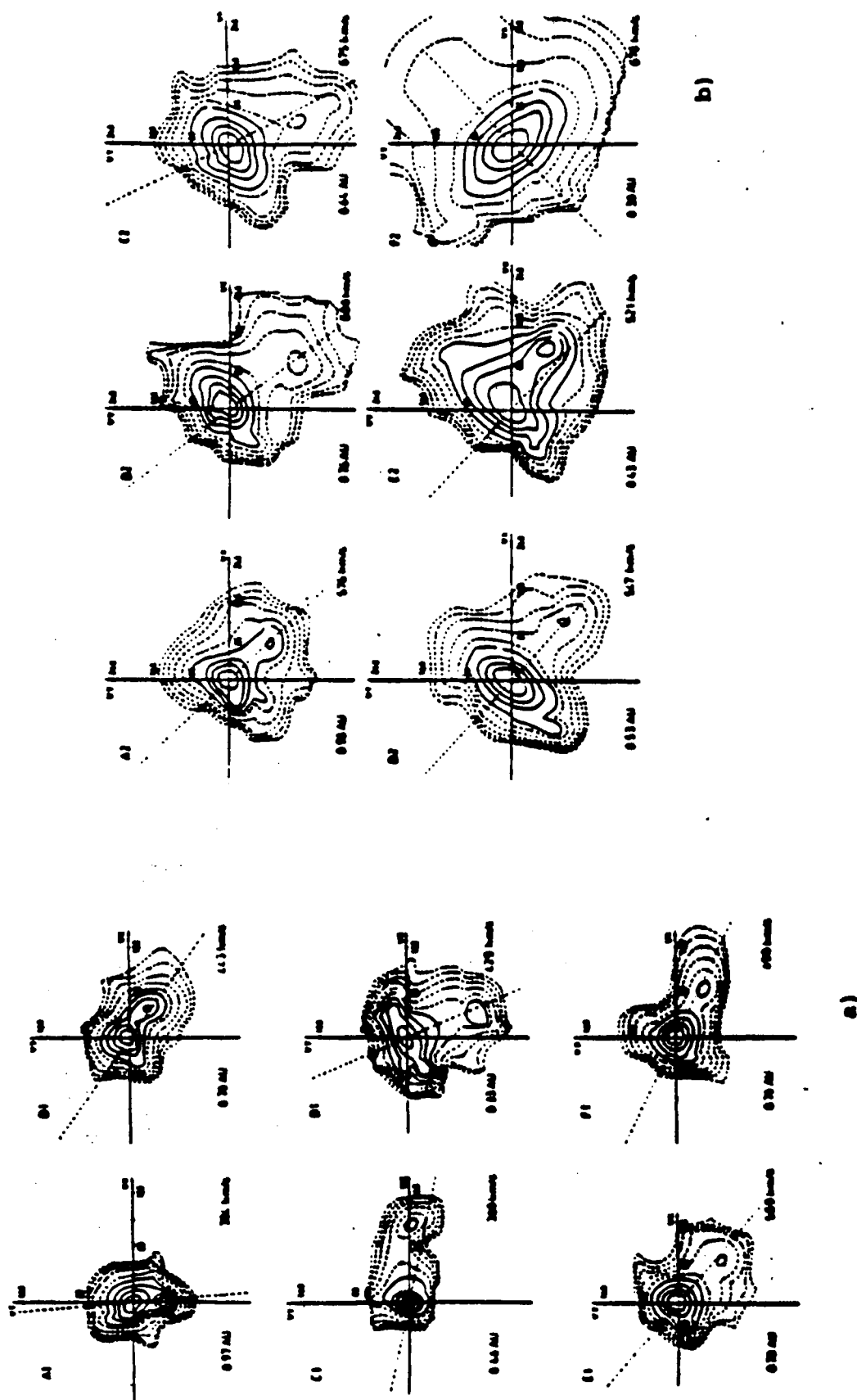


Fig. 2-1

3. Il problema dei costi.

Sulla base della mia esperienza desidero affermare che i costi per compiere passi significativi nella ricerca sulla fusione non sono necessariamente elevati nei limiti in cui è possibile individuare con sufficiente chiarezza i problemi da risolvere. Il progresso vero spesso è fatto di brevi passi e ad opera di persone o piccoli gruppi la cui notorietà non raggiunge il grande pubblico.

L'elevatezza dei costi che frequentemente viene indicata come uno degli ostacoli per giungere a provare la fattibilità scientifica di un reattore a fusione è più un prodotto storico che una necessità, legato al fatto che le ricerche in questo campo sono state per lo più confinate ad ambienti e grandi laboratori legati per tradizione e metodo di lavoro allo stile dei grandi programmi militari.

In particolare ritengo che un esempio da non imitare sia quello degli enti e industrie spaziali occidentali che non si sono sufficientemente preoccupati di diminuire, col passare del tempo, il costo per unità di peso del lancio di un satellite in orbita.

4. I tempi della fusione

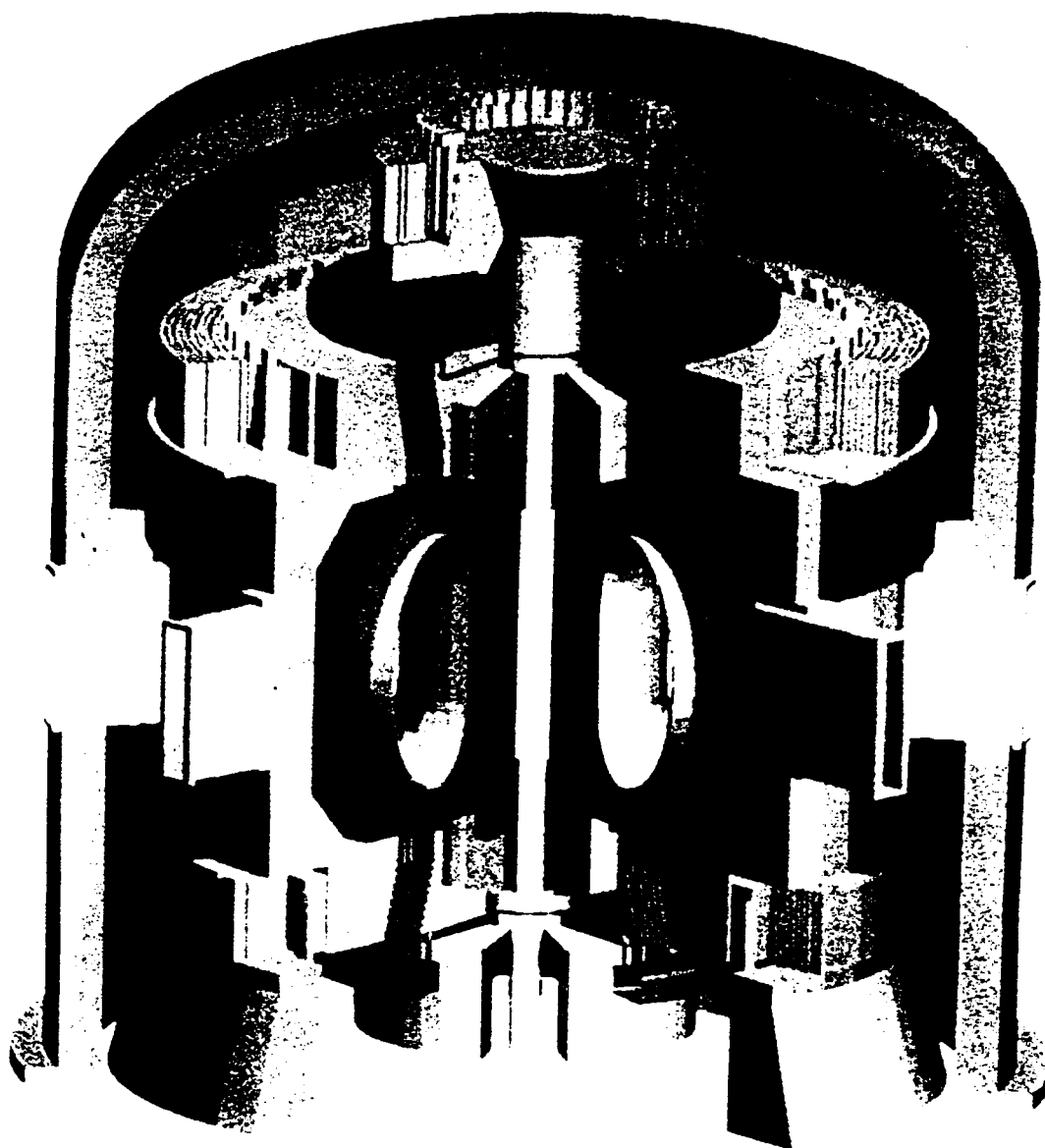
Considerando i progressi fatti in questo campo di ricerca (e in discipline ad essa molto vicine) e le circostanze in cui questi si sono verificati, ritengo che i tempi della fusione non siano così lontani come viene da più parti affermato.

Infatti, quando si riesce a mobilitare una comunità di ricercatori generosi e dedicati, si può contare sul fatto che eventi imprevisti ed imprevedibili possano far trovare soluzioni a problemi apparentemente molto ardui. L'esempio più vistoso in proposito è l' "incontro" della navicella spaziale Voyager II con il pianeta Urano, cui ho avuto il dono di partecipare nel gennaio 1986. Questo incontro non era stato previsto nei piani originali formulati al tempo del lancio e divenne poi possibile attraverso una saggia modifica della missione originaria e dei sistemi di acquisizione dati, trasmissione, ecc., avvenuti dopo il lancio. Secondo le nostre previsioni questo incontro si sarebbe potuto avere soltanto nel secolo venturo, mentre la realtà è che avendo raggiunto Urano nel 1986, nel 1989 potremo raggiungere anche Nettuno.

Un esempio in senso negativo è invece offerto dall'esperimento Ignitor (vedi Fig. 4-1). Se la costruzione di questo fosse stata iniziata quando fu proposta per la prima volta undici anni fa con molta probabilità saremmo già riusciti a produrre 100 megawatt da fusione con plasmi di deuterio trizio. Le prestazioni che ci si attendono da questo esperimento, sulla base di criteri largamente accettati, sono ben superiori a quelle dei più avanzati esperimenti attualmente esistenti (vedi Fig. 4-2).

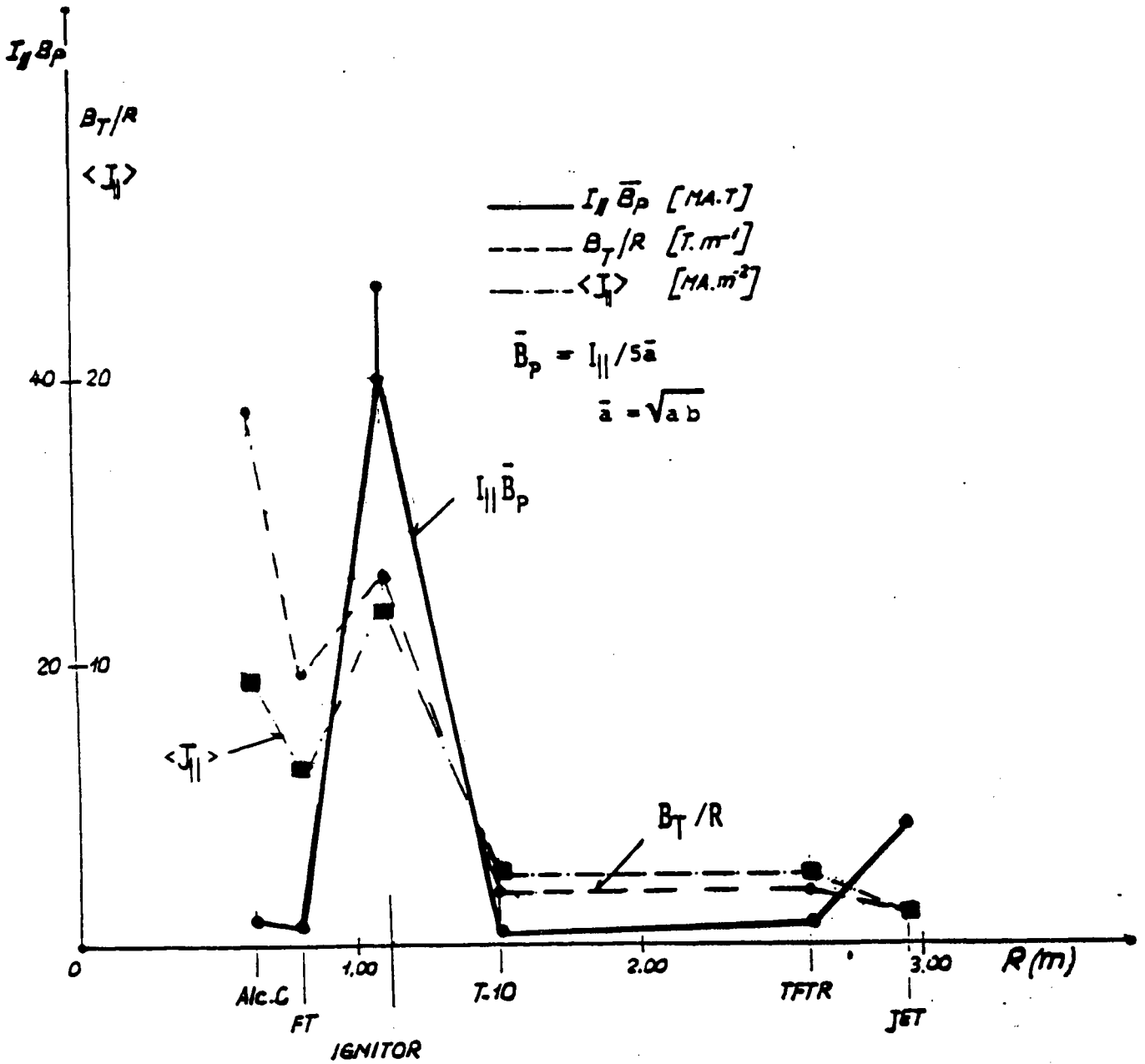
Comunque, attualmente, tenendo conto del lavoro di progetto già svolto, possiamo stimare che, dal momento in cui venga dato il segnale di partenza, si possa costruire Ignitor a Ispra (vedi Fig. 4-3, 4-4.) ed avere dati significativi sui processi che condizionano la combustione per fusione (vedi Fig. 4-5, 4-6) nell'arco di cinque anni, purchè non vengano frapposti altri ostacoli e ritardi. A questo proposito ricordo che il Parlamento Europeo, già da diversi anni fa, per opera del sen. L. Noè e poi (1982) del sen. M. Sassano (vedi Fig. 4-7a, 4-7b) aveva raccomandato, in relazione al programma europeo di ricerca sulla fusione, che "si attribuisse maggiore importanza ad esperimenti capaci di produrre l'accensione per fusione con macchine di tipo compatto ed aventi alti campi magnetici". La posizione favorevole dell'attuale Governo nei riguardi del programma Ignitor, è stata espressa da tempo,

come indicato dalla dichiarazione rilasciata dal Min. F. Forte in occasione della visita del Primo Ministro Craxi negli Stati Uniti il 7 marzo 1985 (vedi Fig. 4-8). Per dare un'idea del tipo di costi previsti per esperimenti di questo tipo, riporto i risultati dell'analisi dettagliata eseguita per la macchina Alcator-C MOD (vedi Fig. 4-9a) in via di costruzione al MIT. Tale macchina è simile ad Ignitor, ma di dimensioni più ridotte. Il costo totale, che include tutti gli stipendi, opere edilizie, ecc., è di 17,4 milioni di dollari (vedi Fig. 4-9b, 4-9c).



Ignitor: la macchina proposta per studiare l'accensione di una miscela deuterio-trizio, presso il Centro di Ispra.

Fig. 4-1



Rating of Ignitor versus existing advanced confinement experiments.

$\langle J_{||} \rangle$ = mean plasma current density

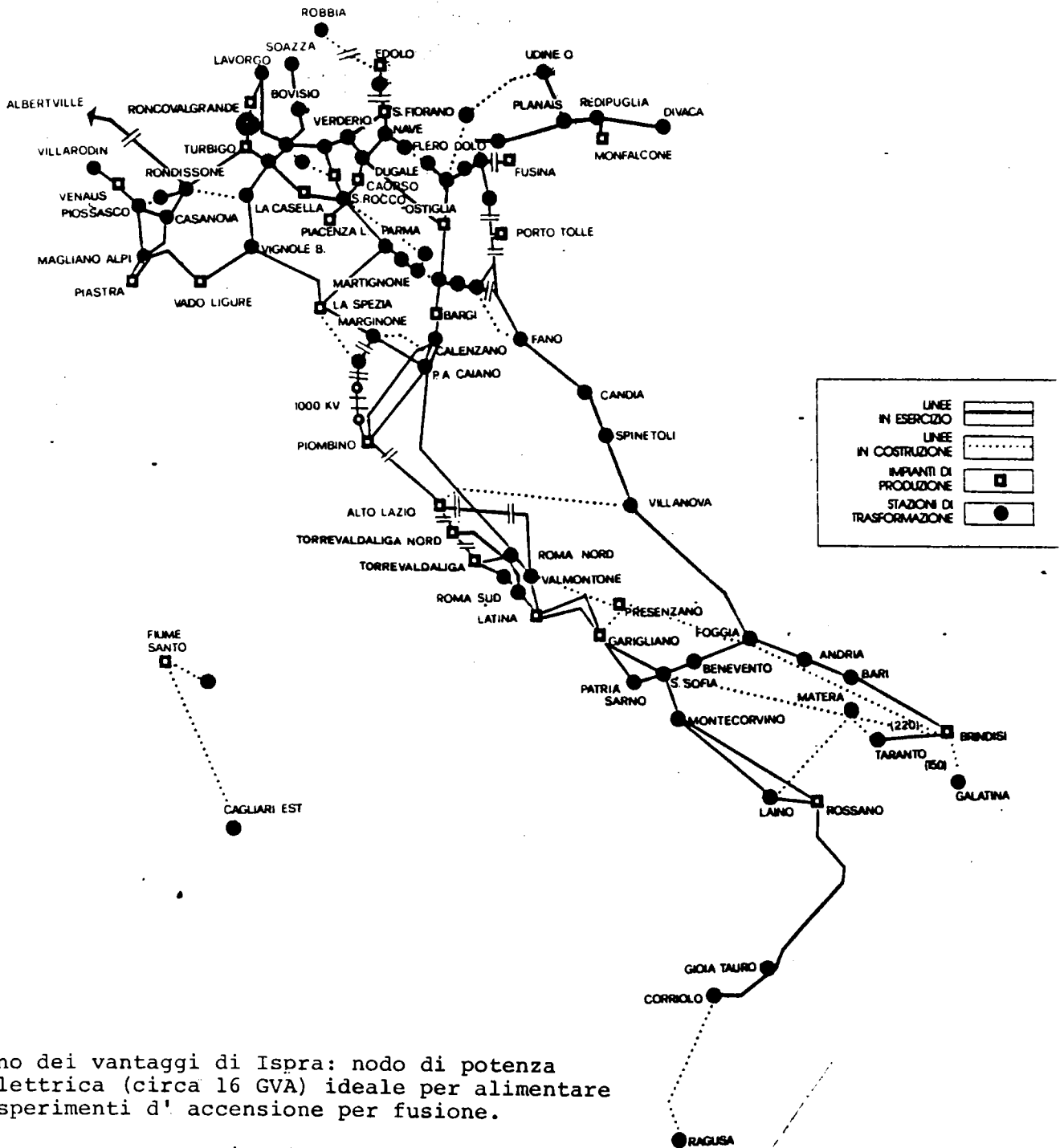
$I_{||}$ = total plasma current; \bar{B}_p = mean poloidal field

B_T/R is related to the peak current density by a safety factor

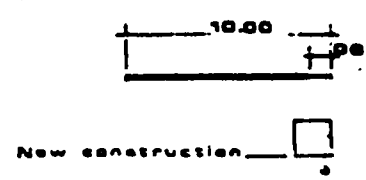
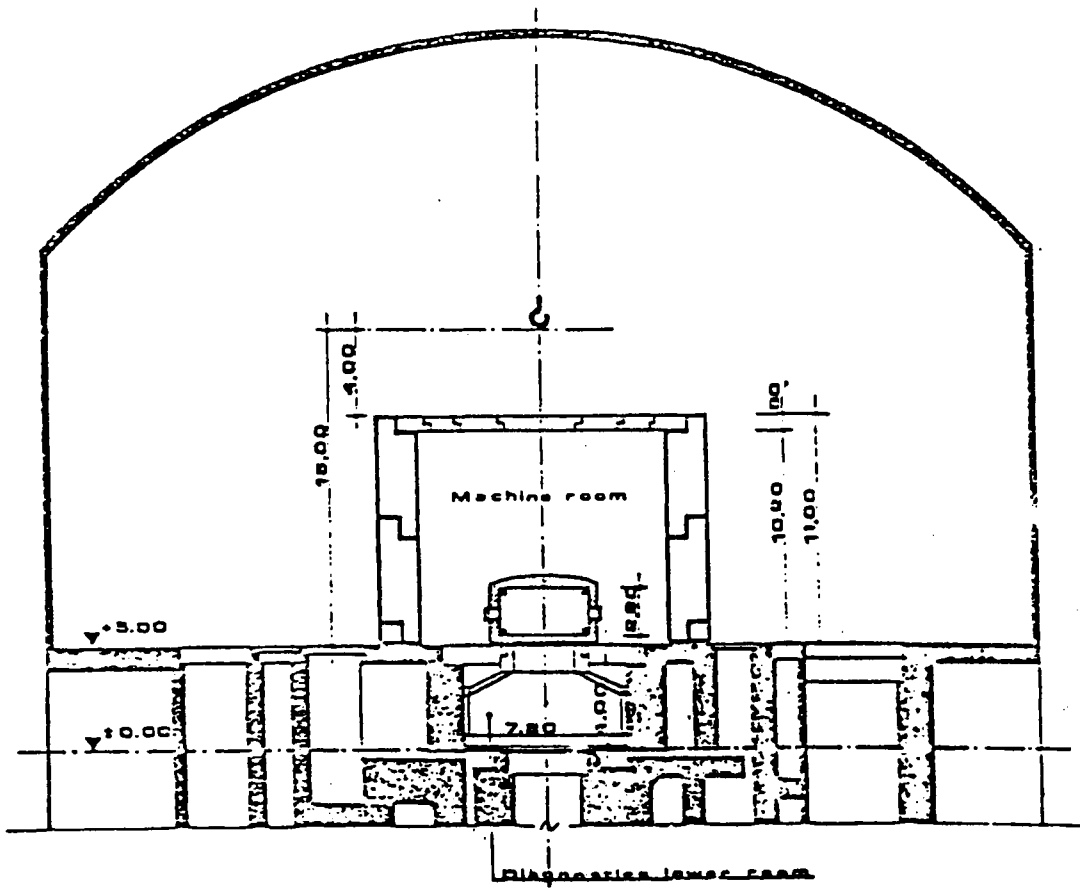
Come si piazza Ignitor (tuttora primo!) rispetto ad altre macchine avanzate secondo un parametro di merito accettato dalla comunità scientifica competente degli Stati Uniti.

Fig. 4-2

RETE A 380 KV AL 31 DICEMBRE 1985



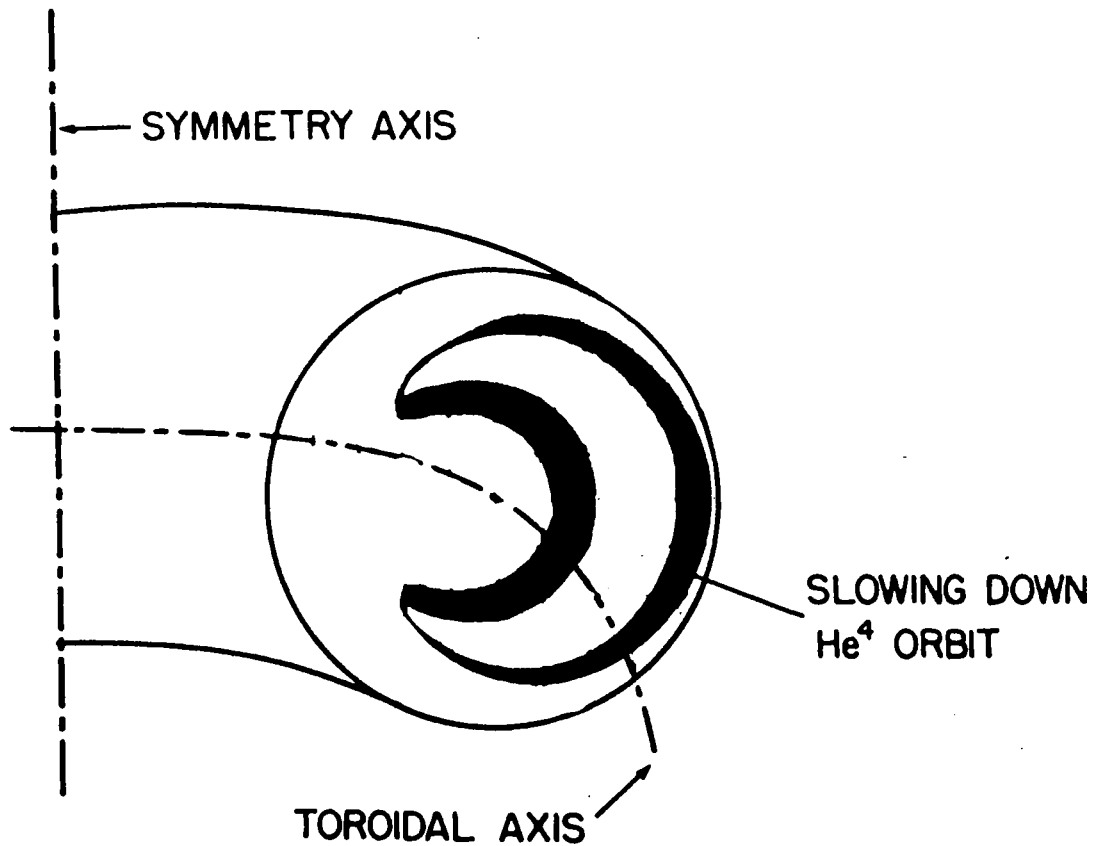
Uno dei vantaggi di Ispra: nodo di potenza elettrica (circa 16 GVA) ideale per alimentare esperimenti d' accensione per fusione.



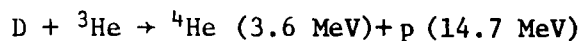
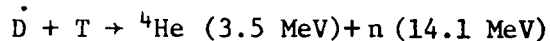
CROSS SECTION A-A

Uno dei vantaggi di Ispra: disponibilità del complesso ESSOR con l'edificio di contenimento pronto per ospitare, con un minimo spesa di riadattamento, la macchina Ignitor.

Fig. 4-4

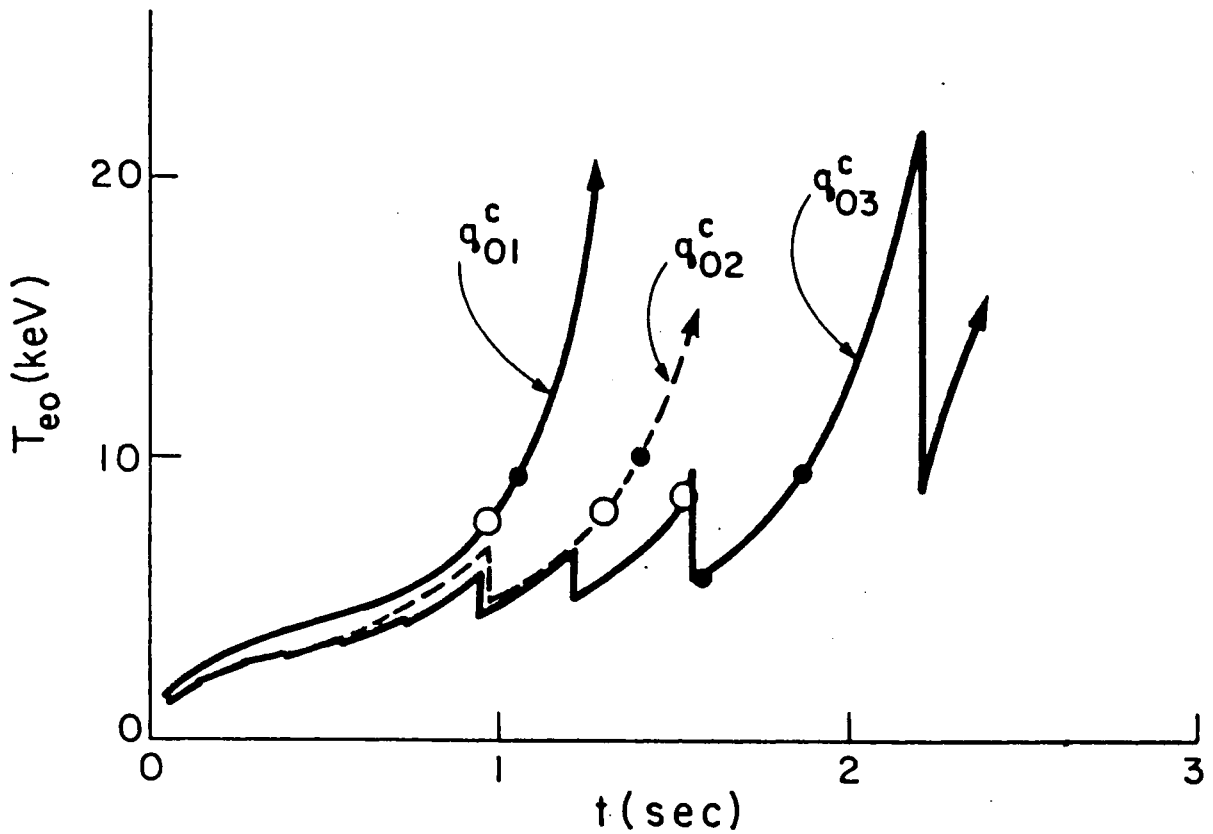


Il contenimento delle particelle cariche (nuclei ${}^4\text{He}$) prodotte dalle reazioni di fusione permette ad esse di essere rallentate trasferendo energia al plasma in cui sono generate. Questo processo (di riscaldamento) mantiene la temperatura della miscela reagente al valore richiesto dalle condizioni di accensione. Nella figura è indicata la proiezione (cosiddetta "banana") dell'orbita di un nucleo ${}^4\text{He}$ (chiamato comunemente particella- α) contenuta in una configurazione toroidale (ad anello) di campi magnetici. I nuclei ${}^4\text{He}$ sono emessi con un'energia (di circa 3.5 MeV) molto superiore all'energia media delle particelle che costituiscono la miscela reagente. Le reazioni relative sono



(D = deuterio, T = trizio, n = neutrone, p = protone, ${}^4\text{He}$ = nucleo di elio).

Fig. 4-5



Questa figura è mostrata per indicare che non è possibile allo stato delle attuali conoscenze teoriche predire, il modo in cui si possa raggiungere l'accensione in un esperimento a confinamento magnetico. Infatti Le 3 curve qui riportate corrispondono a tre diversi andamenti della temperatura in funzione del tempo corrispondenti a tre diverse ipotesi teoriche sull' sorgere di un'instabilità nella zona centrale del plasma reagente. E' indispensabile perciò ottenere dagli esperimenti una risoluzione fra le varie alternative possibili.

Fig. 4-6

Friday, 12 March 1982

TEXT PROPOSED BY THE COMMISSION OF
THE EUROPEAN COMMUNITIESTEXT AMENDED
BY THE EUROPEAN PARLIAMENTCouncil Decision adopting a research and training programme (1982 to 1986) in the field of
controlled thermonuclear fusion

Preamble and first recital unchanged

Whereas, in view of the considerable efforts needed to reach the application stage of controlled thermonuclear fusion, which could be of benefit to the Community, particularly in the wider context of the security of its long-term energy supplies, the various stages of development of the work hitherto undertaken in this field should continue on a joint basis;

Whereas, in view of the considerable efforts needed to reach the application stage of controlled thermonuclear fusion, which could be of benefit to the Community, particularly in the wider context of the security of its long-term energy supplies, the various stages of development of the work hitherto undertaken in this field should continue on a joint basis, **attaching great importance to the strategy of concentrating effort on the Tokamak line and sizeable effort on two alternative lines in magnetic confinement, the reverse field pinch and stellarators, given a periodic reassessment of the reactor relevance of these lines compared with that of the Tokamak;**

Whereas the scientific progress achieved in this field in recent years in the Community and the rest of the world illustrates the need, particularly for Tokamak systems, to construct larger and more complex devices and to concentrate in particular on the development of plasma heating techniques;

Whereas the scientific progress achieved in this field in recent years in the Community and the rest of the world illustrates the need, particularly for Tokamak systems, to construct larger and more complex devices and to concentrate in particular on the development of plasma heating techniques, **attaching greater importance to experiments relating to ignition with compact devices having a high magnetic field if the feasibility thereof has been proved;**

Fourth to eighth recitals unchanged

Articles 1 to 4 unchanged

Per onorare la memoria dell' On. M. Sassano che introdusse gli esperimenti di accensione e Ignitor in particolare nel programma europeo. L'azione dell' On M. Sassano (laureato in ingegneria) porto' alla costituzione del Panel Adams, su mandato di E. Davignon (C.E.E.) che esamino' il programma Ignitor e raccomando' (senza seguito!) agli enti responsabili il suo sviluppo con una indicazione precisa di stanziamenti da effettuare nel 1983-84.

Fig. 4-7a, e 4-7b

Friday, 12 March 1982

- (c) continue the studies for the implementation of the second stage of the Tokamak programme (NET) and the technological developments necessary in order to carry out this project;
- (d) continue the studies on alternative confinement systems which may be used in a reactor, preferably in collaboration with fusion programmes carried out in other countries, particularly in the United States;
- (e) keep under continuous review current and future results of European and world activities, with a view to deciding whether to go ahead with the implementation of the second stage of the programme;

4. Recommends, as regards activities other than JET, and as suggested by the Panel, the pursuit of research and activities relating to other Tokamaks inasmuch as they are fully justified in terms of the strategy of the programme and the search for ever wider international collaboration in this field;

5. Considers, furthermore, that it would be advisable, given the scientific difficulties involved in the fusion process, for the Commission to frequently consult a permanent scientific panel made up of senior experts appointed by the Member States;

→ 6. Considers insufficient, however, the attempts made so far to exploit the possibilities of achieving ignition through small devices with a high magnetic field;

7. Attaches importance to the strategy of concentrating effort not only in the Tokamak line but also a sizeable effort on two alternative lines in magnetic confinement, reverse field pinch and stellarators, provided there is a periodic reassessment of the reactor relevance of these lines compared with that of the Tokamak;

8. Invites the Commission to consider proposals for new or novel experiments not included in the Commission's proposal or in the recommendations of the Fusion Review Panel, so that these may be judged technically against the general objectives of the fusion programme and existing work on the programme, and for future fuel needs;

→ 9. Expresses the hope that during the implementation of the programme the Commission will communicate to Parliament proposals for new or novel experiments not included in its proposal which contribute to the attainment of the programme's objectives, especially as regards experiments relating to ignition with compact devices having a high magnetic field;

10. Recommends that the development of the programme should be increasingly geared as far as possible towards industrial participation particularly as regards the solution of technical problems with the aim of speeding up the practical application of future scientific inventions;

11. Calls on the Commission and the Council, given the extremely long periods required for development work, to ensure that financing is assured also for other major national projects (such as fast breeders, high temperature reactors) once the existing programme (1982 to 1986) expires without this involving an unduly heavy burden on the Community budget;

From the News Office
Massachusetts Institute of Technology
Cambridge, Massachusetts 02139
Telephone: (617)253-2701

MARCH 8, 1985

FOR IMMEDIATE RELEASE

Contact: Robert C. Di Iorio

NOTE TO EDITORS: Francesco Forte, Italy's minister for European Economic Community affairs, issued the following statement on March 7, 1985, when he was at M.I.T. as a member of the group traveling with Italian Prime Minister Bettino Craxi.

"Francesco Forte reported to the M.I.T. community that the Italian government approved last week the proposal of a joint program concerning the Ignitor experiment to be located in the EEC Research Center of ISPRA (Varese) and to be undertaken as a common enterprise, shared among EEC, Italy, other interested European countries and the U.S. and Canada.

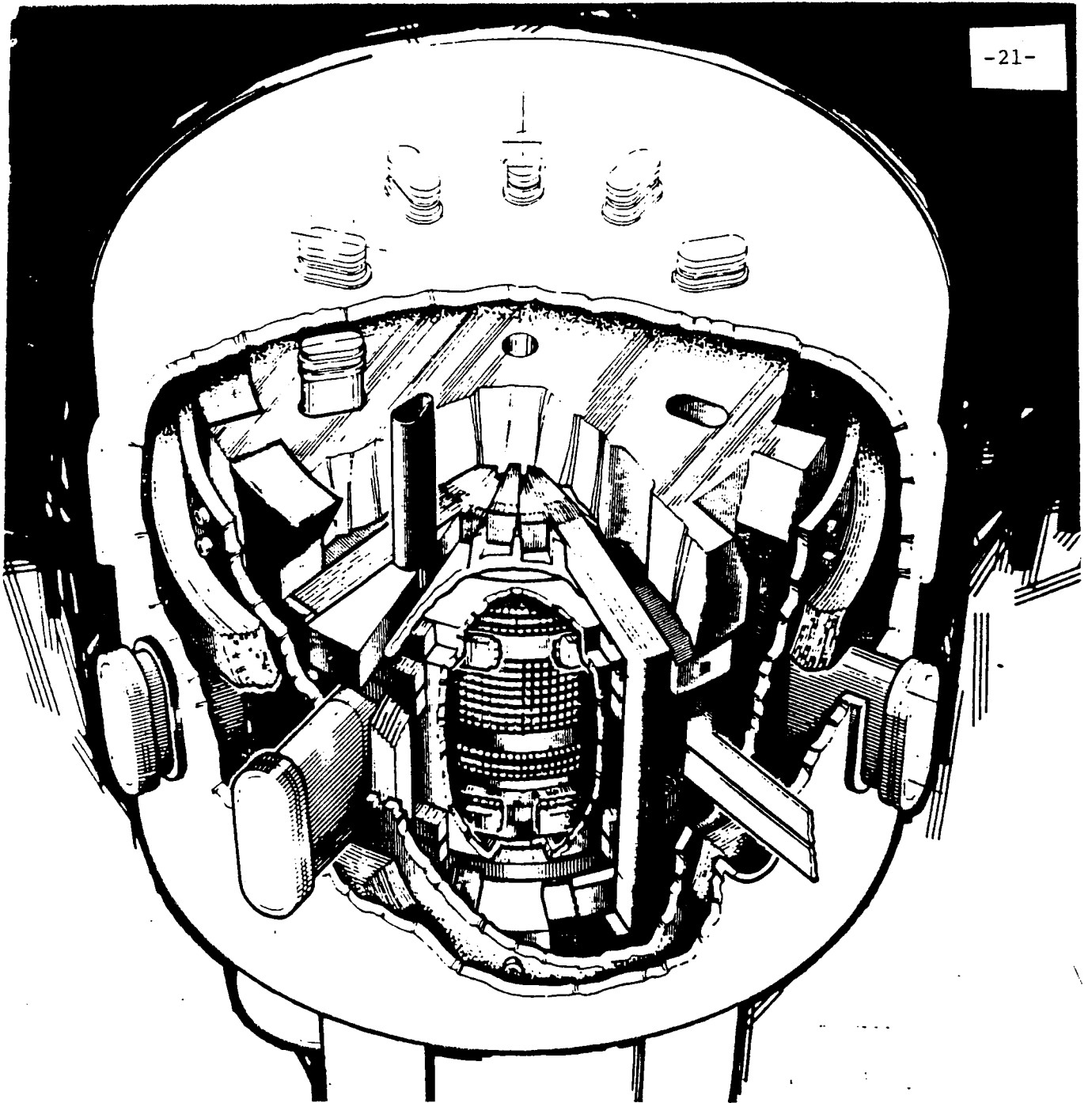
Signor Forte said that he believes that the project is of great interest for Italy as well as for EEC, not only in relation to nuclear fusion research but also to astrophysics research and related technologies. He will submit to the Italian government and the EEC these other possible developments.

The Ignitor experiment is the natural follow-up of the Alcator program at M.I.T. that has achieved the best parameters needed to prove the feasibility of fusion reactors."

Annuncio dato del Min. F. Forte dello stanziamento votato dal C.I.P.E. che sbloccó lo stato di insabbiamento del programma Ignitor seguito ai lavori del Panel Adams.

Fig. 4-8

-21-



Costi della macchina Alcator C-MOD, che ha la stessa configurazione di Ignitor, la cui costruzione sarà terminata nel 1989.

Il costo totale indicato (17,4 milioni di dollari) include, stipendi e modificazioni edilizie. Tale cifra può essere presa come riferimento tenendo conto del fatto che il raggio maggiore di Alcator C MOD è di 64 cm., mentre quello di Ignitor (vedi Fig. B-4a, Appendice B) è di 110,5 cm. e che mentre Alcator C-MOD è progettato per funzionare con plasmi di deuterio, Ignitor dovrà funzionare anche con miscele deuterio-trizio.

Fig. 4-9a, 4-9b, 4-9c

TABLE 3.3A
 ALCATOR C-MOD PROCUREMENTS BY FISCAL YEAR (K\$)
 [FLAT PROFILE CASE]

	<u>FY87</u>	<u>FY88</u>	<u>FY89</u>	<u>FY90</u>	<u>TOTAL</u>
WBS 2: TF	995	1,040	1,245	0	3,280
WBS 3: PF	125	180	155	0	460
WBS 4: VACUUM CHAMBER	190	310	75	0	575
WBS 5: DIVERTOR/LIM		160	250		410
WBS 6: PUMPING		50	110		160
WBS 7: SUPPORT BASE	0	60	160	0	220
WBS 8: CRYO SYSTEM		50	110		160
WBS 9: CONTROL	100	140	165	0	405
WBS 10: NUCLEAR MONITOR			40	50	90
WBS 11: POWER SYSTEMS	705	535	555	0	1,795
WBS 12: SITE MODIFICATION	1,125	885	195	0	2,205
WBS 13: RF	<u>220</u>	<u>470</u>	<u>486</u>	<u>264</u>	<u>1,440</u>
TOTAL	3,460	3,880	3,546	314	11,200

Fig. 4-9b

DOE # DE-AC02-78ET-51013
Alcator C-Mod.
TABLE 3.5A
PERSONNEL COST FOR FLAT PROFILE CASE

SUMMARY

	(8 mos.) FY 87 ESTIMATED COSTS	FY 88 ESTIMATED COSTS	FY 89 ESTIMATED COSTS	FY 90 ESTIMATED COSTS	TOTAL ESTIMATED COSTS
SALARIES & WAGES	\$338,005	\$409,022	\$282,159	\$26,116	\$1,055,302
ENGINEERS	214,647	168,777	115,404	11,936	510,764
TECHNICIANS	21,149	20,319	13,990	1,469	56,927
DRAFTSMEN	19,654	23,838	16,253	0	59,745
MACHINISTS	15,217	18,454	14,343	2,114	50,128
ADMINISTRATIVE STAFF	30,437	32,034	22,109	2,102	86,682
ADMIN. SUPPORT (Indirect)					
SUB-TOTAL SALARIES & WAGES	\$639,109	\$672,444	\$464,258	\$43,737	\$1,819,548
EMPLOYEE BENEFITS (39.1%)	249,892	262,926	181,525	17,101	711,444
HARDWARE (Itemization Attached)	3,049,000	3,373,000	3,446,000	314,000	10,182,000
CAPITAL EQUIPMENT	411,000	507,000	100,000	0	1,018,000
OTHER M&S/LAB CHARGE	12,242	13,077	8,875	1,273	35,467
TOTAL DIRECT COSTS	\$4,361,243	\$4,828,447	\$4,200,658	\$376,111	\$13,766,459
OVERHEAD (61% of *M.T.D.C Base)	549,757	578,553	399,342	37,889	1,565,541
CONTINGENCY	0	0	0	2,068,000	2,068,000
TOTAL ESTIMATED COSTS	\$4,911,000	\$5,407,000	\$4,600,000	\$2,482,000	\$17,400,000

Fig. 4-9c

5. Scalata al limite di Lawson: cronistoria istruttiva

La scoperta della legge di fisica che mi permise di arrivare a proporre il primo esperimento dimostrativo di accensione per fusione (vedi Fig. 1-2) avvenne circa dodici anni fa con la macchina Alcator (Alto Campo Torus) che avevo proposto al MIT nel 1969 (vedi Fig. 5-1) insieme a B. Montgomery (un ingegnere esperto di magneti). L'Alcator è un esperimento in cui la compattezza (vedi Fig. 5-2) e l'elevatezza dei campi magnetici furono ottimizzati per avere la possibilità di studiare una estesa varietà di regimi fisici dei plasmi da esso confinati. Esso è stato realizzato con una spesa molto bassa e con spirito e struttura di tipo universitario, cioè con un'organizzazione poco formale e poco burocratica.

Nell'esperienza che portò alla scoperta suddetta ebbe un ruolo centrale il lavoro di un gruppo di italiani distaccato al MIT (vedi per esempio Fig. 5-3). La scoperta consistette nell'osservare inaspettatamente che il parametro di confinamento dell'energia ($n\tau$) cresceva con il quadrato della densità n (vedi Fig. 5-4). Perciò avendo trovato il modo di realizzare plasmi ad alta densità, e per di più, privi di impurezze, si fu in grado di arrivare vicino al cosiddetto traguardo di Lawson che, per plasmi di deuterio-trizio, è $n\tau \approx 10^{14} \text{ sec/cm}^3$ (vedi Fig. 5-5) per quelli di noi che avevano lavorato nella fisica del plasma negli anni '60 tale traguardo era sembrato una meta molto lontana, probabilmente non per la nostra generazione!

Questo risultato è soltanto una riprova di quanto ho detto a proposito del nostro imprevedibile incontro con Urano.

Nella Fig. 5-6 è mostrata la macchina Alcator C che ha raggiunto un valore del parametro di confinamento ($n\tau \sim 8 \times 10^{13} \text{ sec/cm}^3$) molto vicino al suddetto limite di Lawson (vedi Fig. 5-7), mentre nella Fig. 5-8 è mostrata la macchina sorella di Frascati, FT, agli inizi nota nella comunità scientifica competente come Super Alcator.

A questo punto ritengo necessario sintetizzare quale è stata la linea di sviluppo di questi esperimenti compatti ad alto campo: Alcator A, FT, ed Alcator C. La sequenza temporale e logica di tali esperimenti non risulta dalla relazione che l'attuale presidente dell'ENEA ha presentato a questa Commissione. A questo scopo

può essere utile fare riferimento alla Fig. 5-9 in cui sono rappresentate nel tempo le fasi di costruzione (progetto, ordini, montaggio) e di funzionamento delle tre macchine citate, ed alla Fig. 5-10 nella quale è mostrata la scalata al limite di Lawson.

In particolare, per quanto riguarda lo svolgimento della ricerca a Frascati, ritengo opportuno rammentare quanto segue.

Nei 1971, a seguito di una collaborazione iniziata fin dal 1968, venni invitato come consulente per impostare il programma FT come sviluppo di Alcator A e per ottenere l'appoggio della comunità internazionale per FT. Infatti agli inizi questa collaborazione era stata considerata l'idea di realizzare a Frascati una macchina di tipo Tokamak (vedi Fig. 10-6, Sezione 10) il quale però, con le tecnologie ed i parametri scelti, non avrebbe potuto che confermare gli esperimenti già svolti in precedenza nella Unione Sovietica.

Il cenno alla applicazione nei Laboratori di Frascati di alti campi magnetici ai plasmi fatto nella relazione dell'ENEA tramite il suo Presidente sembra doversi interpretare come un riferimento alla tecnica dell'intensificazione dei campi magnetici con l'impiego di esplosivi (esperienza MAFIN), tecnologia questa che nulla ha a che vedere con la realizzazione di macchine toroidali ad alto campo magnetico. Nessuno di noi fra il 1968 ed il 1972, quando il lavoro principale di progetto fu concluso, avrebbe mai previsto il raggiungimento di condizioni record di confinamento così avanzate (vedi Fig. 5-5, 5-6) come quelle ottenute da Alcator e FT.

Questa descrizione degli eventi chiarisce quindi che il "miracolo" della realizzazione di regimi di confinamento così importante non fu certo nei piani del nostro ente nucleare, e la linea di ricerca rappresentata da FT fu una discontinuità rispetto ai precedenti indirizzi di ricerca del CNEN. Anzi, c'è da aggiungere a questo proposito che in tempi precedenti a quelli in cui vennero ottenuti i record, venni più volte rimproverato di aver messo l'Italia nella stessa avventura in cui avevo messo il MIT con la linea Alcator, invece di seguire la linea delle grandi macchine. Ora è consolante constatare che le grandi macchine (JET in Europa, TFTR negli Stati Uniti e JT-60 in Giappone) hanno riscoperto e riconfermato la sequenza di regimi di fisica del plasma scoperti con Alcator e, ripetendo gli stessi esperimenti di Alcator C ne stanno

migliorando il record del parametro di confinamento (vedi Fig. 5-11).

In più come mostrato nell' Appendice B il programma statunitense del prossimo futuro è stato riorientato con tre programmi sperimentali in parallelo al M. I. T., Livermore e Princeton sulla filiera delle macchine compatte tipo Alcator - Ignitor.

Devo sottolineare che l'ottenere un plasma puro di deuterio non è tuttora un obiettivo facile in esperimenti diversi dalla linea Alcator, e spesso nel citare risultati ottenuti il fattore purezza non viene considerato. L'importanza di questo è duplice:

- a) plasmi impuri perdono energia per radiazione in condizioni di fusione e si accendono con estrema difficoltà
- b) le proprietà fisiche di plasmi impuri sono diverse da quelle di plasmi puri e perciò la rilevanza di proprietà fisiche scoperte per plasmi impuri va debitamente scrutinata.

Infine devo ricordare che l'aver avanzato la proposta di un esperimento di accensione di tipo Ignitor nel '75-'76 stimolò negli anni successivi uno sforzo notevole per migliorare le prestazioni delle grandi macchine (JET, TFTR, JT-60 e T-15 nell' Unione Sovietica) già in fase di progetto in modo da portarle a funzionare con parametri più vicini possibile a quelli ritenuti necessari, come indicato nella proposta Ignitor, per raggiungere l'accensione. Inoltre, sulla base delle conoscenze attualmente disponibili, è facile verificare che l'approccio delle macchine compatte è l'unico ad assicurare i margini di progetto necessari a raggiungere l'accensione. Per esempio i progetti concettuali di supermacchine (il cui costo è di parecchie migliaia di miliardi di lire) quali I. N. T. O. R. e N. E. T., condotti dall'Agenzia Atomica Internazionale e l' Euratom non hanno sulla carta, a mio giudizio e secondo quello dei colleghi europei e americani che hanno partecipato alla progettazione di Ignitor e di C. I. T. (vedi Appendice B), un parametro di confinamento sufficientemente elevato.

VIII. PLASMAS AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION*

E. High-Temperature Toroidal Plasmas

Academic and Research Staff

Prof. B. Coppi	Prof. R. A. Blanken	Prof. R. R. Parker
Dr. D. B. Montgomery†	Prof. R. J. Briggs	Prof. K. I. Thomassen
Prof. B. Bekefi	Prof. L. M. Lidsky	Dr. R. Gajewski
Prof. A. Bers	Prof. W. M. Manheimer	Dr. P. A. Politzer

I. ALCATOR EXPERIMENT B. Coppi

Introduction

The idea for an advanced experiment in high-temperature plasmas started to take form at M. I. T. in the spring of 1969 with various motivations.

One motivation came from the realization that in high-temperature plasmas micro-instabilities can be excited in such a way that the plasma configuration is not destroyed but its transport property can be significantly modified. Thus one important consequence is the appearance of anomalous resistivity. This takes place when the interactions between particles and plasma collective effects arising from a relatively large current density add up to the known effects of interparticle collisions and produce an enhanced resistivity. Evidence of this is shown in Fig. VIII-3. Therefore it was natural to propose an experiment that could achieve different plasma regimes where the analysis of these transport processes would be possible and, at the same time, could utilize these effects to enhance the plasma ohmic heating process that occurs when a current flows into it.

A second motivation was that much of the research effort in high-temperature plasmas thus far has been devoted to testing new magnetic confinement configurations, rather than to achieving new plasma regimes, where magnetic confinement can be easier, and to further understanding plasma collective processes. So a departure from this trend was needed.

A third motivation came from realizing that at the Francis Bitter National Magnet Laboratory advanced technologies have been developed for the construction of large-volume high magnetic field magnets which are ideally suitable to the type of experiments indicated above.

The primary drawback of Tokamaks is that the current flowing inside the plasma provides heating and the confining magnetic field at the same time, so that they have a certain degree of inflexibility and interdependence of the various parameters.

According to the previous classification, Alcator belongs to the Tokamak category, but potentially it will outclass all devices of this kind that have been built because of its unusually high magnetic field, high degree of symmetry, favorable aspect ratio R/a , high values of current density that can be achieved, and diagnostic accessibility.

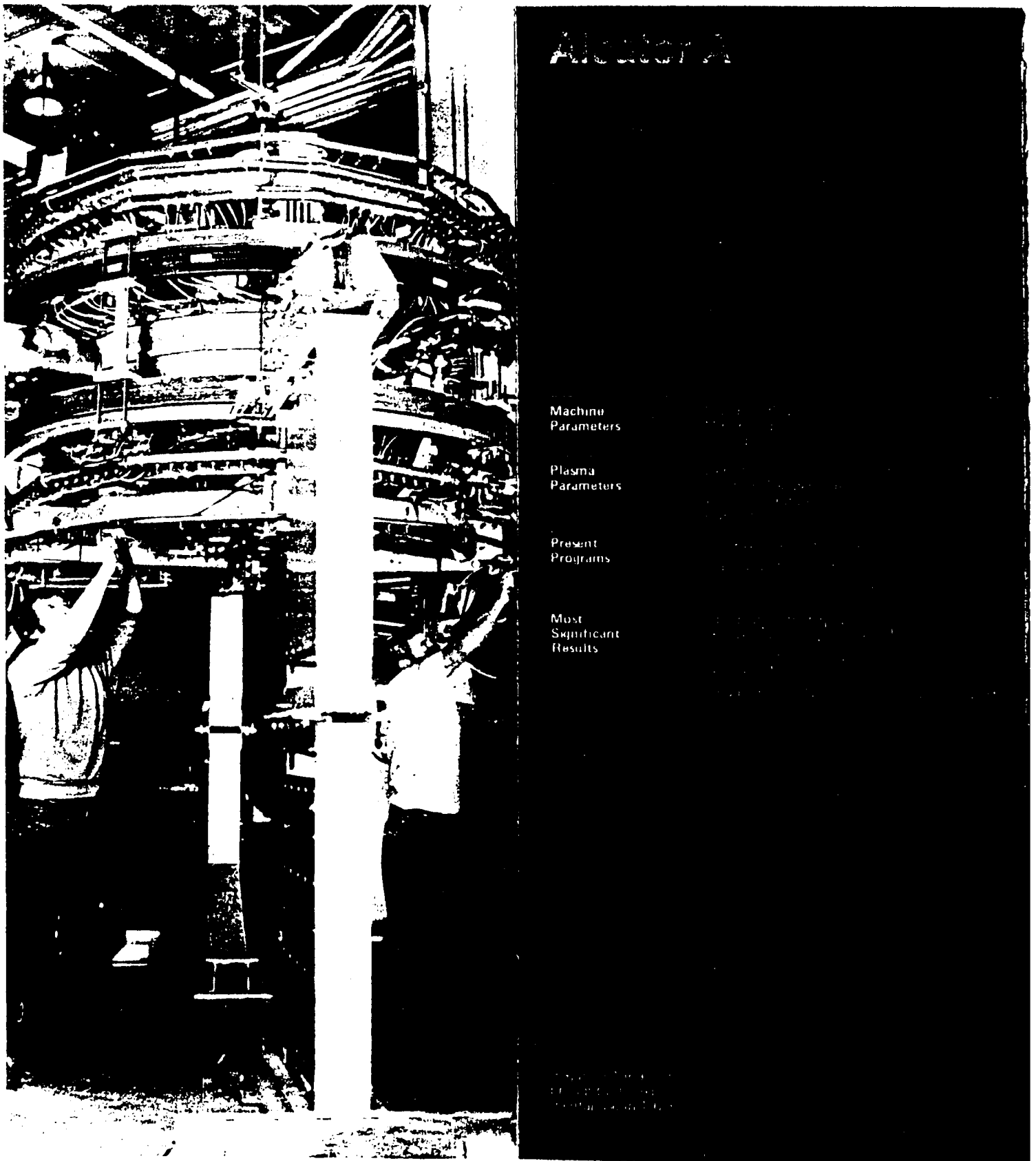
*This work was supported by the U.S. Atomic Energy Commission (Contract AT(30-1)-3980).

†Dr. D. Bruce Montgomery is at the Francis Bitter National Magnet Laboratory.

Estratto dal Rapporto M.I.T. Quarterly Progress Report No. 97, R.L.E. (Cambridge, MA, 1970).

Fig. 5-1

DOCUMENT OFFICE 26-327
RESEARCH LABORATORY OF ELECTRONICS
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY



Nocciolo dell'esperimento originale
Alcator (Alcator = Alto Campo Torus).

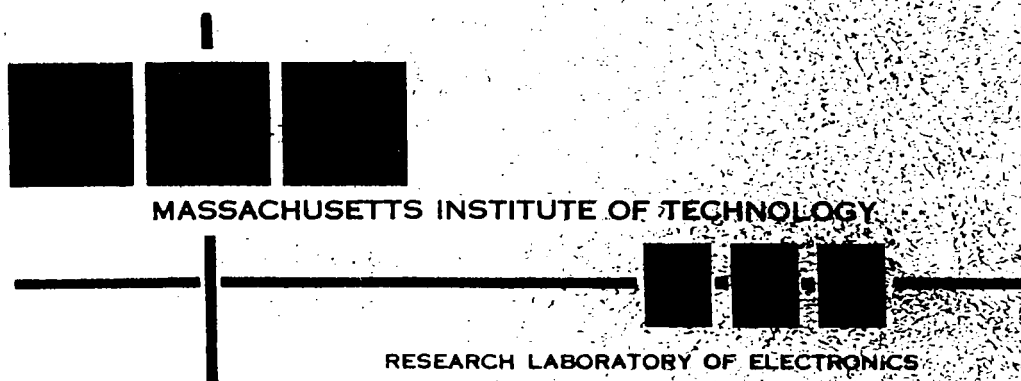
Fig. 5-2

HIGH TEMPERATURE REGIMES IN MAGNETICALLY
CONTAINED PLASMAS IN THE ALCATOR TOKAMAK

B. Coppi, G. Lampis, F. Pegoraro
L. Pieroni and S. Segre

PRR-75/24

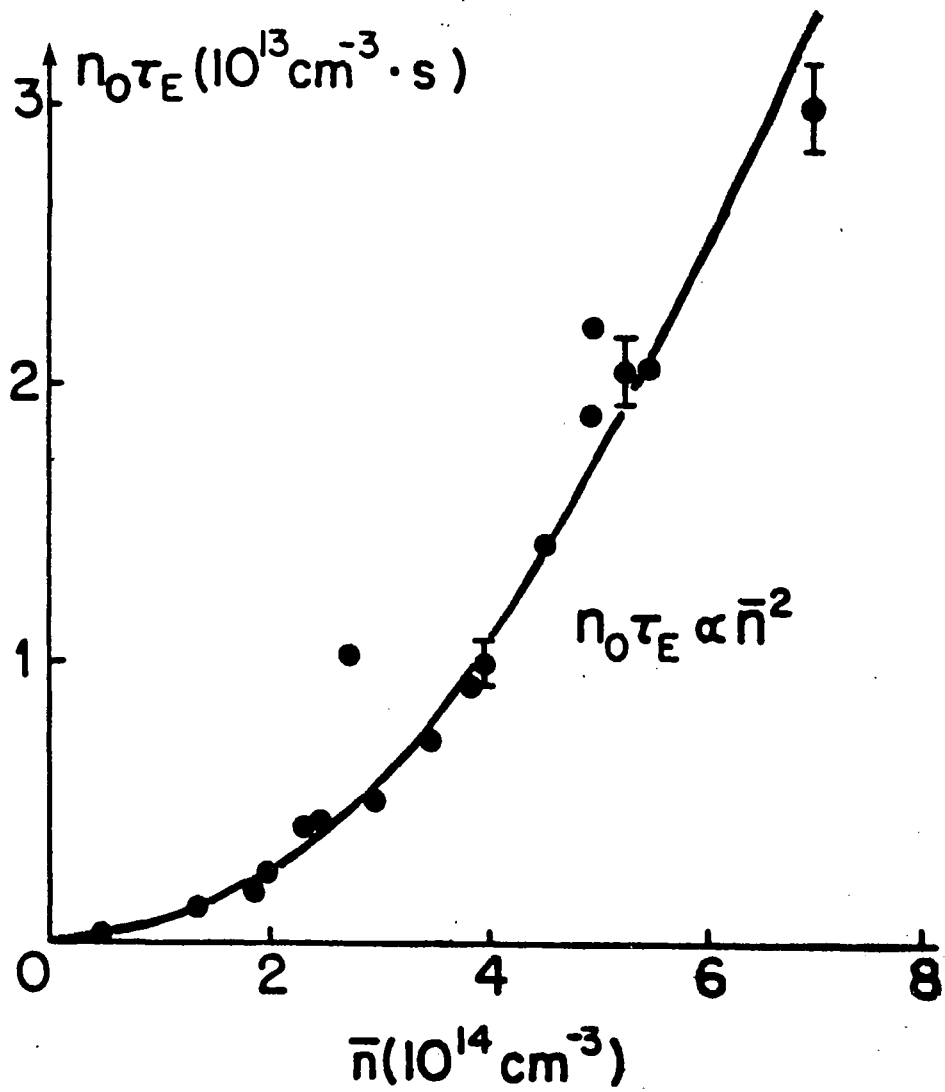
October, 1975



Esempio di contributo italiano alle scoperte
di fisica del plasma e delle proprietà di
confinamento ottenute con la macchine Alcator.

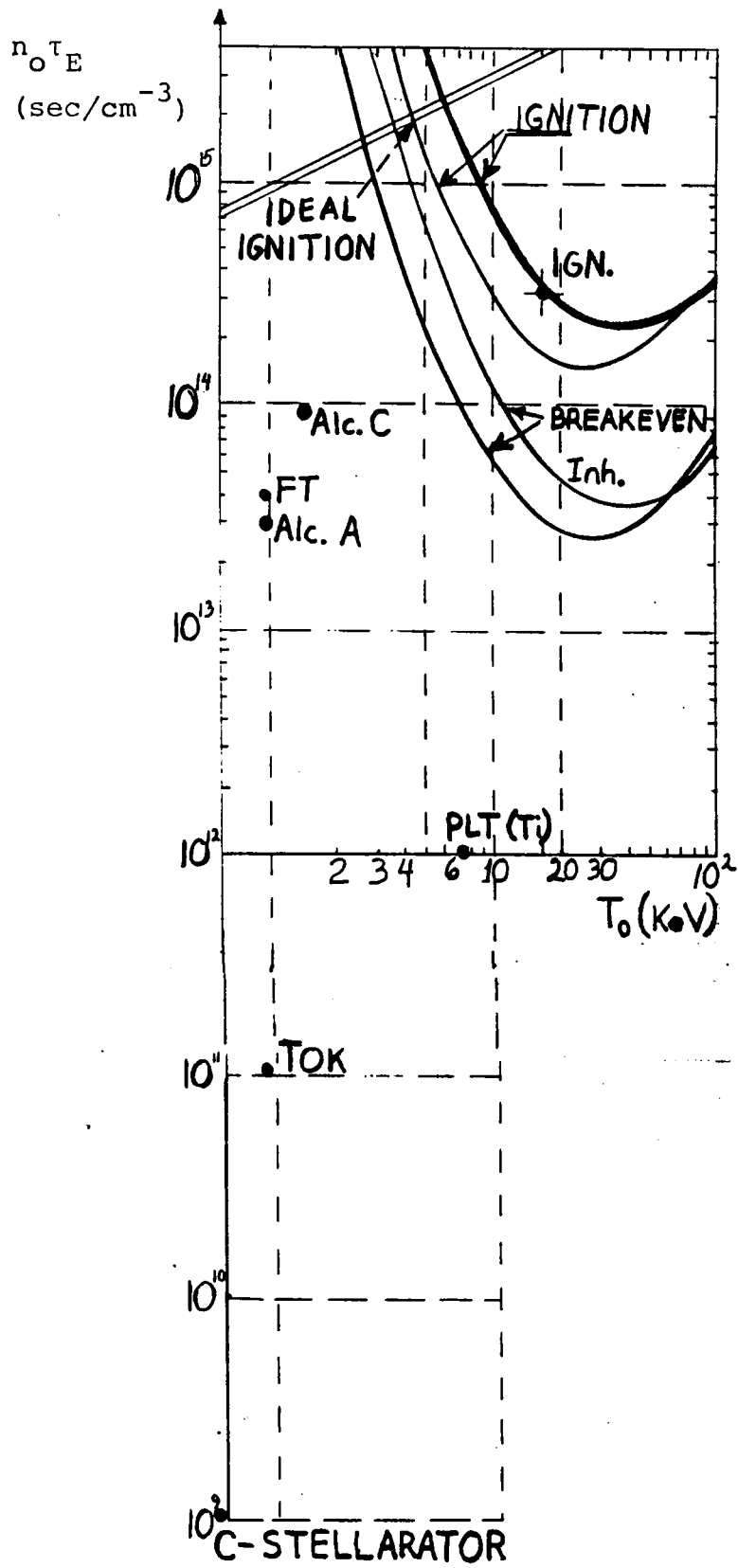
P. Lampis - CNR - Milano
F. Pegoraro - Scuola Normale Superiore, Pisa
L. Pieroni & S. Segre - ENEA - Frascati

Fig. 5-3



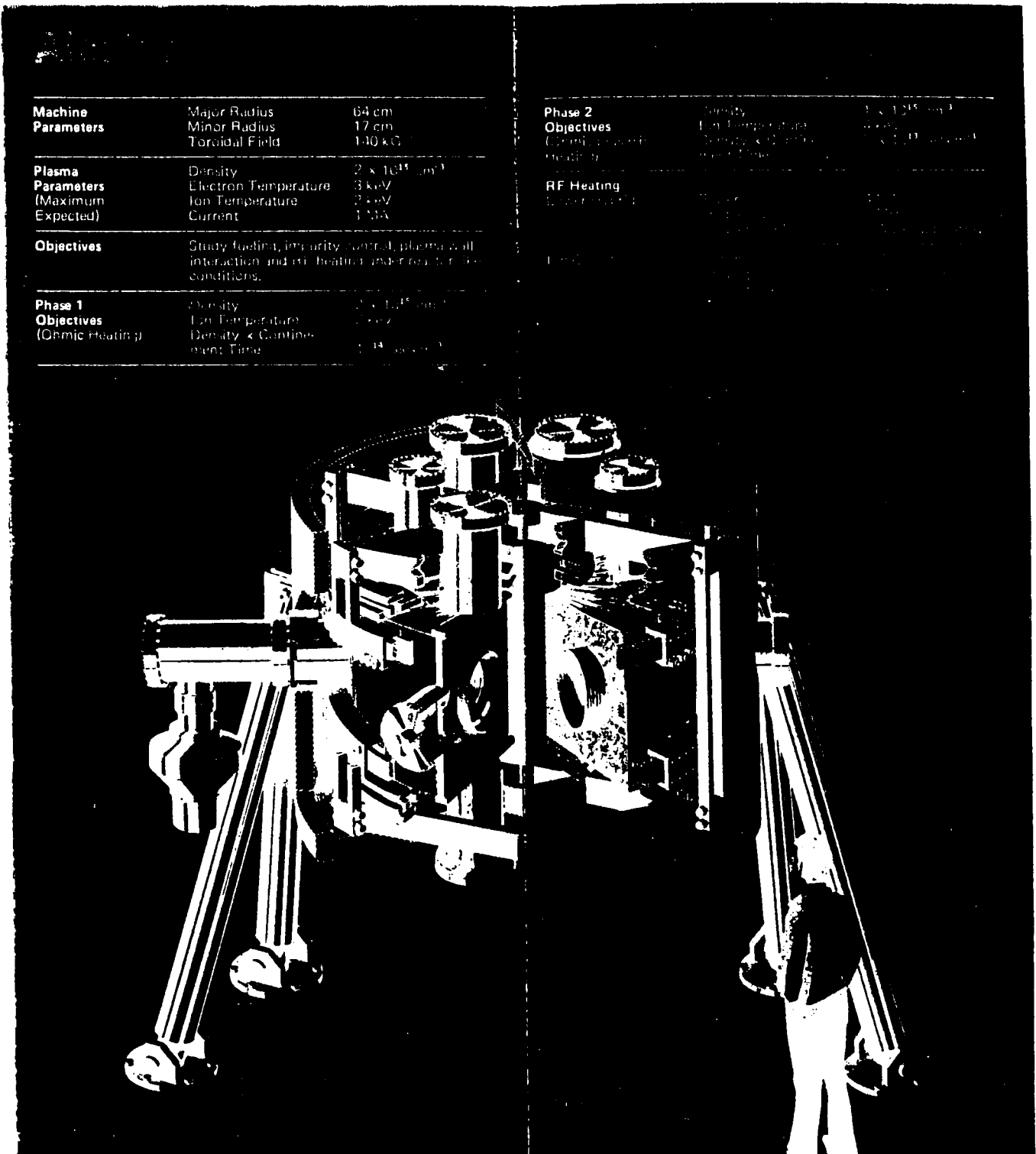
Scoperta della "legge-Alcator" (Alcator scaling) per il parametro di confinamento $n\tau_E$.

Fig. 5-4



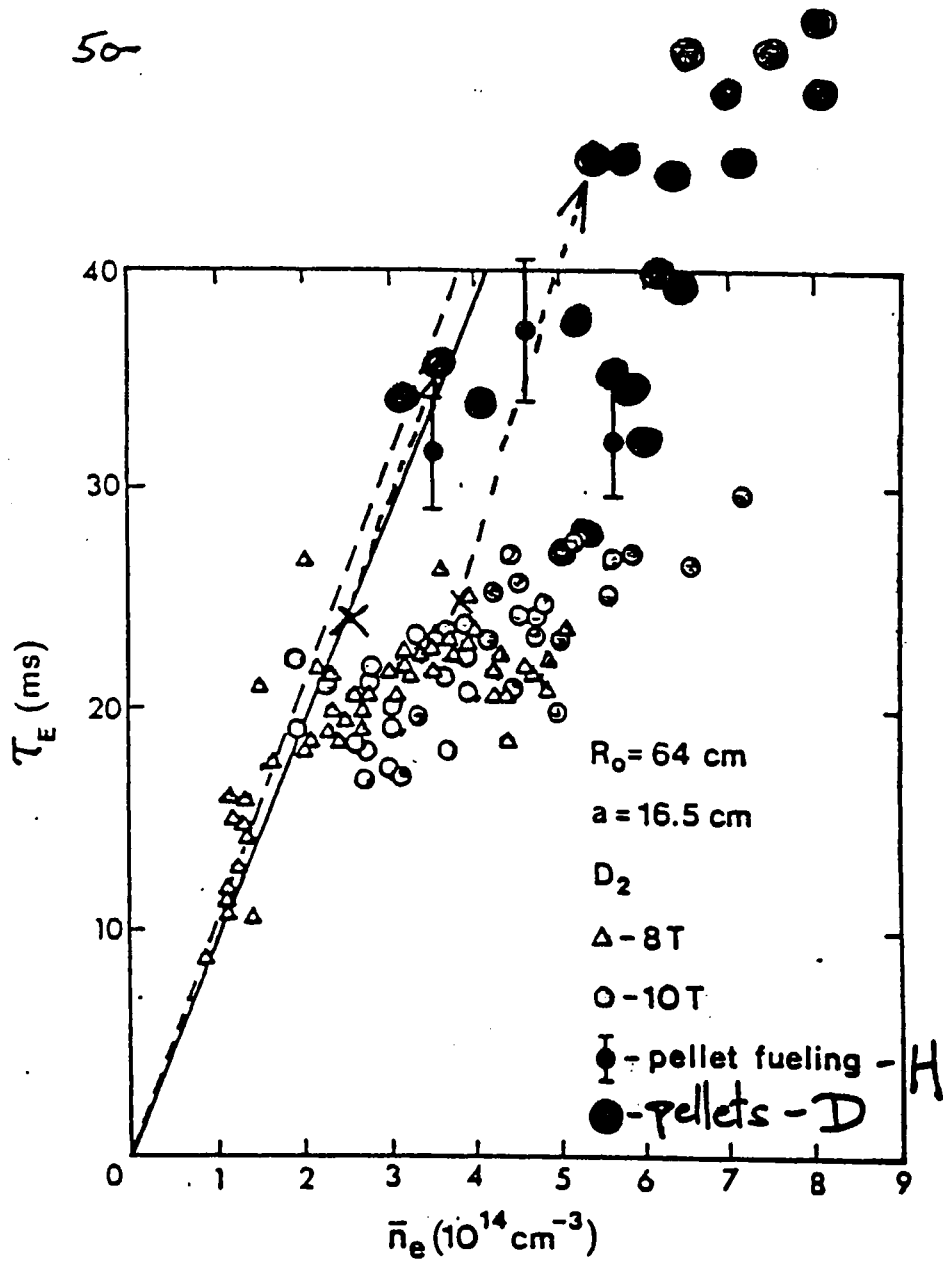
Il limite di Lawson ($n\tau \approx 10^{14} \text{ sec/cm}^3$) raggiunto rapidamente e per la prima volta, dalla filiera Alcator A, FT, Alcator C.

Fig. 5-5



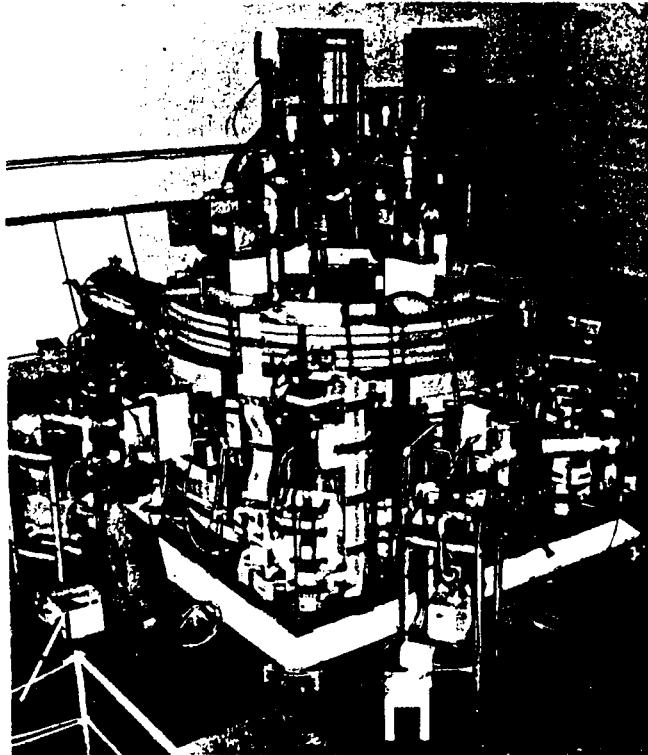
Nocciolo della macchina Alcator C iniziata nel 1975 come logica successione all'Alcator A e esperimento parallelo al Frascati Torus, soprannominato Super Alcator.

Fig. 5-6



Risultati record di Alcator C.

Fig. 5-7



Nocciolo della macchina FT. Il suo progetto finale fu elaborato nel 1971-72 come logica estensione del programma Alcator dietro specifica decisione della Commissione direttiva del CNEN e assunzione come consulente dell'autore per impostarne il programma, a partire dal 1971, seguendo una fruttuosa collaborazione iniziata nel 1968. Perciò è nozione comune che Alcator, Frascati Torus e Ignitor fanno parte di una filiera unica la quale ha portato il programma italiano a una posizione di avanguardia.

Fig. 5-8

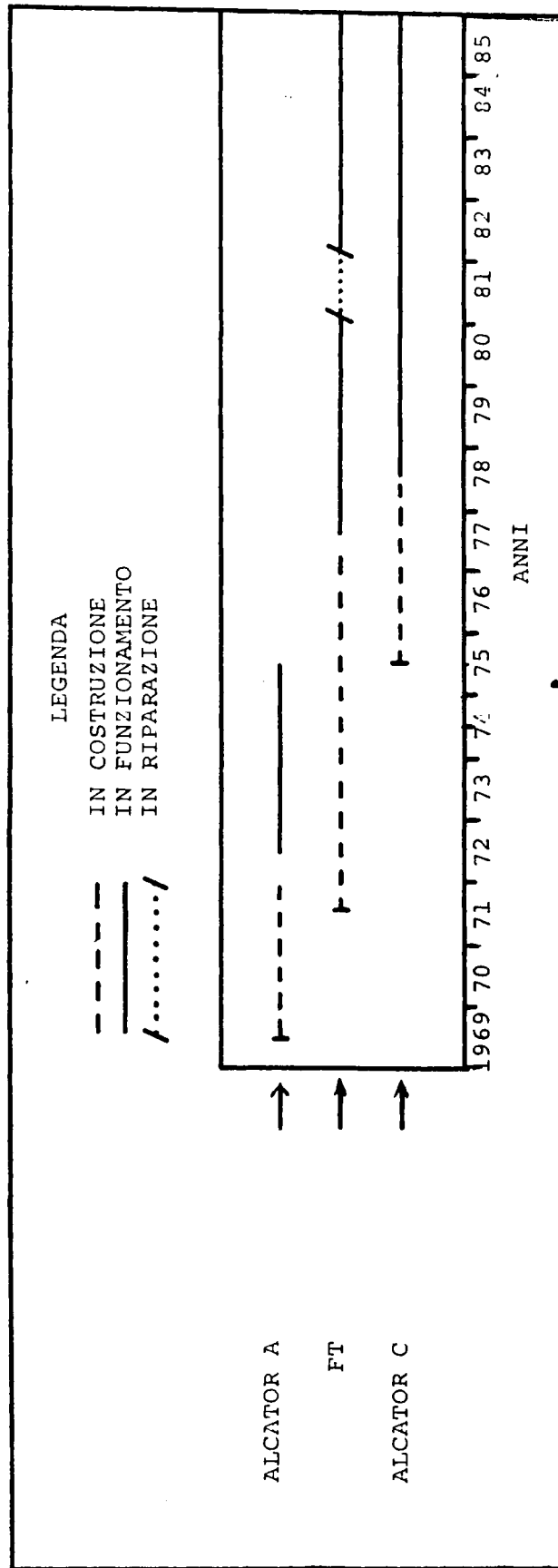


Fig. 5-9

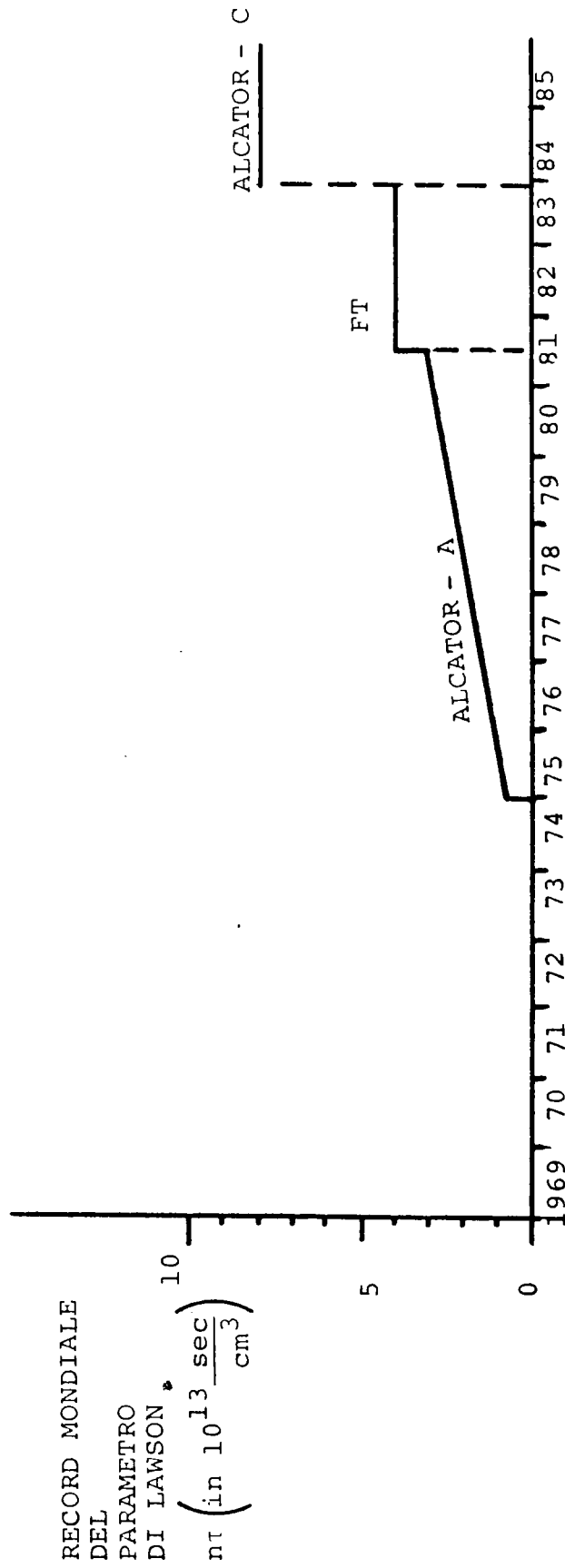
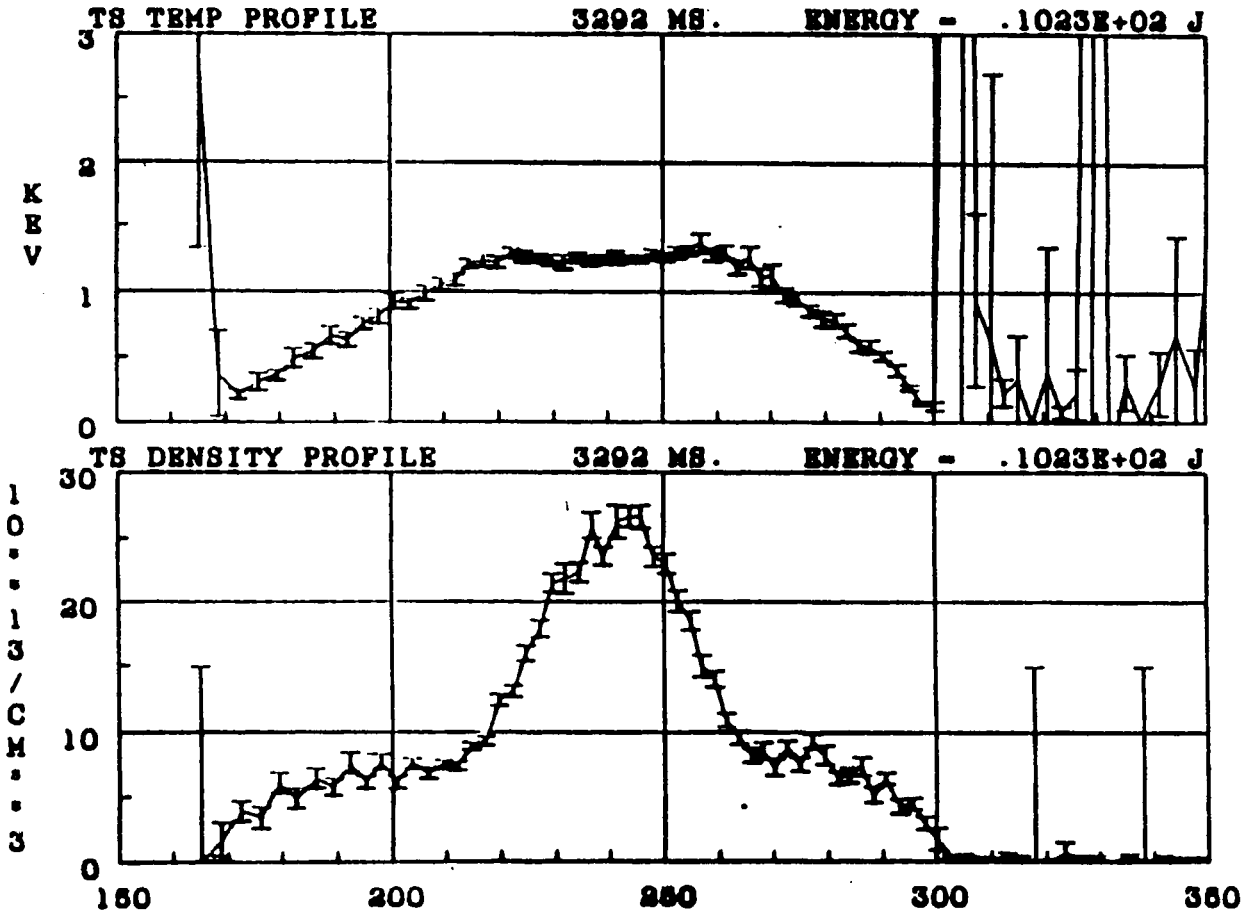


Fig. 5-10

3P (2) *DU mdy*

ANT19023 02/26/86 13:37

HAX [UTIL]CUPLOT 04/01/86 20:04



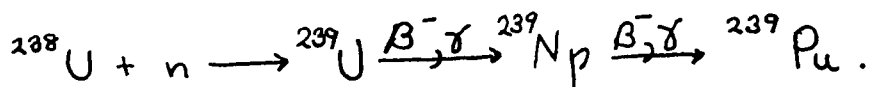
TS-RA-P8 CH.

Le grandi macchine, come TFTR, di costo molto più elevato degli Alcator hanno raggiunto valori record del parametro di confinamento vicini a quegli degli Alcator inpetendo lo stesso tipo di esperimenti. In realtà la temperatura ottenuta da Alcator C in tale regime resta tuttora superiore. Tutto questo conferma la basi teoriche e sperimentali sulle quali è fondato il programma Ignitor.

Fig. 5-11

6. Produrre Plutonio con reattori a fusione: Obiettivo a breve termine ma non raccomandato.

Esiste la possibilità di dare una dimostrazione del fatto che reattori a fusione possono essere utilizzati a tempi brevi senza neanche dover attendere la veritica sperimentale delle condizioni di combustione autosostenuta. Questa consiste nel progettare una macchina a deuterio-trizio che funzioni da sorgente di neutroni veloci da 14 MeV. Tali neutroni possono essere utilizzati per convertire Uranio naturale in un isotopo "pregiato" del plutonio secondo la reazione



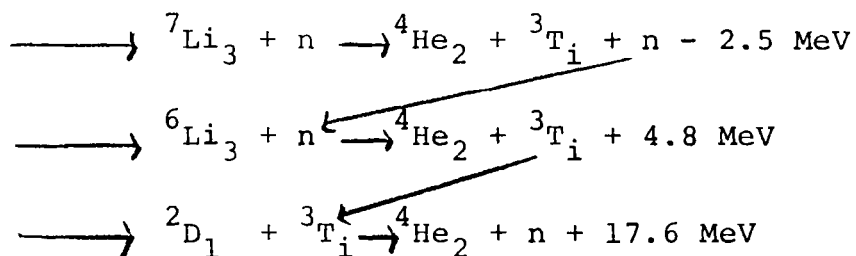
Il plutonio prodotto può essere utilizzato in un reattore a fissione per produrre energia con metodi convenzionali.

Questo è il principio dei reattori ibridi il cui concetto gode notevole popolarità nell'Unione Sovietica. I vantaggi sono evidenti. Due delle principali controindicazioni sono che un tale sistema

- a) potrebbe finire per combinare gli svantaggi inerenti ai reattori a fissione e fusione messi insieme,
- b) pone dei seri problemi di controllo di proliferazione delle armi nucleari dato il tipo pregiato di Plutonio prodotto.

Ritengo che data l'estrema delicatezza del punto b) sia bene che sistemi di questo tipo rimangano allo stadio di progetto concettuale.

Neutron-based Fusion Reactors



Advantages

- o no foreseeable limitations of D and Li supply
- o the reactivity of D-T mixtures is significant at relatively low temperatures (< 10 keV)

Drawbacks

- o 14 MeV neutrons produce activation and radiation damage in structural materials
- o relatively large quantities of tritium are to be handled
- o Li blanket poses severe technological problems

Reazioni caratterizzanti un reattore al trizio: vantaggi e svantaggi.

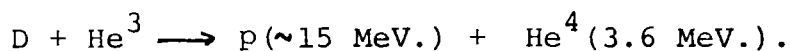
Fig. 6-1

7. Reattori "Candidi"

Esistono diversi tipi di reattori a fusione possibili, alcuni meno desiderabili di altri, per esempio per le dimensioni e la complessità richieste, il grado di attivazione dei materiali, la possibilità di essere utilizzati per produrre materiale fissile.

A questo proposito ricordo che fino a circa il 1980 si era ritenuto che date le tecnologie esistenti e lo stato delle conoscenze di fisica del plasma, non si potesse utilizzare altro che la miscela deuterio-trizio, poichè questa è la più facile da accendere. Uno dei motivi che avevano dato origine a questa convinzione era legato ad una teoria che io stesso avevo iniziato intorno al 1965 e che era basata su ipotesi troppo semplificative. In base a nuovi risultati teorici, ottenuti con uno studente e due collaboratori al MIT nell'inverno 1977-78, trovammo una "seconda regione di stabilità" dei plasmi confinati da campi magnetici intensi.

La conseguenza di questo fu che potemmo dimostrare (Fig. 7-1) la fattibilità teorica di reattori più avanzati, che non usano trizio, e in particolare del reattore cosiddetto pulito a elio-3. Questo è basato sulla reazione



Gli aspetti attraenti di questa reazione sono:

- i combustibili non sono radioattivi
- i prodotti della reazione sono particelle cariche che si possono "guidare" opportunamente. Perciò tutta la loro energia può essere utilizzata sia per mantenere il riscaldamento della miscela di plasma che per una conversione diretta in energia elettrica senza eccedere i limiti di carico termico ammessi per le superfici dei materiali costituenti la "prima parete". In questo caso si può arrivare a produzione di energia elettrica evitando il passaggio attraverso un ciclo termodinamico che richiede, com'è ben noto, di smaltire grandi quantità di calore nell'ambiente.

Soltanto una piccola parte dell'energia prodotta da una miscela deuterio elio-3 viene prodotta in forma di neutroni che in media sono meno energetici e penetranti di quelli prodotti da

una miscela deuterio-trizio (50-50). In più si possono adottare accorgimenti diversi per ridurre la produzione di questi neutroni.

Infatti, minimizzando la produzione di neutroni si minimizzano i problemi di attivazione dei materiali. Questo, e l'assenza di combustibili radioattivi, minimizzano i problemi di protezione.

Ricordo a questo proposito che al tempo in cui eseguimmo gli studi relativi, andammo alla ricerca dei nomi da dare agli esperimenti per studiare le condizioni di queste miscele avanzate. Così con l'aiuto del collega Nenci, ben noto professore di lettere, ci accordammo su Katharsor o Candor per dare l'idea che questi esperimenti (vedi Fig. 7-2) rappresentavano una nuova fase nell'evoluzione dell'energia nucleare. La Società Americana di Fisica dette molto risalto al nostro lavoro e in seguito a una conferenza stampa data a Washington esso fu ben riportato dagli organi di stampa più noti entro e al di fuori degli Stati Uniti.

A questo punto devo ricordare che l'elio-3 è molto raro sulla terra e perciò esso, come il trizio, deve essere prodotto partendo da altri elementi.

Il trizio, che ha una vita media di 12 anni, decade in elio-3. Quindi, (dato il numero di testate nucleari contenenti trizio prodotte!) le riserve esistenti di questo combustibile sono più che sufficienti per tutti i programmi sperimentali che possiamo intravedere al momento (vedi Fig. 7-3). Pensando ad un'utilizzazione su larga scala un gruppo dell'Università dell'Illinois ha proposto e studiato la fattibilità di gruppi di reattori (vedi Fig. 7-4) a deuterio-deuterio per la produzione di elio-3 da utilizzare poi in centrali a deuterio-elio-3 dislocate vicino ai centri abitati. Ai fini dell'accensione, un reattore a deuterio-deuterio (Fig. 7-5) ha requisiti fisici simili a quelli per i reattori a deuterio-elio-3, ma produce circa il 40% della sua energia in forma di neutroni.

Da quando i primi studi su reattori tipo Candor furono svolti, vi sono stati sviluppi favorevoli in relazione a questa linea di esperimenti. Uno è stato il raggiungimento di nuovi valori record del parametro di confinamento $n_o \tau_E$ con densità di plasma uguali a quelle considerate necessarie. Un altro sviluppo importante è quello della tecnologia dei laser a elettroni liberi (F.E.L.). Questa offre la possibilità, in via di principio, di riscaldare plasmi di alta densità confinati da campi magnetici elevati. Perciò è possibile intravedere la possibilità di eliminare anche il ruolo di "accendino" per il trizio, quale era stato proposto per raggiungere le temperature necessarie ad accendere la desiderata miscela di deuterio ed elio-3.

Physica Scripta. Vol. T2/2, 590-595, 1982

Physics of Neutronless Fusion Reacting Plasmas

B. Coppi

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, U.S.A.

Received July 25, 1982

Abstract

On the basis of present day knowledge of plasma physics and available technologies it is shown that experiments having the purpose to test the thermonuclear burn conditions of plasmas with fusion reactions that do not produce neutrons can be undertaken.

1. Introduction

Recent theoretical developments in plasma physics coupled with novel experimental observations and advances in the technology of high magnetic field plasma devices, have made it possible to think [1, 2] of feasible experiments [3] to study the burning conditions of thermonuclear plasmas such as D-He³ and D-D, that do not involve tritium as a primary fuel. In fact, in order to achieve this goal, it is necessary to have a plasma confinement configuration that can attain, for instance:

(a) values of $n_0\sigma_E$ (n_0 being the peak plasma density and τ_E the energy replacement time) about or higher than 5×10^{16} s cm⁻³;

(b) values of $\langle\beta\rangle = 8\pi\langle p\rangle/\langle B^2\rangle$ ($\langle p\rangle$ being the average plasma pressure and $\langle B^2\rangle/8\pi$ the average magnetic pressure of the confining magnetic field) around 10 percent.

(c) plasma currents around 5 MA or higher, in order to generate the required magnetic fields needed to confine the 14.7 MeV protons produced; and

(d) average plasma temperatures as high as 30 keV.

These objectives can be achieved simultaneously in an axisymmetric toroidal configuration by experiments in which:

- Goal (a) is pursued on the basis of presently known scalings for the plasma thermal conductivity that exhibit a favorable dependence of τ_E on n . Thus it is proposed that peak particle densities exceeding 10^{15} cm⁻³, can be obtained in a configuration with sufficiently high magnetic fields (e.g., 120 kG) having an adequate area of its transverse cross-section in order to meet the desired $n_0\sigma_E$ criterion. Well-confined plasmas with peak density values higher than 10^{15} cm⁻³ have, in fact, been produced already in the Alcator A and C devices at MIT.

- Goal (b) is pursued by adopting a combination of magnetic and geometric parameters, such as the torus aspect ratio, in such a way that during the heating cycle the plasma is maintained within the relatively broad range of plasma parameters where new favorable conditions for macroscopic stability (against both ballooning and internal kink modes) have been found.

- Existing high magnetic field technologies make it possible to produce plasma columns with high currents, without any of the known macroscopic plasma instabilities,

- Goal (d) is achieved by a RF heating system supplementing ohmic heating in order to bring a deuterium-tritium plasma to ignition conditions. In fact, tritium can be used as a "match" [1, 2] to raise the plasma temperature, and, as this temperature increases, it is gradually replaced [3] as main fuel by He³ or D.

The most convenient frequency for the auxiliary heating system appears to be that corresponding to the first harmonic of the cyclotron frequency of He³, and, at the same time, to the second harmonic of the cyclotron frequency of tritium. We note that the effectiveness of ion cyclotron heating in plasmas with two species of ions has been well demonstrated in several experiments carried out on the most advanced existing toroidal devices.

In this connection we notice that the usually-known ignition conditions (based on the assumptions that: (1) the distributions of all components of the background plasma are Maxwellian, and (2) the slowing-down of the charged fusion reaction products is due to Coulomb scattering only) are relaxed when considering that background ions can be promoted in energy by both Coulomb and nuclear elastic collisions [4, 5]. As a consequence of this

(a) fuel particles promoted in energy have a non-negligible self-interaction probability (tail-tail reactions);

(b) fuel particles promoted in energy, and fusion reaction products can fuse with other fuel particles belonging to the Maxwellian part of their distribution ("fast fusion" or "propagating reaction events");

(c) nuclear scattering collisions increase the fraction of energy transferred by charged fusion products to the background ions.

Another related development is the proposal to enhance and control the reaction rate of the fuel species by relative orientation of their nuclear spin. Thus in the case of a D-He³ reactor it is possible to gain a factor 1.5 in reactivity by injecting and maintaining [6] D and He³ with spin polarization, along the direction of the magnetic field. At the same time the rate of D-D reactions that produce neutrons can be reduced to such an extent that, if the combination of physics requirements we have indicated can be realized in practice, a nearly neutronless reactor, may no longer be a very distant dream.

2. Accessibility of finite- β states

In order to identify a class of possible experiments with the characteristics indicated earlier, we have developed a program of investigations [8] on the macroscopic stability of axisymmetric toroidal configurations that can reach finite values of β within a reasonably broad range of heating cycles.

We notice that D-He³ burning conditions where finite- β stable equilibria are needed are reached only for relatively high temperatures and, in the case where tritium is used as a "match", only after D-T ignition is achieved. Therefore

(i) we shall disregard the effects of resistive modes as for the temperatures we consider they are not important,

(ii) we shall assume that the transition from low- β regimes, where D-T ignition can occur, to finite- β regimes is sufficiently

Esempio di lavoro invitato (invited paper)
a una delle maggiori conferenze internazionali
di fisica del plasma (Göteborg, 1981) riguardante
la scoperta della "seconda regione di stabilità" e la dimostrazione che reattori
sperimentali di tipo Candor (deuterio-elio 3)
possono essere costruiti con le tecnologie esistenti.

CANDOR - '86

$$R_o = 165 \text{ cm}$$

$$R_o/a = 3$$

$$a = 55 \text{ cm}$$

$$b = 100 \text{ cm}$$

$$b/a \approx 1.8$$

$$V_o \approx 18 \text{ m}^3$$

$$S_o \approx 50 \text{ m}^2$$

$$I_c \approx 107.5 \text{ MA-turn}$$

$$B_T = 130 \text{ kG}$$

$$q_E = (ab/R^2) I_c / I_F \approx 1.6$$

$$I_p \approx 13.5 \text{ MA}$$

$$\bar{B}_p = 2 I_p / 5(a+b) \approx 35 \text{ kG}$$

$$I_p \bar{B}_p \approx 47 \text{ MA-T}$$

$$R_{Te} \approx 65 \text{ cm}$$

$$\Delta_e \approx 7.5 \text{ cm}$$

Esempio di parametri caratteristici di un reattore sperimentale di tipo Candor.

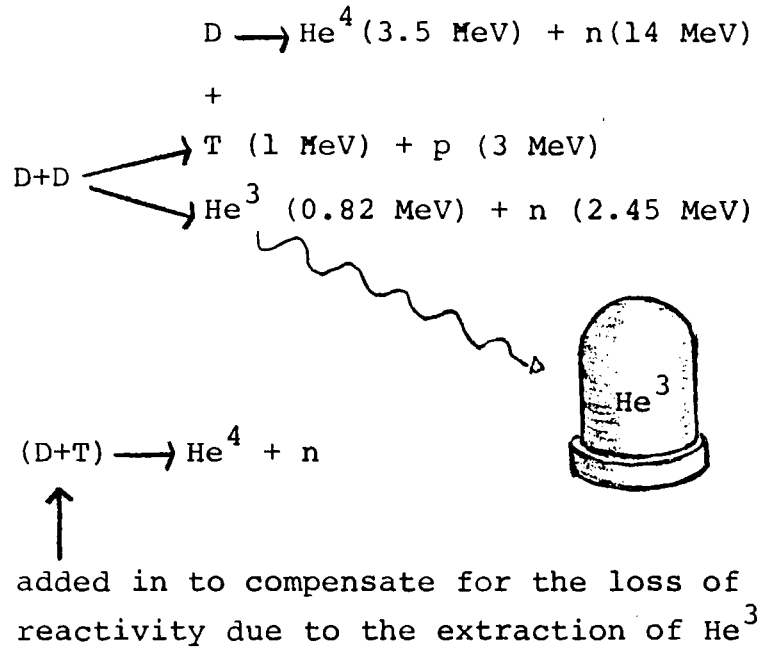
Fig. 7-2

Source	Cumulative Amount to Year 2000 (kg)	Production Rate Post Year 2000 (kg)
Decay of T ₂		
DOE		
MRC annual sales	---	1.3
MRC inventory	>13.4	---
CANDU reactors	10	2
U.S. weapons (approximate)	~300	~15.
Natural gas wells		
Underground storage	29	---
Known reserves	187	---
Total	500 to 600	~18

Stime delle quantità
di elio-3 disponibili
in Occidente.

Fig. 7-3

Tritium Assisted He³ Producer



Sistema per la produzione di elio-3 con isole di reattori deuterio-deuterio proposto e studiato del dipartimento di ingegneria nucleare dell' Università dell' Illinois.

Fig. 7-4

COMMENTS



Reviewers for *Fusion Technology* are asked to screen every paper submitted to the journal for technical soundness and potential importance to the community. Thus the quality of articles has been extremely high, and the journal has been privileged to publish a number of articles that have already had a significant impact on directions in the development of fusion energy. In other cases, the importance, hence impact, of papers has not yet been recognized but may occur in the future as researchers continue to study the archival literature. As editor, I have normally refrained from commenting in this space on specific articles. However, in view of its obvious importance, and frankly, my personal interest and prior involvement in research on advanced (or alternate) fuel fusion, I feel some remarks are justified in the case of the paper, "Lunar Source of ^3He for Commercial Fusion Power," by L. J. Wittenberg, J. F. Santarius, and G. L. Kulcinski, in this issue.

One reason an editor hesitates to comment on papers is that despite the strong effort by reviewers, mistakes can slip by so that the "test of time," i.e., the continued study and review by readers and users of material in the article, provides the ultimate review. Because of this fact, some additional steps were taken in the case of the "Lunar Source" paper. Namely, extra reviewers were used to ensure detailed coverage of the various facets involved in the study. This unusual step does not negate the need for the test of time, but it does increase the probability that the test will be passed.

In their paper, the authors disclose their startling discovery that very significant amounts of ^3He can be obtained by mining the lunar surface. This source of ^3He has occurred as the result of deposition due to continual bombardment of the surface by the solar wind. The authors estimate that the ^3He obtainable in this manner would provide $\sim 10^7$ GW(electric)·yr of electrical power from D- ^3He fusion reactors. Further, their calculations indicate that even when the energy required to recover the ^3He is accounted for, an energy payback ratio >200 could be achieved. Assuming that these results stand the test of time, this discovery will be extremely important to the development of fusion power.

The use of alternate (nontritium) fusion fuels has always been an ultimate goal for fusion power in order to reduce problems associated with tritium handling, neutron damage to materials, and neutron-induced radioactivity. Further, increased plant efficiencies become accessible by use of direct energy conversion techniques to capitalize on the increased charged-particle fraction obtained in the fusion process. Unfortunately the ideal fuel for this task, p- ^{11}B appears to be too difficult, if not impossible, to ignite using presently known confinement techniques. D- ^3He has always been a close second in desirability but the problem has been to find an appropriate source for ^3He .

The use of alternate (nontritium) fusion fuels has always been an ultimate goal for fusion power in order to reduce problems associated with tritium handling, neutron damage to materials, and neutron-induced radioactivity. Further, increased plant efficiencies become accessible by use of direct energy conversion techniques to capitalize on the increased charged-particle fraction obtained in the fusion process. Unfortunately the ideal fuel for this task, p- ^{11}B appears to be too difficult, if not impossible, to ignite using presently known confinement techniques. D- ^3He has always been a close second in desirability but the problem has been to find an appropriate source for ^3He .

Commento del Prof. G. Miley, Professore di Ingegneria Nucleare presso l'Università dell'Illinois, al lavoro proveniente dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Wisconsin sulla scoperta possibilità di estrarre grandi quantità di elio-3 dalla superficie lunare.

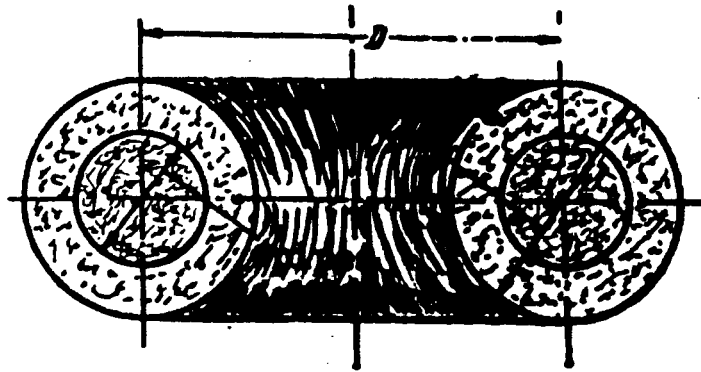
Fig. 7-4a, e Fig. 7-4b

Techniques like breeding ^3He from semicatalyzed deuterium reactors or from tritium decay require a complex system of satellite-generator reactors. The proposal to obtain ^3He from Jupiter or other planets seemed too futuristic. However, the proposal for lunar mining opens up an entirely new avenue. The authors point out that if it is accepted that space scientists will be able to "tap" into the lunar source of ^3He by the turn of the century, this could provide a "bridge" between the use of our present limited sources of ^3He and the "ultimate" source in Jupiter. In this view we could set the goal for fusion as the development of a D- ^3He power economy at the turn of the century. Not only would this have immense implications to terrestrial electrical power production, but it would also have an extremely important impact on fusion power for various applications in space. This picture still faces various possible stumbling blocks; however, the realization that this extremely important fuel— ^3He —is available on our neighbor, the moon, makes rethinking our plans for the development path for fusion power mandatory.

George Miley

$$\begin{array}{l}
 H_0 = 50\,000 \text{ G} \\
 \left. \begin{array}{l} d = 4 \mu \\ \partial = 8 \mu \\ D = 24 \mu \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Volume} = 0.96 \times 10^9 \text{ cm}^3 \\ \text{Area} = 0.96 \times 10^7 \text{ cm}^2 \end{array} \\
 n_0 = 3.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \\
 T_0 = 100 \text{ keV}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l} \text{Release of thermo-} \\ \text{nuclear power} \\ 17.6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3 \text{ sec.} \end{array} \right.$$

$$\beta_0 \approx 1 \quad \beta_{p0} \approx 225 = 6 \times 37.5 \quad \frac{R_0}{a} = 6 \quad (q_a \approx 2.5)$$



$$W = 8.8 \times 10^{13} \text{ erg/sec} = 880,000 \text{ kW} .$$

Parametri di un reattore deuterio-deuterio proposti da Tamm e Sakharov. Per anni questi tipi di reattore furono considerati un sogno lontano poichè mancavano le conoscenze di fisica del plasma per provarne la fattibilità scientifica.

Fig. 7-5

8. Utilità della filiera macchine compatte (Alcator, FT, Ignitor)

La linea di ricerca che ho iniziato in Italia con la macchina FT di Frascati, come estensione del programma Alcator, e con gli studi Ignitor non è a fondo chiuso in termini di utilità per un reattore di potenza (vedi Fig. 8-1). Al contrario essa è diretta a realizzare reattori di tipo Candor che funzionano a deuterio-deuterio e deuterio elio-3 e che sono di tipo compatto. In particolare questi reattori non si prestano alle giuste critiche dell'amico Rubbia riguardanti i grandi Tokamak e derivanti dai loro costi, tempi di realizzazione e svantaggi intrinseci (vedi Fig. 8-2a, 8-2b) nè a quelle, ingiustificate, che le tecnologie relative hanno applicazioni soltanto scientifiche.

Al di là della fase Candor occorre naturalmente progettare macchine che includano sistemi per l'estrazione in forma utile dell'energia prodotta e adeguati schermi per i magneti.

E' da tener presente che i reattori deuterio-deuterio non richiedono la presenza di un "blanket" di litio per la produzione del combustibile come è nel caso dei reattori a deuterio-trizio, ma un più semplice schermo interposto fra la colonna di plasma e il magnete. Inoltre, nel caso dei reattori a deuterio elio-3 è possibile in linea di principio la conversione diretta in energia elettrica dell'energia cinetica delle particelle cariche prodotte.

Come indicato in precedenza, il produrre la maggior parte di energia in forma di neutroni veloci come nel caso della miscela deuterio-trizio comporta l'attivazione e il danneggiamento dei materiali strutturali circostanti e, in più la necessità di dover passare attraverso un ciclo termodinamico (riscaldamento del blanket, scambio di calore, conversione di energia termica in energia elettrica) per poter utilizzare l'energia dei neutroni stessi. Occorre anche considerare il problema del controllo della proliferazione di armi nucleari data la possibilità di produrre materiale fissile pregiato per questo uso con i neutroni veloci prodotti.

La tecnologia dei magneti necessari che devono essere compatti e ad alto campo, è stata in breve tempo portata a livelli molto avanzati in Giappone. Infatti è stata data la prima comunicazione della prima macchina, stile Alcator ma con magneti superconduttori, alla recente conferenza internazionale di Kyoto (vedi Fig. 8-3). Un cippo per celebrare l'evento è in costruzione, e in riconoscimento della funzione di sostenitore che ho svolto per l'inizio e il completamento dell'impresa, questo porterà una mia dedica (vedi Fig. 8-4).

La macchina in questione è stata costruita dalla grande compagnia elettrotecnica Hitachi che oltre ad avere prodotto apparecchiature commerciali a "bassa" tecnologia (come ad es. rasoi elettrici) trova nella fusione una motivazione valida per avanzare lo stato delle tecnologie di suo dominio (vedi Fig. 8-5).

(FROM COPPI, CALLEN, AND FURTH)

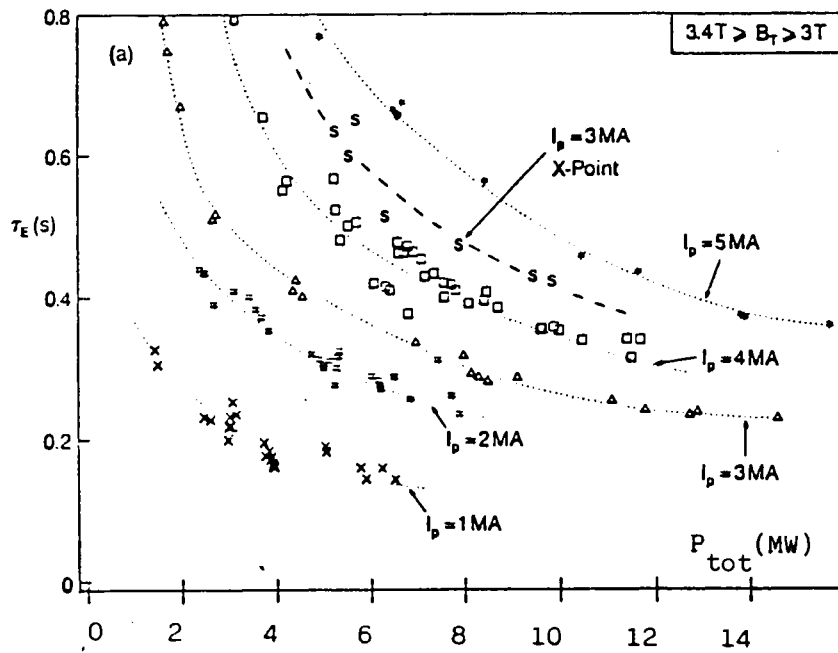
SCALING OF CHARACTERISTIC PARAMETERS

FOR GIVEN aB^2 , FIXED GEOMETRY, MURAKAMI DENSITY,

- COLLISIONALITY $a/\lambda_c = B$
- NO. OF GYORADII $a/\rho_g = B^{-1}$
- OPERATING WINDOW $B_{LIN}/B = B^{-1}$
- INTEGRATED HEAT LOAD IN τ_E : $P_{TOT} \tau_E/a^2 = B$
- RATIO OF $P_{TOT} : P_a : P_{O.H.} : P_{RAD} = \text{CONST.}$

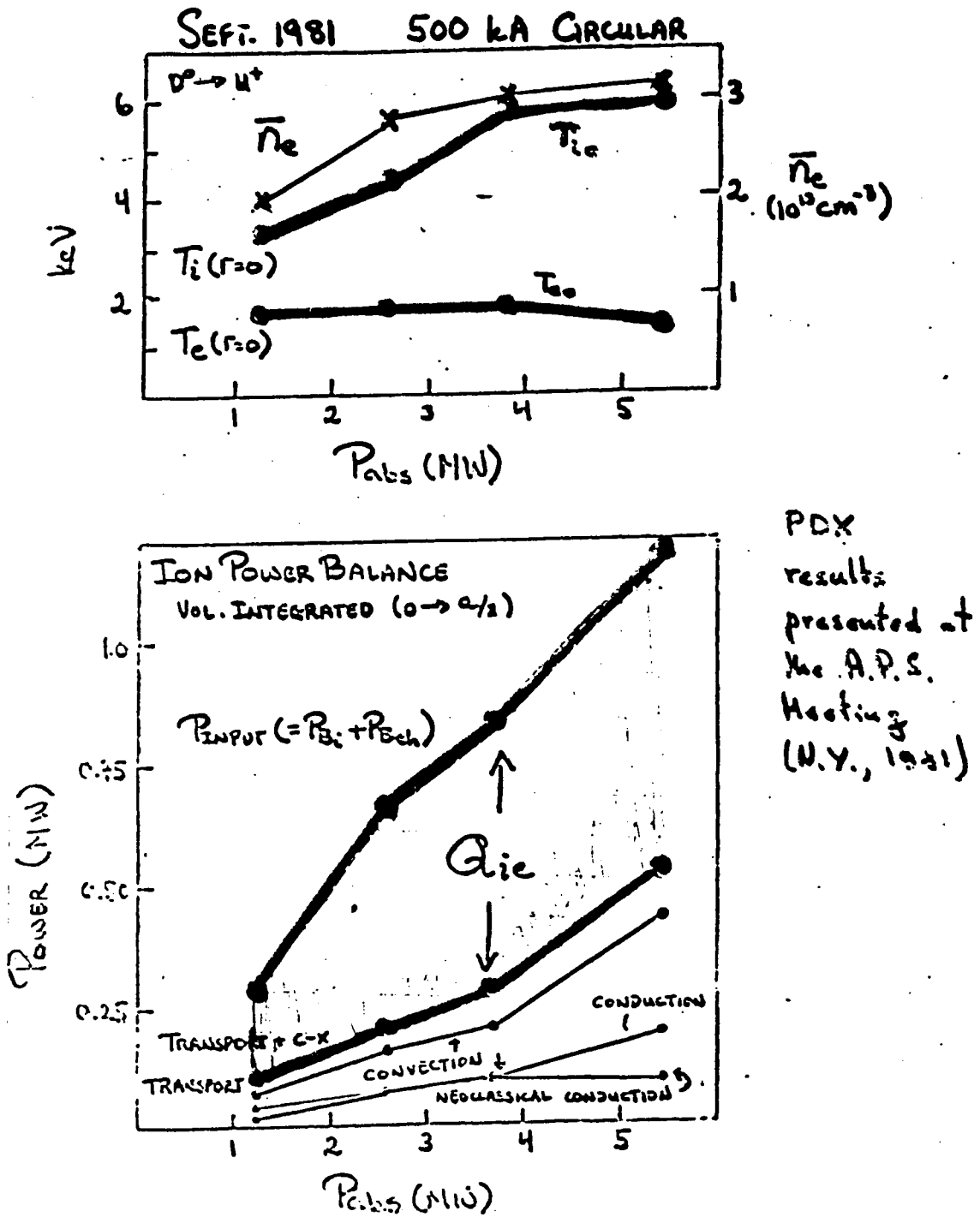
Prova del fatto che un esperimento di tipo Ignitor riproduce i parametri caratteristici di un possibile reattore di potenza.

Fig. 8-1



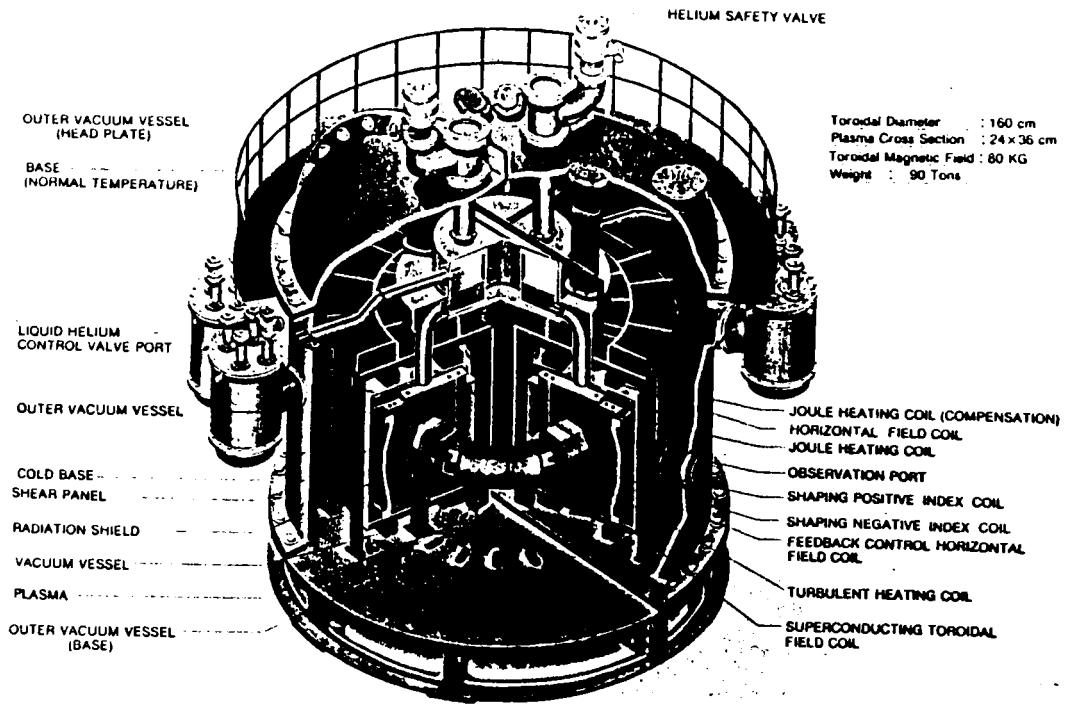
Degradamento del confinamento dell'energia all'aumentare della potenza iniettata nell'esperimento JET (Risultati presentati a Kyoto - novembre 1986).

Fig. 8-2a



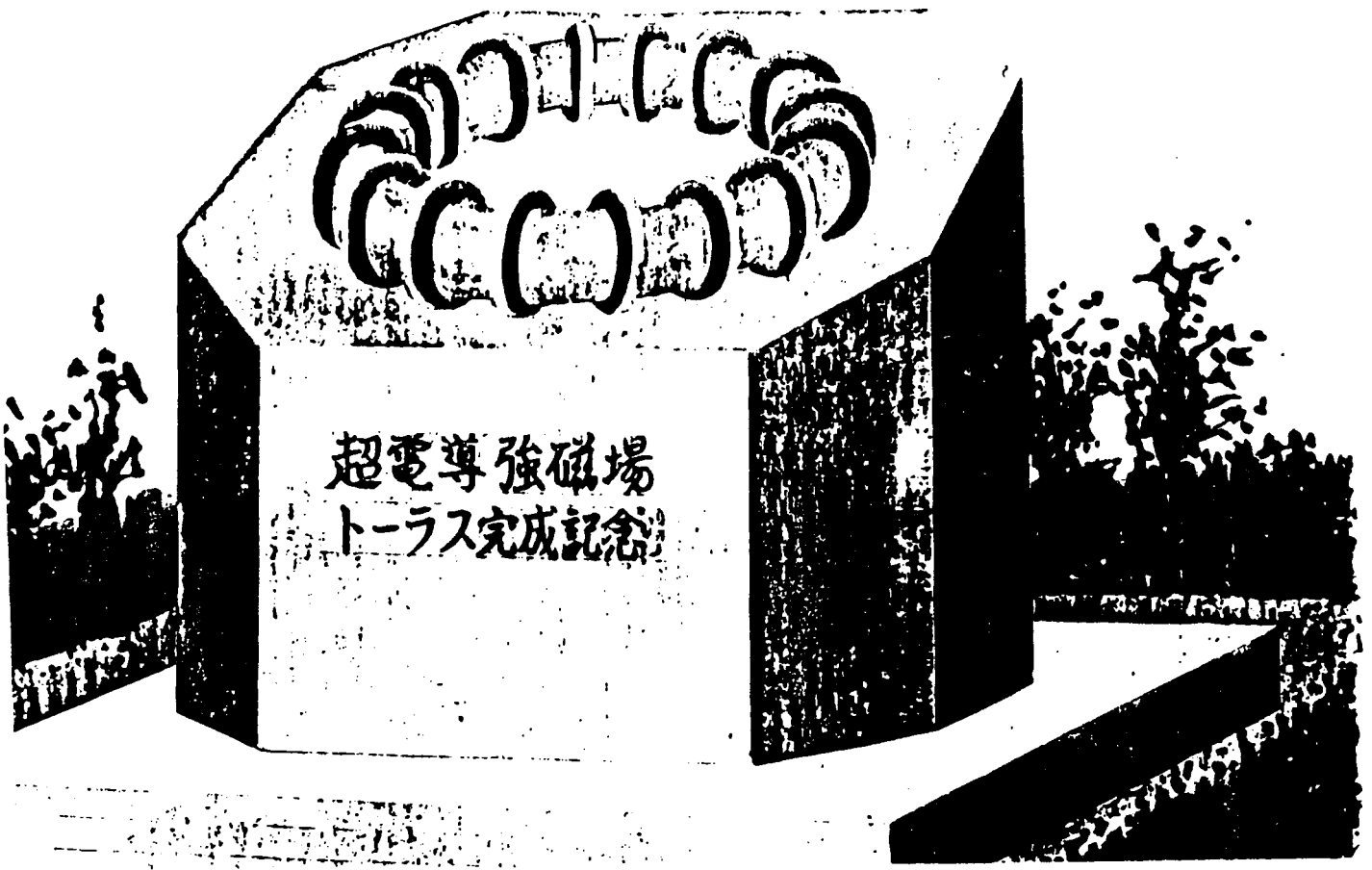
Prime avvisaglie del fatto che con i vigorosi sistemi di riscaldamento esterno richiesti dalle grandi macchine (l'Ignitor si autoriscalda e, se ne avrà bisogno, richiederà un debole sistema di riscaldamento esterno) le proprietà di confinamento degradano.

Fig. 8-2b



Macchina compatta ad alto campo costruita per l' Università di Kyushu dalla grande compagnia elettrotecnica Hitachi.

Fig. 8-3



Schizzo del monumento in costruzione per celebrare la realizzazione della macchina superconduttrice e compatta TRIAM-1M. Come indicato nella dedica dell' autore, questo è un passo molto importante per procedere con la linea dei reattori sperimentali tipo Candor.

Fig. 8-4a, 8-4b, 8-4c

Commemoration of completion of the Superconducting High-Field**TORUS**

Early in the morning, 4th August 1986, superconducting toroidal field coils made of Nb₃Sn, attained 11 T the strongest steady state magnetic field in the world produced for the confinement of high-temperature plasmas.

16th October 1986

Gift by the Kyushu Electric Power Company

Fig. 8-4b

Nb₃Snを用いた超電導トロイダル磁場コイルにより1986年8月4日早晚世界で初めて最大磁場11テスラ-を発生させたことにより超高温700Kの生成に成功した。

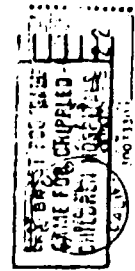
1986年 10月 16日

The first important technological
milestone toward making advanced
fusion reactors a reality of our days.

Pauro Coffi

寄 信

九州電力株式会社



Central Research Lab.
Hitachi Ltd.
Kokubunji, Tokyo 185
JAPAN

Dr. Bruce Cuppi

M.I.T. 26-201

Cambridge, MASS, 02139

USA



Greetings

SEASON'S GREETINGS AND BEST WISHES
FOR THE COMING YEAR

1975

*I congratulate you on your success
of the experiment of Alcator*

Taro Dodo

CENTRAL RESEARCH LABORATORY, HITACHI LTD.
KOKUBUNJI, TOKYO, JAPAN

Prova dell'interesse costante per la filiera Alcator-FT-Ignitor dimostrato dalla grande compagnia giapponese Hitachi, costruttrice della macchina superconduttrice TRIAM-1M che fa parte della stessa filiera.

Fig. 8-5

9. Benefici immediati

Se ben concepiti, gli investimenti in ricerche sulla fusione possono dare benefici a breve termine. Per questo debbono essere orientati non verso la cosiddetta "paper technology" (tecnologia di carta che si esaurisce nella progettazione di grandi e complessi reattori o macchine che, o per mancanza di validità scientifica o per costi impossibili, non saranno mai realizzati), ma verso la realizzazione di macchine, componenti, strumenti teorici di analisi e di calcolo numerico, nuovi metodi sperimentali di misura e diagnostiche delle proprietà dei plasmi, delle varie forme di radiazione da essi emesse, ecc..

L'esperienza passata ha mostrato che non solo la tecnologia dei magneti, i rivelatori dei raggi X, la fisica del vuoto e delle superfici hanno trovato un riscontro industriale a breve termine, ma anche nuove forme di uso dei grandi calcolatori e metodi di calcolo sono stati trasferiti efficacemente ad altri campi. Infatti una caratteristica positiva delle ricerche sulla fusione è di richiedere la cooperazione di discipline e tecnologie che si sono tradizionalmente sviluppate in ordine sparso.

Un aspetto importante da ricordare a questo proposito è che macchine a fusione possono avere altri usi oltre a servire come sorgenti di energia elettrica, per produrre ad esempio grandi quantità di raggi X, di radiazione infrarossa e di particelle cariche di alta energia come indicato in precedenza. Perciò sono state intraviste applicazioni per la chimica, la medicina, nuovi tipi di propulsione spaziale, ecc.

10. Relazioni internazionali

La collaborazione fra Unione Sovietica e Stati Uniti per lo sviluppo dell'energia di fusione proposta nella dichiarazione scritta a conclusione del vertice di Ginevra fra Gorbachev e Reagan (vedi Fig. 10-1 e 10-2) ha stimolato una serie di contatti ed iniziative per coinvolgere gli altri paesi industrializzati in simili forme di collaborazione (vedi Fig. 10-3 e Fig 10-4). A questo proposito ricordo che la progettazione e l'analisi del primo esperimento proposto per arrivare alla combustione da fusione, Ignitor, furono svolte da gruppi italiani ed esiste in Italia la capacità industriale per costruire le macchine relative. Perciò l'Italia ha un'occasione particolarmente favorevole per occupare una posizione di punta nella catena delle collaborazioni proposte. In questo quadro (vedi Fig. 10-5) sono già iniziati i contatti ufficiali per sviluppare un programma comune di prove di materiali e componenti fra il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti e il gruppo Ignitor.

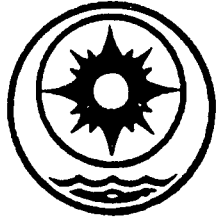
La linea di esperimenti rappresentata dalle macchine Alcator al M.I.T., dal Frascati Torus in Italia e da Ignitor ha costantemente goduto l'appoggio e il riconoscimento degli ambienti scientifici sovietici (vedi Fig. 10-6). Quindi nei contatti avuti dopo il vertice di Ginevra sono state formulate proposte per andare al di là degli scambi regolari ed ufficiali con esponenti dell'Unione Sovietica (uno di tali scambi ospitato da me al M.I.T. il 15, 16, 17 dicembre '86), riguardanti la fisica e la progettazione della macchina per provare l'accensione da fusione (vedi Fig. 10-7 e Fig. 10-8). Una di queste proposte è quella di trasportare una macchina Ignitor costruita in Italia, a Troitsk, dove è stato realizzato un laboratorio adatto per ospitarlo, nel caso la soluzione di situarlo presso il Centro di Ispra richiedesse tempi eccessivamente lunghi.

Un suggerimento che vorrei fare è di iniziare immediatamente una collaborazione con i colleghi giapponesi per lo sviluppo di macchine compatte, con magneti superconduttori ad alto campo e magneti ibridi (superconduttori più conduttori superraffreddati). Queste permetteranno la realizzazione di reattori sperimentali tipo Candor (deuterio elio-3) che minimizzano la produzione di neutroni.

Infatti esiste uno speciale interesse in Giappone per questo tipo di reattori e in più l'industria italiana potrebbe operare in condizioni di parità tecnica.

Un'altra proposta da esplorare è di lavorare insieme con gruppi americani sulla tecnologia dei laser a elettroni liberi, già citata giustamente dall'amico Rubbia. Questa tecnologia si adatta in modo ideale alla fisica dei plasmi prodotti da macchine di tipo Ignitor o Candor poiché può permettere di raggiungere le necessarie condizioni di accensione a temperature più basse e densità più elevate (il che corrisponde a regimi fisici più favorevoli e prevedibili teoricamente) di quelle considerate finora.

EXECUTIVE NEWSLETTER

**FUSION P**

2 PROFESSIONAL DRIVE.

REAGAN WANTS FUSION REACTOR

A U.S. State Department source involved in followup planning to the November Reagan-Gorbachev Summit Meeting has quoted the President as saying "I want to build a fusion reactor." This comment resulted as officials sought clarification of what the President and Mr. Gorbachev had in mind in the final paragraph of their summit joint statement which read:

"The two leaders emphasized the potential importance of the work aimed at utilizing controlled thermonuclear fusion for peaceful purposes and, in this connection, advocated the widest practicable development of international cooperation in obtaining this source of energy, which is essentially inexhaustible, for the benefit of all mankind."

Fig. 10-1b

problems of regional cooperation, of paying current costs, and of organizational effectiveness could come into play.

The skeptics are in a minority. The program has already been able to stop spraying in Burkina Faso and expects to gain experience there that will allow a successful transition to a maintenance program throughout the region.

Now that achievement of the public health goals of the OCP seem reasonably assured, the question of the future of the organization is coming to the fore. Alisbah notes that one suggestion is to "take the expertise and apply it to the next disease." Another school of thought sees a role for the organization in spurring the economic development that was originally regarded as a corollary of the program.

A number of bilateral aid projects, mostly for agricultural development, have, in fact, been funded for resettled land, but no comprehensive data on the socioeconomic ef-

fects of the program are available. In Burkina Faso, which had a larger percentage of land affected by oncho than any other OCP country, some 240,000 hectares were reported to have been recouped by last year. Some successes have been reported with cultivation of export crops, but efforts to obtain increased yields with food crops for domestic use have so far been disappointing.

There is increasing awareness that "development hasn't worked as well as the [OCP] program," says Stockard. And at recent meetings of the Joint Advisory Committee the question has been raised. "Shouldn't the Joint Program Committee play more of a role? Are they prepared to alter the mandate, expand it to cover economic development?"

Alisbah, director of West Africa Country Programs for the World Bank, acknowledges that "Now that [the OCP] is succeeding, there is donor pressure for economic follow-up." He says the bank plans to focus a major effort on the OCP region next year

"to explore the proper economic follow-up." The aim is "to determine whether there is an effective role for an international group or it is best left to bilateral action."

If consensus is lacking on the future of the organization, there is no serious question of its having improved the lives of millions of people at risk. A point that should not be forgotten is that the oncho project was a gamble. Those present at the creation recall that, despite initial confidence in the technology, there were many uncertainties. A World Bank official remembers that there were even doubts about "whether the valleys were really so green. What other diseases kept people out of the valleys? There was not a terrific database. In the absence of convincing scientific evidence, they went by the passions of Africans speaking of the effects of the disease." He says "it was a matter of emotion." For anyone who travels to a village like Nayé, it still is. ■

JOHN WALSH

Soviet-U.S. Fusion Pact Divides Administration

Afraid the Soviet military will benefit from a world ignition machine, DOD wants Reagan to drop his summit pledge

SIX weeks before the Reagan-Gorbachev summit in Geneva last fall, Soviet Foreign Minister Eduard Shevardnadze met with Secretary of State George Shultz in New York. The Soviet official wanted to put nuclear fusion research on the agenda for the November summit talks. Shultz, a former executive of Boctrel Group, Inc., an engineering and energy technology company, took the proposal to President Reagan. A few weeks later Shultz told Kremlin officials in Moscow that Reagan was willing to explore broadening ongoing work with the Soviets related to developing a fusion power reactor.

By the end of the 3-day summit, Reagan and Soviet General Secretary Mikhail Gorbachev were calling for the "widest practicable development of international cooperation" in magnetic confinement fusion. Negotiators at Geneva were not able to agree on a specific mission. Nevertheless, the statement issued by the two leaders has been interpreted by the Soviet and U.S. fusion

communities to mean multilateral construction of a major new device—the so-called Energy Test Reactor (ETR).

But 5 months after the summit, the idea of the United States constructing a new test reactor with the Soviets is in trouble. The merits of the Gorbachev-Reagan communique on fusion are heatedly being debated within White House agencies, as well as the Defense, Energy, and State departments. Budgetary impacts, but especially concerns about transferring technology to the Communist Bloc, are fueling a campaign in parts of the Administration to kill or sharply curtail any new fusion project that includes the Soviets.

Seen as the key to reenergizing waning fusion programs in the United States and Soviet Union, this reactor is needed to reach the next frontier in magnetic confinement fusion: the study of burning plasma and the testing of materials eventually to be used in a commercial power reactor. Fusion energy derived by the combination of hydrogen

atoms to produce helium has been heralded as potentially providing a limitless supply of energy that is safer and environmentally more acceptable than fission technology.

The challenge facing fusion researchers has been to produce within the confines of a magnetic field a hydrogen plasma with sufficient density and temperature to ignite and burn. Steady progress toward this goal has been made over the past decade, but the cost of major experiments also has increased. The next experiment could cost as much as \$4 billion, a burden that neither the United States nor the Soviet governments appear willing to shoulder alone. With the participation of Europe and Japan, though, the cost would fall to about \$1 billion per country.

The Soviet Union's Chernobyl power plant disaster, however, may have provided Administration nayayers with a graceful way for the United States to back away from working with the Soviets on an international ignition experiment. According to Stephen Bryen, DOD's deputy under secretary for arms security policy, Defense Secretary Casper Weinberger will shortly propose to Reagan that the United States substitute an international collaboration on fusion power plant safety in place of cooperating with the Soviets in a multilateral fusion experiment.

The Department of Defense is not opposed to the United States jointly building a new test reactor with the Japanese and Europeans. But the department strongly op-

nell'economia

Domenica 9 giugno 1985

Opec crisi falda

rain, 8 giugno
versa in una
-disperata-
estione dei
schia la disim-
sotto i colpi
interno e dal
el cartello pe-
l drammatico
disegnato in
di prima per-
so su un quo-
l Bahrain. «Al
stiene che al-
si dell'Opec
ondando il
una produ-
eriere alle
ciali e sabo-
sistema del
c con sconti
fino a 4 dolla-

intanto il Cip
nuovi prezzi
prodotti pe-
ritocchi com-
a serie di ri-
riguardano
to (da 723 a
litro), gasolio
a 519 a 511),
ica (da 476 a
olio agricolo
100), petrolio
166 a 459).

117 miliardi tri per la Sme

zioni
ver-
17,8
lalla

mi-
n a-
i 48
li in
ver-
nati
sai
pri-
o. Il
en-

o di
ura

suo piano di sviluppo», come afferma il comunicato conclusivo della riunione del consiglio. Negli ambienti del gruppo si fa notare che «sviluppo» non significa necessariamente acquisizione di nuove aziende, ma «una sistemazione definitiva dell'assetto proprietario della Buitoni».

Per quel che riguarda la Sme, Prodi incontrerà lunedì i vertici della Lega delle cooperative e poi i rappresentanti della Cofima (imprenditori napoletani); martedì è previsto un nuovo incontro con gli esponenti della cordata Ferrero-Barilla-Fininvest. Quindi la decisione entro il 18 giugno, cioè nel termine di scadenza che il governo aveva stabilito dopo la riunione del Ci-

Sta per sfuggire all'Enea la macchina di Bruno Coppi

Fusione nucleare, l'«Ignitor» rischia di emigrare in Canada

A disposizione del professore un reattore nel Quebec

Il «progetto Ignitor» non è il titolo di un film di fantascienza ma riguarda una macchina per realizzare la fusione nucleare. In estrema sintesi e scusandoci con i veri esperti, ricordiamo al lettore che la fusione nucleare (quella su cui è basata la bomba atomica e le centrali elettronucleari) produce un'enorme quantità di energia «speccando» l'atomo; la fusione (su cui si basa la bomba all'idrogeno) ne libera una quantità ancora più grande fondendo l'atomo. Tanto per capirci, quando saremo capaci di controllare la fusione come siamo già arrivati a controllare la fissione nucleare avremo energia praticamente illimitata ed a costi estremamente bassi. C'è chi afferma che sarà la verità dell'oro per l'umanità; se prima di arrivarci non farà saltare tutto con usi im-

propri, appunto, della fusione.

Ancora in massima sintesi, controllare il processo di fusione nucleare è estremamente complesso per le altissime pressioni e temperature in gioco. Si progredisce, per arrivarci, con lentezza.

Ciò premesso, torniamo al progetto Ignitor. La macchina è stata ideata da un altro di questi italiani che con la fisica al più alto livello sembrano capaci di ottenere risultati incredibili. Si tratta di Bruno Coppi, professore alla scuola Normale di Pisa ed al Massachusetts Institute of Technology (Mit), una delle più importanti università degli Stati Uniti.

La macchina si basa sullo stesso principio della «Accator», già realizzata appunto presso il Mit. Sembra che le perplessità sulla realizzazione del progetto Ignitor siano estremamente ridotte, dopo una serie di studi fatti in proposito. Il Cipe ha impegnato l'Enea con una sua delibera dell'1 marzo scorso a completare entro sei mesi gli studi sulla fattibilità della macchina e ha chiesto un rapporto preliminare da preparare entro il 30 maggio scorso. Non ci risulta che questa parte della delibera sia stata completata.

I costi per la realizzazione della macchina sono stati calcolati nel 1983, quindi sono per difetto. Allora i tecnici di Ipra il centro per gli studi nucleari sul lago Maggiore che da tempo è estremamente sottoutilizzato nonostante conti più di 1500 addetti) calcolarono un investimento di 60 milioni di Ecu (l'unità di conto europea che vale circa 1300 lire) cioè un'ottantina di miliardi di lire per realizzare l'igni-

gora allora i 90 milioni di Ecu, cioè circa 120 miliardi, se Ignitor fosse stato installato altrove.

Fin qui i precedenti: veniamo all'oggi. I canadesi sono estremamente interessati all'«Ignitor». E' probabile, anzi quasi certo, che la realizzazione della macchina voglia dire un passo avanti verso la fusione nucleare anche se non può portare a soluzioni tutti i problemi. Ma è altrettanto certo che la posta in gioco è così grande da valere investimenti ben più rilevanti di quelli previsti. La fusione nucleare, lo abbiamo detto, sarà il tocco di Midas, trasformerà in oro molte cose: chi primo arriva ha enormi vantaggi. Senza contare l'effetto trainante per l'industria elettromeccanica che la realizzazione di questo progetto comporta per il Paese che l'adotta.

Ebbene i canadesi stiano offrendo, o hanno già offerto, a Bruno Coppi la possibilità di realizzare l'«Ignitor», mettendogli a disposizione un vecchio reattore nucleare installato nel Quebec, in località Trois rivières.

Non siamo in grado di dire del resto nostro come giudicare la fattibilità e validità del progetto «Ignitor». Siamo però pentiti in questo da due fatti: il sei da tempo come vanno qu decisioni in Italia, dov tendere a perdere l'autorità per estinguersi i ca, a esse fatta. D'altro can invece folgorare e fu del canadese di fa per che il progetto sia quell dicono molti esperti, cic deciso passo in avanti strada da percorrere per rivivere alla italiana.

Marco Mar

Alitalia

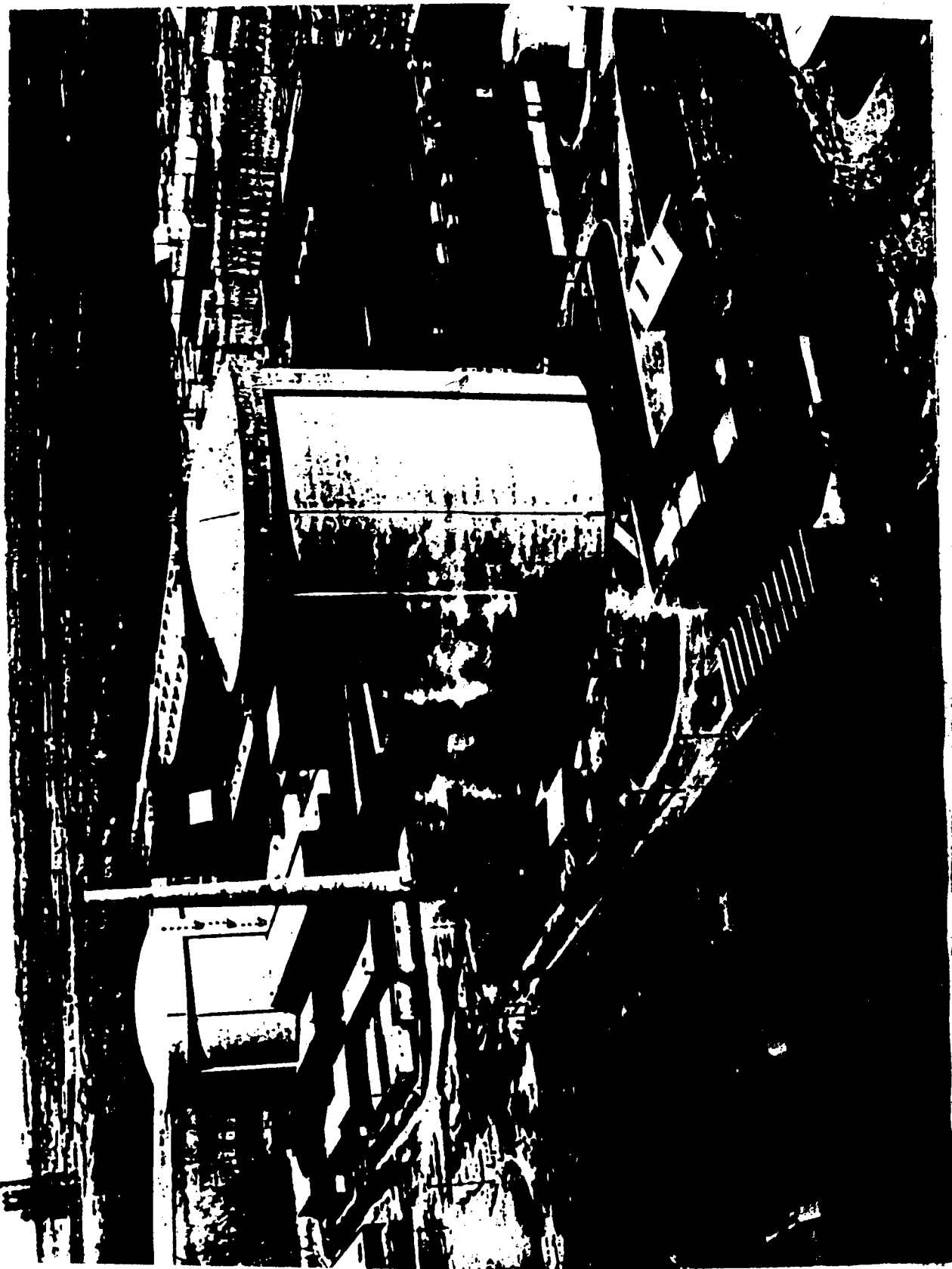
Linee Aeree Italiane S.p.A.
Sede Legale Roma - Palazzo Alt.
Piazzale Guido Pastore
Tiro di Roma - Reg. Soc. n. 2021
C.C.I.A.A. Roma n. 135156
Cap. Soc. Lit. 200.000.000.000 int.

**AUMENTO DEL CAPITALE SOCIALE
DA LIT. 200.000.000.000 A LIT. 421.200.000.000
OFFERTA DEI DIRITTI DI OPZIONE NON ESERCITATI**

Con riferimento ai diritti di opzione non esercitati nei limiti previsti dal programma di emissione, relativi all'aumento del Capitale Sociale da Lit. 200.000.000.000 a Lit. 421.200.000.000 deliberato dall'Assemblea Straordinaria del 25 febbraio 1985, si informa che, a seguito della verifica della consistenza dei diritti incassati anticipatamente alcune Casse incaricate che stanno effettuando ultime verifiche e controlli l'offerta prevista presso le Borse Valori di Roma nelle sedute del 10 al 14 giugno p.v. è rinviata a detti termini.

ALITALIA
Linee Aeree Italiane S

Fig. 10-3 Interesse Canadese per il programma Ignitor



Sito di Gentilly, presso Trois Rivières
considerato per Ignitor.



Department of Energy
Washington, DC 20545

Agosto 1986

Dr. Sergio Gagliardi
IGNITOR Project Director, ENEA
Via G. Coppola Di Masitani, 14
00139 Roma, Italy

Dear Dr. Gagliardi:

I was pleased to hear that ENEA has decided to fund R&D in support of the IGNITOR proposal. I understand this work will be initiated soon, and I would like to coordinate with the IGNITOR team on the specific R&D tasks which will be accomplished.

A U.S. design team, led by PPPL, has recently completed the conceptual design of a Compact Ignition Tokamak (CIT). Two copies of the CIT Conceptual Design Report are enclosed for your information along with copies of the CIT R&D plan and the CIT Diagnostics plan. We are now in the process of developing detailed implementation plans for CIT R&D in FY 1987 (beginning October 1986) and would be happy to share our plans with the IGNITOR design team. To the extent possible, I would like to avoid duplicating R&D tasks.

Please advise if I could visit, along with one or two key members of the CIT design team to discuss our mutual R&D preparations in support of the CIT and IGNITOR ignition device planning.

Sincerely,

Thomas R. James
CIT Project Director
Division of Confinement Systems
Office of Fusion Energy
Office of Energy Research

Enclosure

cc:
B. Coppi, MIT
L. Lanzavecchia, BBC
S. Noe, ENEA

Una delle (tante!) proposte di collaborazione ripetutamente offerte negli Stati Uniti.

Fig. 10-5

: TO
 Thermonuclear Energy
 by Z. Melnikova
 Novosti Press Agency Publishing
 House, Moscow, 1982

Recognition

Shortly after the Novosibirsk conference Academician Artsimovich made a lecture tour of the United States. The Princeton scientific community listened to him with polite attention, and one felt that their scepticism had been shaken but not completely overcome. Theoretician Bruno Coppi was the first to go over to designing a TOKAMAK-like installation with a maximally strong magnetic field which he called the Alcator.

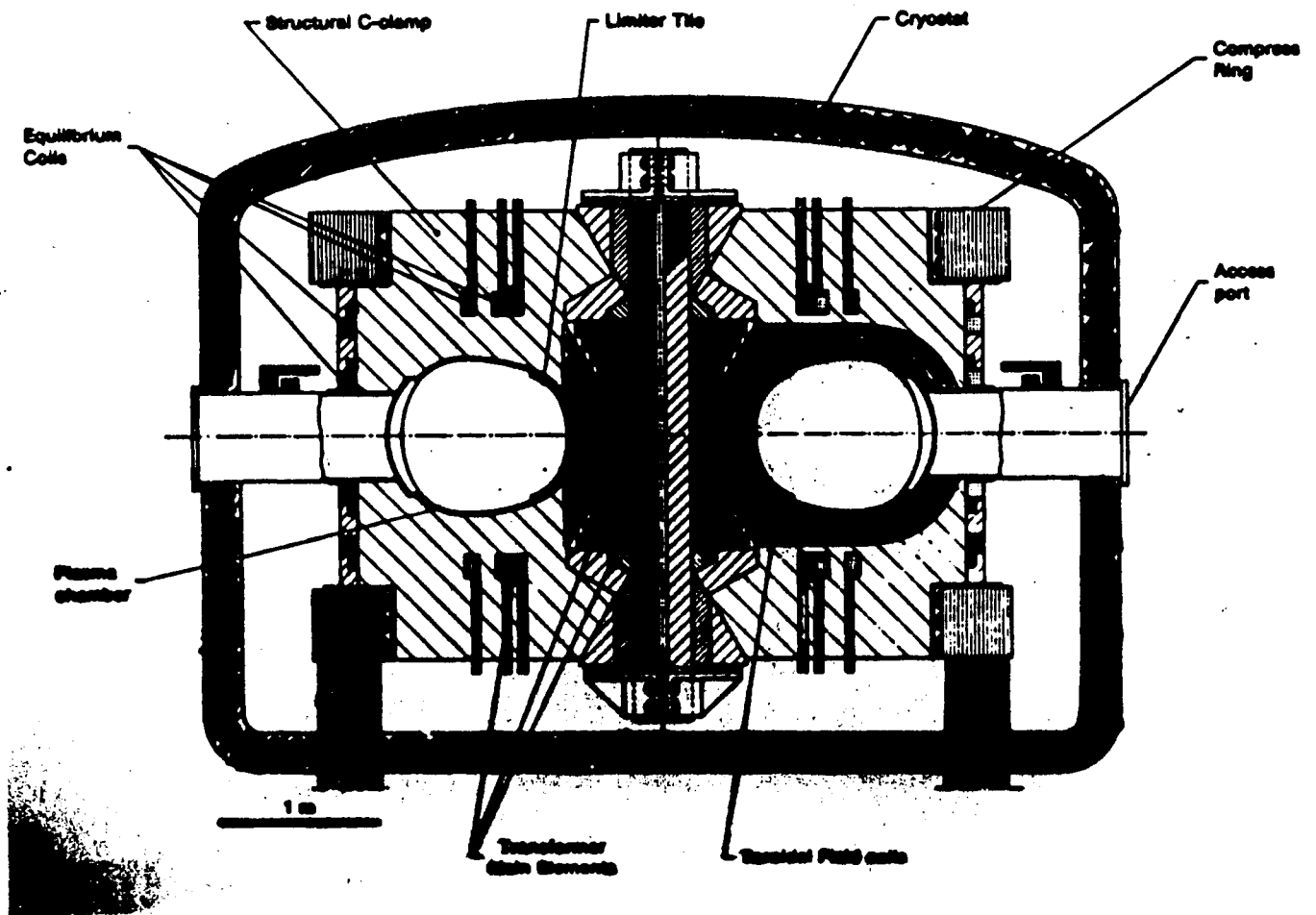
Bruno Coppi presented his project at the regular symposium on plasma physics held in Dubna (USSR) in 1969.

The Soviet newspaper *Pravda* wrote about the Dubna conference:

"A fundamental turning point has been reached in research on controlled thermonuclear reaction. Such is the unanimous opinion of scientists from many countries attending the conference on plasma physics which completed its work in Dubna today. All the conference participants agree that the focus of attention were the reports on the outstanding success of Soviet scientists, working under the guidance of Academician Artsimovich. A plasma with a temperature of several million degrees has been obtained, and the plasmod does not break up immediately, as was the case until recently, but is sustained for some time in installations called TOKAMAKs. They may be the first laboratory prototype of powerful thermonuclear stations of the future, which will pour new power for peaceful purposes into mankind's energy treasures."

That moment marked the international recognition of the TOKAMAKs. American thermonuclear physicists very quickly reconstructed their stellarator into a TOKAMAK. Later it was recalled at Princeton how Soviet physicists had walked around the stellarator and teased them in a good-natured way: "Throw out the unnecessary pieces of pipes, and you'll get an excellent TOKAMAK." The Americans laughed

Riconoscimento sovietico del fatto che l'autore fu il primo a progettare una macchina ad alto campo per andare oltre i risultati del programma sovietico Tokamak, fino a quel tempo visto con scetticismo in occidente.



Macchina Ignitor nella soluzione adottata precedentemente ai lavori del Panel Adams e tuttora seguita nell'Unione Sovietica.

Fig. 10-7

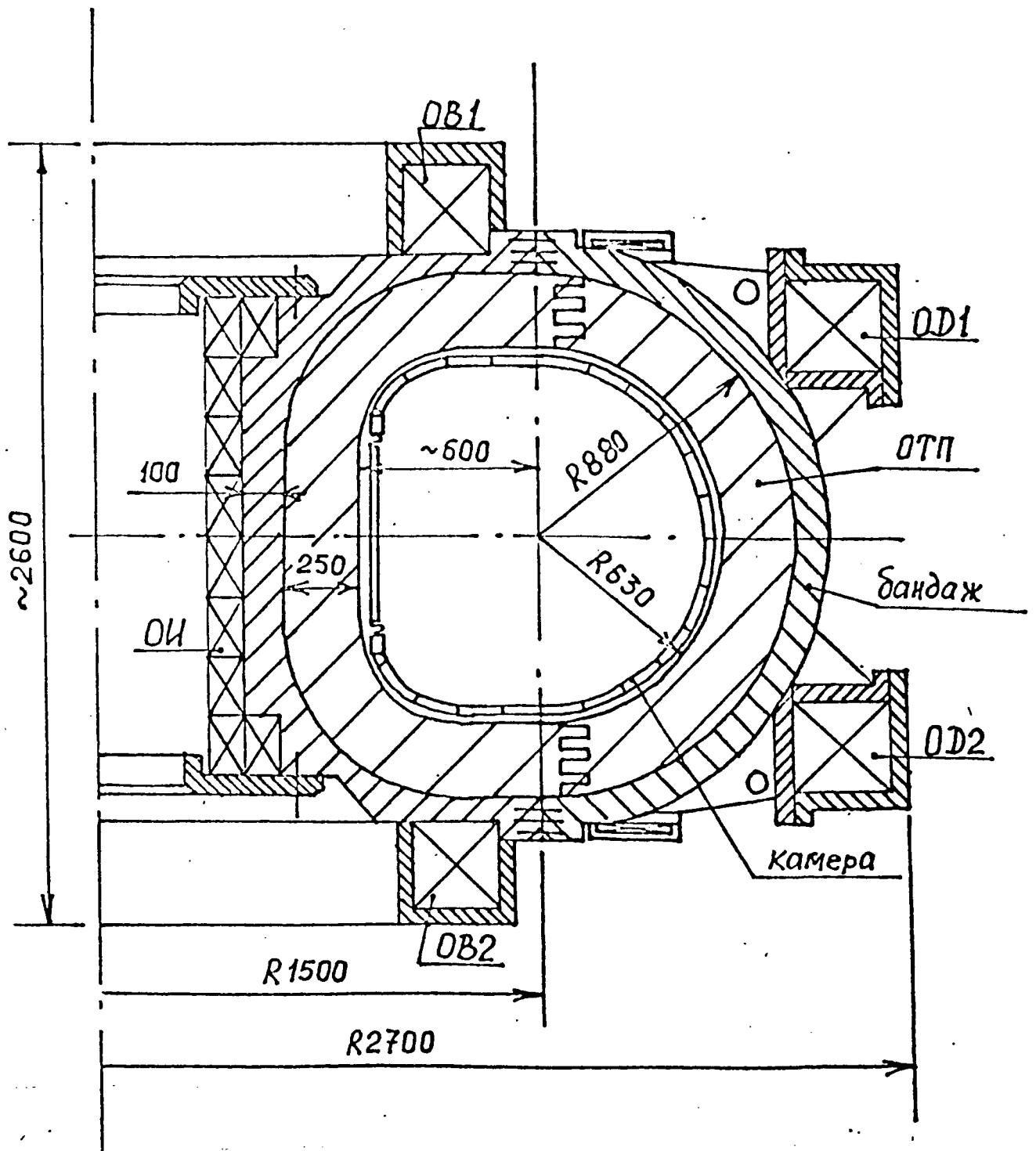


Рис. 3

Disegno schematico dell'Ignitor sovietico di seconda generazione. La prima macchina sovietica dello stesso tipo è in via di costruzione e sarà situata nel laboratorio di Troitsk appositamente costruito.

Fig. 10-8

11. Risorse umane.

Nelle università, nei laboratori italiani e all'estero esistono preziose risorse umane che possono essere recuperate. Molte persone infatti desiderano collaborare su di un programma veloce e con un chiaro obiettivo scientifico. Il fatto che l'amico Carlo Rubbia si sia dichiarato disposto ad imbarcarsi in questa avventura è un'occasione da non perdere.

In Italia è rimasta una grande tradizione di matematica che va utilizzata data la necessità che abbiamo di analizzare sistemi complessi a molte particelle quali sono i plami in condizione di bruciare per reazione di fusione.

12. Necessaria pluralità di enti e istituzioni interessate.

Lo sviluppo dei reattori a fusione richiede il mettere insieme una vasta gamma di conoscenze, di discipline, e, perciò di istituzioni.

Propongo pertanto che, seguendo il modello felice del Giappone, il Ministero della Pubblica Istruzione assuma un ruolo attivo in questo campo, il CNR riprenda le responsabilità che aveva in passato, l' INFN includa i problemi di base della ricerca sulla fusione nel raggio dei suoi interessi tecnici e scientifici, l' IRI e l' ENI mettano a disposizione le loro risorse, e la grande industria privata vi partecipi in modo efficace.

Fermo restando il coinvolgimento tecnologico e, in particolare, finanziario della grande industria è opportuno tenere presente che la struttura artigianale esistente in Italia, con la eccellente tradizione di ingegneria meccanica ed elettrotecnica che ha conservata, è particolarmente adatta a realizzare una linea di ricerca veloce e snella sui tipi più interessanti di reattori a fusione.

L'esperienza degli Stati Uniti ha infatti dimostrato come l'industria minima sia unica e insostituibile per agilità e dinamica nello sviluppo di nuove e avanzate tecnologie, come dimostrato dall'incredibile gamma di calcolatori prodotti, dal contributo dato alle ricerche spaziali, etc. La prodigiosa rinascita economica dell'area di Boston e la fioritura della Silicon Valley vicino a San Francisco sono la prova più evidente della validità di questo tipo di struttura sociale e produttiva.

13. Conclusioni.

Concludendo ritengo che, in base alle considerazioni presentate, la comunità italiana dovrebbe:

stabilire degli standard minimi di conoscenza tecnica specifica (come è pratica comune in campi tradizionali quali medicina, edilizia, etc.) nell'affidare la responsabilità di dirigere enti o di consigliare organi di governo, in nuove aree della tecnologia e della scienza riguardanti delicati e complessi problemi (quali le sorgenti di energia, l'esplorazione e l'utilizzazione dello spazio, e la difesa) al fine di evitare gravi errori di prospettiva.

fare tesoro delle eccellenti risorse umane e industriali che possiede e dare una svolta decisamente scientifica agli indirizzi da prendere nella ricerca sulla fusione, abbandonando politiche di rallentamento ed evitando di estraniarsi dalle attuali correnti di pensiero della comunità scientifica internazionale e dai rapporti con i membri attivi di essa.

proporsi seriamente l'obiettivo di arrivare, con piccoli ma veloci passi, a provare la fattibilità scientifica dei più attraenti tipi di reattori a fusione.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia in particolare: il Dr. J. Ahearne, per un fruttuoso scambio di idee e la sua costante amicizia, il Dr. S. Bodner per avergli fatto avere in tempo una bozza del suo lavoro di sunto sulla fusione inerziale e la signora K. Hall per la sua costruttiva revisione e battitura a macchina del manoscritto.

Riferimenti

- [1] B. Coppi, "Vento Solare e Fisica dell'Eliosfera" in Supplemento 1986 all'Enciclopedia Italiana del Novecento.
- [2] B. Coppi, A. Ferreira, J. Mark, and J. Ramos, "Ideal MHD Stability of Finite- β Plasmas" M.I.T. Report PRR-78/24 (Cambridge, MA. July 1978), pubblicato su Nuclear Fusion, 19:6 (1979) p.715.

Appendice A - Minimi requisiti di una indagine conoscitiva

Per rispondere al suo mandato, un'indagine conoscitiva deve poter consultare una percentuale adeguata di persone con esperienza di lavoro scientifico diretta. Criteri minimi di conoscenza dovrebbero essere stabiliti.

Prof. H. ALFVÉN

Premio Nobel (Fisica del Plasma)

Royal Institute of Technology
Stoccolma (Svezia)

Università di California (San Diego)

Tel. casa (619) 576-5480 San Diego

ufficio (619) 454-1378

casa (46) (8) 756-4784 (Svezia)

Un indirizzo utile:
H. Alfvén

Fig. A-1

**XII COMMISSIONE PERMANENTE DELL'INDUSTRIA, COMMERCIO, ARTIGIANATO
E COMMERCIO ESTERO**

DICHIARAZIONE DI CARLO RUBBIA SULLA FUSIONE NUCLEARE

Onorevoli rappresentanti del Parlamento:

vorrei brevemente riassumere il mio punto di vista personale sul soggetto della Fusione Nucleare e sulle sue implicazioni al problema energetico in generale e del Nostro Paese in particolare. Vorrei anzitutto sottolineare—nonostante che tanto l'energia, una ben nota grandezza fisica, e che la fisica nucleare facciano parte delle mie competenze— non sono e neppure pretendo di essere un esperto nel campo della tecnologia della fusione. Vorrei cogliere questa occasione per sottolineare anche che oggi il problema dell'energia è troppo importante per essere lasciato interamente alle mani degli esperti.

Vorrei in questa occasione citare alcuni dei punti di una mia lettera datata il 22 Maggio 1986 al presidente Craxi:

".....Il programma nucleare già realizzato o in via di realizzazione non potrà più nel suo insieme essere rimesso in questione dall'incidente di Chernobyl. Non è infatti possibile cancellare istantaneamente, come con un colpo di bacchetta magica — anche assumendone l'opportunità — una sorgente energetica che rappresenta oramai una parte così importante dell'approvvigionamento energetico di molti paesi.

PROF. F. PEGORARO
SCUOLA NORMALE SUPERIORE
PIAZZA CAVALIERI, 7 PISA
TEL. (050) 597-265

IL PROF. PEGORARO INSEGNA, FRA L' ALTRO, UN CORSO ELEMENTARE
DI FISICA DEL PLASMA IN RELAZIONE AL PROBLEMA DEI REATTORI
A FUSIONE.

Secondo indirizzo utile:
F. Pegoraro

Fig. A-3

Appendice B - Programma Statunitense

Riorientamento in grande scale del programma americano verso la linea veloce di esperimenti rappresentati dalla filiera Alcator--Frascati Torus--Ignitor.

Questo iniziò nel Luglio '84 dopo la mia presentazione al meeting di Princeton. Infatti a quel tempo era diventato chiaro che l'ENEA non nutriva alcuna seria intenzione di dare seguito alle raccomandazioni del Panel Adams.

BUDGET CUTS

The cuts, relative to the president's request level of \$483 million have been tentatively distributed as follows:

- \$15M - delay of MFTF project by one year.
- \$13M - reduction in technology programs including nuclear technologies, materials and design studies of future devices.
- \$12M - reduction in Confinement Systems experimental research programs, primarily EBT, PLT and plans for tritium breakeven experiments in TFTR.
- \$ 3M - reduction in Applied Plasma Physics program.
- \$ 3M - reduction in FMIT materials research project.

The cuts and how they are being taken are expected to make it even more difficult for industry to assist the fusion program. Historically university programs have been protected and laboratories have performed more work in-house when budgets were reduced.

OSTP OFFICIAL SUGGESTS FUSION GOALS

Speaking to fusion personnel gathered for the MFAC meeting at Princeton July 18, Ralph M. DeVries, Assistant Director for General Science, OSTP, suggested the following goal statement for the fusion program:

"A well-balanced program that combines the scientific richness and inherent relevance of plasma physics, and the production of well-qualified talent, with the prospect of achieving a unique energy resource in the future."

DeVries expressed his view that in order to maintain a high priority in difficult financial times the fusion program must give more emphasis to "the excellence of the basic research, the talent it produces, as well as its progress toward a future energy option."

Reading from the DOE FY 1985 budget submission document, DeVries noted that only the Applied Plasma Physics portion of the program was described in a way that makes the program sound like good science. "This effort clearly expands our understanding of basic plasma physics and produces important talent. Those objectives are clearly aligned with administration policy," DeVries

said. Of the Confinement Systems, Development and Technology, and Planning and Projects divisions' program descriptions, DeVries said that it sounds like these programs aim "explicitly toward the definition, construction and operation of large reactor-like machines." DeVries appeared either to not understand or to not believe that the larger experiments were designed in the minimum size necessary to advance the understanding of the physics of fusion plasmas. This led one member of MFAC to ask whether he was saying that we had a "packaging" problem or a "substantive" problem. DeVries' response was that he thought we had a little of both. Copies of DeVries' speech are available from Fusion Power Associates.

TFTR: NOT LIKELY NOW

Prospects for proceeding with the Tokamak Fusion Core Experiment (TFTR) have dimmed dramatically, partly as a result of the FY 1985 budget cut and partly because of the executive branch attitude on large fusion experiments.

In addition, the four TFTR design options presented at Princeton were judged by MFAC to represent too narrow of a choice range. Specifically, MFAC has asked the community to develop two other options: "(1) copper-coil design that is optimized for minimum cost, while meeting the basic scientific objectives and (2) a superconducting coil design that is optimized for the highest possible scientific and technological relevance and upgradability."

COPLI PROPOSES SMALL IGNITION EXPERIMENT

A highlight of the MFAC meeting was a presentation by Bruce Coppi of MIT on the "IGNITOR". Coppi described the device as low cost, near-term facility "to study the alpha-particle heating of high density plasma." The tokamak would be based upon combination of ohmic and adiabatic compression heating to reach fusion conditions. The facility has been under design by Ston and Webster Corp. and Brown-Boveri Corp. and has been proposed to the European Economic Community (EEC). Coppi estimates the cost of the device to be about \$40 million exclusive of conventional facilities and power supplies. Such auxiliary facilities are available in Ispra, in Italy and at the JE site in England, he said.

Partenza di un programma tipo Ignitor negli Stati Uniti, 18 Luglio 1984. Ora tale programma è chiamato C.I.T. (Compact Ignition Torus).

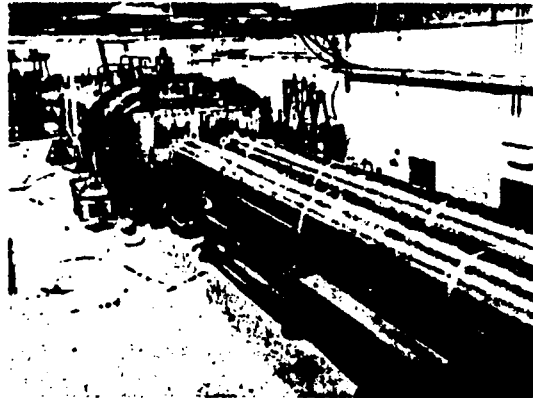
Fig. B-1a, e B-1b

the proposal was reviewed favorably over a year ago by a panel headed by the late John Adams, former director of CERN. The other panel members were Roy Bickerton (JET), Paul Reardon (formerly of TFTR, PPPL), Paul Rebut (JET) and Marshall Rosenbluth (U. of Texas). The report states "The Panel arrived at the conclusion that the physical basis for IGNITOR has been well thought out and that it is at least as good as that which exists for the design of other experiments such as TFTR and JET." The Panel made several suggestions for design changes to increase the probability that the device would reach its performance goals.

In the public discussion following Coppi's presentation, FPA president Steve Dean stated that he thought DOE should establish a senior review panel to review Coppi's ideas and that the panel should report its findings "within 6 weeks, not 6 months." He also stated that if the U.S. was serious about its recent statements on international joint fusion ventures "this project might provide an ideal candidate to get something meaningful and important done in fusion at reasonable cost in a reasonable time." He expressed continued dismay at the U.S. government's lackadaisical plans for the future and its pre-occupation with a seemingly endless series of design iterations and committee studies as a substitute for making decisions, building experiments and getting results. "We are spending over a million dollars a day while this process goes on," Dean said.

KrF LASER ADVANCES AT LANL

Los Alamos National Laboratory has announced the production of 3000 joules of laser energy in an unfocused beam 39 inches in square cross section using krypton-fluoride (KrF). The KrF laser's short wavelength (quarter micron), relatively high efficiency (over 6 percent) and expected capability for pulse repetition make it an interesting candidate for development for fusion applications. Work in progress is aimed at shortening the pulse from its present value of 400 nanoseconds to about 5 nanoseconds via an angular multiplexing system. Plans call for increasing the beam energy toward 10 kilojoules. A new 50 kilojoule system, called Polaris, is in the design stage. About 1 megajoule is believed necessary to ignite a fusion pellet. Louis Rosocha heads the project.



LOS ALAMOS KRYPTON-FLUORIDE LASER

SUPPORTING CONCEPTS PANEL REPORT

An MFAC panel under the chairmanship of Lee Berry presented its report at the Princeton meeting July 18-20. In a letter transmitting the report to DOE Director of Energy Research Al Trivelpiece, MFAC chairman Ron Davidson made the following points:

"1. We agree with the Panel that the supporting concepts activities have made 'large contributions to the physics, technology and reactor conceptualization of the fusion program.' These research activities are making impressive technical progress in their own right, and they also contribute to the tokamak and mirror programs through advances in the basic understanding of plasma confinement properties, and through the development of advanced technologies. We recommend continued strong support for the supporting concepts activities.

"2. In the current constrained budget circumstances, the present level of support for the supporting concepts activities as a group is about correct. However, some redistribution of funding along the lines of the priorities established by the Panel would be appropriate. Specifically, (a) the FRC, Stellarator and MFF programs were recommended by the Panel for increases, (b) the recommended EDT program represented a decrease over FY 1984 levels, and (c) the recommended Spheromak program would lead to reduced budgets over the next few years.

"With regard to the two largest supporting concept programs, the following points are also made:

Fig. B-1b

The Committee further stated:

"Because of this Committee's concern and belief in the need to maintain a viable magnetic fusion research program, not only for its own value but because of the very important physics research and training that takes place as a result of the fusion program, the recommendation provides for an increase of \$25,000,000 above the request to restore a portion of the reductions. These funds are to be used to maintain mirror fusion research as a working alternative so as not to eliminate the primary competitor to Tokamak concepts. In addition, funds are added to maintain the schedule to achieve breakeven at TFTR in the 1988-1990 timeframe. In view of the restoration of funds for the mirror fusion program, the Committee expects that operating support for the Doublet III device be restored to 1986 levels in order to meet international commitments, and to allow neutral beam and RF heating experiments to carry on as previously agreed to with the Japanese, and for the TARA device to provide data support for the MFTF-B. Finally, additional funds may be made available to university research initiatives to assist in maintaining a viable fusion program."

Commenting on international collaboration, the Committee commented:

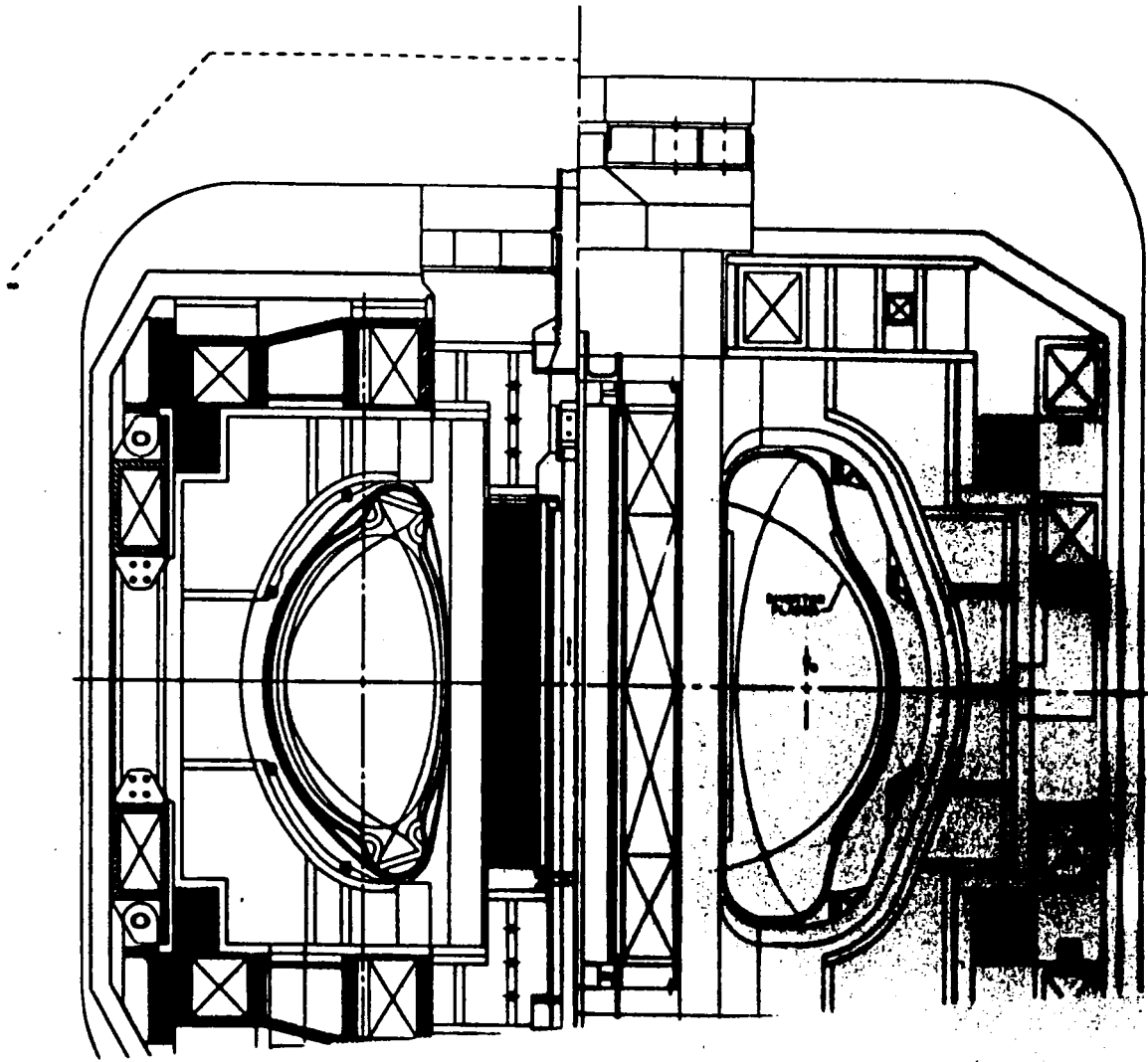
"Among the proposals endorsed by the international community is the development of an experiment which would provide, at modest cost, the opportunity for detailed investigation of an ignited Tokamak plasma under equilibrium-burn conditions. A preliminary study of such a device, to be constructed in the United States for operation in the early 1990's is now under development and review within the Department of Energy. This experiment would strengthen the United States' position as it continues to negotiate a possible international collaboration program on the larger fusion engineering test facility and would maintain the momentum of the domestic program."

Finally, the Committee report said:

"It appears that the initiative begun during Soviet discussions between the United States and the Soviet Union may result in a serious international fusion project that would result in funding requirements not identified in any budget submission currently before the Congress. Any funding proposed to be obligated on such an initiative, or similar or other activities related to it, shall be presented to the House and Senate Appropriations Committees under the normal appropriations procedures and identified separately in subsequent budget submissions."

"Decollo" dell' Ignitor statunitense: opinione
del Comitato della "Camera" (1986).

Fig. B-2



Nocciolo della macchina C.I.T. come presentemente concepita.

Fig. B-3

IGNITOR-Ω

$$R_o = 110.5 \text{ cm}$$

$$R_o/a = 2.75$$

$$a \times b = 40 \times 72.5 \text{ cm}^2$$

$$b/a = 1.8$$

$$I_p \approx 11.25 \text{ MA}$$

$$\bar{B}_p = \frac{2I_p}{5(a+b)} \approx 40 \text{ kG}$$

$$I_p \bar{B}_p \approx 45 \text{ megampere-tesla}$$

$$\langle J_{||} \rangle \approx 1234 \text{ A/cm}^2$$

$$I_{cc} \approx 310 \text{ kA} \times 240 \text{ turn} = 74.4 \text{ MA-turn} \equiv I_c$$

$$B_o = B(R=R_o) \approx 134.6 \text{ kG} \quad q_a(\psi) \approx 2.8$$

$$q_E = (ab/R_o^2) \times I_c/I_p \approx 1.57$$

$$I_p \text{ (ALC)} \approx 0.8 \text{ MA}$$

$$\bar{B}_p \approx 9.70 \text{ kG}$$

$$I_p \bar{B}_p \approx 0.77 \text{ MA-T}$$

$$\frac{F_c \text{ (IGN)}}{F_c \text{ (ALC)}} = 58$$

$$\frac{F_c \text{ (IGN)}}{F_c \text{ (CIT)}} = 1.73$$

Confronto fra i parametri (vicini) di Ignitor e di C.I.T.

Fig. B-4a, e B-4b

C.I.T.

$$R_o = 132.5 \text{ cm}$$

$$R_o/a \approx 3$$

$$a \times b = 42.7 \times 85.5 \text{ cm}^2$$

$$b/a \approx 2$$

$$I_p \approx 9 \text{ MA}$$

$$\bar{B}_p \approx 28.2 \text{ kG}$$

$$I_p \bar{B}_p \approx 25.4 \text{ megampere-tesla}$$

$$\langle J_{||} \rangle \approx 785 \text{ A/cm}^2$$

$$I_c \approx 68.4 \text{ MA-turn}$$

$$B_o \approx 103.5 \text{ kG}$$

$$\frac{\bar{B}_{pCIT}^2}{\bar{B}_{pIGN}^2} \approx \frac{1}{2} ; \quad \frac{\langle J_{||} \rangle_{CIT}^2}{\langle J_{||} \rangle_{IGN}^2} \approx \frac{1}{2.5}$$

$$q_E \approx 1.57$$

Fig. B-4b

ВТОРНИК, 18 НОЯБРЯ 1986 г.
 9.00 — Заседание H-I — Концепции и технология реакторов
 Председатель: К. Томабечи (Япония)

TUESDAY, 18 NOVEMBER 1986
 9.00 — Session H-I — Technology and Reactor Concepts
 Chairman: K. Tomabechi (Japan)

Name(s)	Designating	Title of paper	Название доклада
IAEA-CN-47/ H-I-1	CEC	Concept and Parameters of NET	Концепция и параметры установки NET
F. Engelmann			
H-I-2	USA	A Compact Ignition Experiment	A Compact Ignition Experiment (Игнитор)
J.A. Schmidt			
H-I-3	Japan	Tokamak Reactor Operation Scenario Based on Plasma Heating and Current Drive by Negative-Ion-Based Neutral Beam Injector	Сценарий работы реактора-токамака, основанный на нагреве плазмы и возбуждении тока с помощью инжектора пучков нейтральных частиц, на базе источника отрицательных ионов
S. Yamamoto			
H-I-4	USA	Results of Superconducting Magnet Testing in the International Large Coil Task	Результаты испытаний сверхпроводящего магнита по международному проекту большой катушки
M.S. Lubell			
H-I-5	UK	Radiological Implications of Low-Activation Steels as Structural Materials in Fusion Reactors	Радиологические эффекты низкоактивируемых сталей, используемых в качестве конструкционных материалов термоядерных реакторов
K. Hancock			

Riconoscimento del fatto che il programma C.I.T. degli Stati Uniti è un Ignitor!

Fig. B-5

FUSIONE MAGNETICA U.S.A.**1973 - PREVISIONI:****PROTOTIPO INDUSTRI. PER IL 2000
10% PRODUZ. ENERGIA PER IL 2010
18% PRODUZ. ENERGIA PER IL 2020****1970-80: PROGRESSO SCIENTIFICO
GRANDI PROGETTI (JET, TFTR, ECC.)****1978: APERTURE EST-OVEST (INTOR)****1980: LEGGE M.F.E.E. -
\$ 20 MILIARDI (PROTOTIPO A. 2000)****1981-82: NUOVA POLITICA ENERGIA
SORDINA ALL' INTOR****1983-84: TRANSIZIONE DALLA CRISI
ENERGETICA ALLA CRISI DI BILANCIO****1984-85: RIESAME PIANI FUSIONE****1985: NUOVO PIANO FUSIONE****CONVERSIONE ALLE
MACCHINE COMPATTE**

Sunto della relazione del Prof. C. Orzalesi
attaché scientifico presso l'Ambasciata Italiana
di Washington sulla conversione in grande scala
del programma degli Stati Uniti nella filiera
delle macchine Alcator-FT-Ignitor.

Fig. B-6a, B-6b, B-6c,
B-6d, B-6e, B-6f

**1985: NUOVO PIANO FUSIONE
A CONFINAMENTO MAGNETICO**

**SCOPO: CREARE BASI SCIENTIFICHE
E TECNOLOGICHE PER LA FUSIONE
TERMONUCLEARE CONTROLLATA A
CONFINAMENTO MAGNETICO**

(PER REATTORI DOPO IL 2000)

3 OBIETTIVI STRATEGICI:

- SCIENTIFICO**
- TECNOLOGICO**
- DI TRASFERIMENTO TECNOLOGIE**

APPROCCIO:

"A COMPONENTI"

4 PROBLEMI PRIORITARI:

- 1) SISTEMI DI CONFINAMENTO
- 2) PROPRIETA' COMBUSTIONE PLASMA
- 3) MATERIALI P. REATTORI A FUSIONE
- 4) TECNOLOGIE NUCLEARI P. FUSIONE

STRATEGIE:

- 1) Progr. Naz. ad ampio spettro
MACCHINA COMPATTA COSTO <500 M\$
- 2) COOPERAZIONE INTERNAZIONALE

PROGRAMMA:

- 1) CIT - INIZIO COSTRUZ. 1988
ESPERIMENTI DAL 1993
- 2) ETR - COLLABORAZ. INTERNAZ.

**SPESE PER LA FUSIONE MAGNETICA
(MILIONI DI DOLLARI)**

	1985	1986	1987	1988
ESERCIZIO		321	308	298
STRUMENTI		28	17	18
COSTRUZIONE		13	8	16
TOTALE	436	365	333	333
			(+12.5)	(+12.5?)

Fig. B-6d

1985: NUOVO PIANO FUSIONE
ENFASI SULLE MACCHINE COMPATTE

1985-86: STUDIO CONCETTUALE **CIT**
TANDEM MIRROR "IN FRIGORIFERO"

1986: PROGETTO DI CONCETTO CIT

1987: PROGETTO INGEGNER. CIT
STUDIO MODIFICA ALCATOR-C
TANDEM MIRROR "IN NAFTALINA"

1988: INIZIO COSTRUZIONE CIT
MODIFICA ALCATOR-C+ F.E.L.
D-T AL TFTR DEL PPPL
RIDUZIONE ALTRI PROGRAMMI
ENFASI SULLE MACCHINE COMPATTE
IN TUTTO IL BILANCIO

1988-93: COSTRUZIONE CIT

1993-2000: ESPERIMENTI CON CIT

Fig. B-6e

PROSPETTIVE DI COOPERAZIONE

- 1) COOPERAZ. A 4 (EST-OVEST)
SOLO PER ETR

"CARTA" PER 6-7 ANNI, POI ?

- 2) COOPERAZ A 2 0 A 3

POSSIBILI: USA-CEE-J

USA-CEE

USA-ITA (CEE)

FATTORI PRO E CONTRO

COMUNQUE: **GLI USA PROCEDONO CON CIT**

USA: COOPERAZ. SUI COMPATTI

SE CONVENIENTE

——> OCCORRE ESSERE COMPETITIVI
(POSSIBILE CON IGNITOR)
(DIVERSE ESIGENZE ITA-USA)

VANTAGGI DI IGNITOR PER L'ITALIA

- 1) POSSIBILE SCOOP SCIENTIFICO
- 2) VOLANO TECNOLOGICO
- 3) CENTRO PER PARCO DI RICERCA
- 4) COOPERAZ. USA(?) ——> COMMESSE

Appendice C - Fusione a Confinamento Inerziale

Nel corso della presentazione orale dell'autore si è richiesto un parere sullo stato e le prospettive delle ricerche sulla fusione per confinamento inerziale. Ritengo che i problemi che esistono tuttora a questo riguardo siano molto ben riassunti nel rapporto qui allegato del Dr. S. Bodner appartenente al Naval Research Laboratory. Infatti il Dr. Bodner ha completo accesso ai programmi di ricerca in questo campo sia aperti che classificati (segreti). Per questo gli è stato richiesto di fare il punto sulla situazione alla recente conferenza internazionale di Kyoto.

Posso aggiungere che, a suo e mio parere, non è per ora possibile intravedere la possibilità di realizzare un "driver" adeguato con costi accessibili.

INERTIAL CONFINEMENT FUSION

IAEA-CN-47/I-4

SUMMARY ON INERTIAL CONFINEMENT FUSION

S. Bodner
Naval Research Laboratory
Washington, D.C.
U.S.A.

Inertial confinement fusion continues to be an inherently attractive alternative to magnetic fusion because the high technology component, laser or ion beam, can be located far from the target chamber for easy access and maintenance. But scientifically and technologically, the ICF program is not as advanced, with most of the papers at this conference appropriately addressing the basic physics issues and the driver technology issues, rather than $n\tau$ scaling, ignition or breakeven milestones.

This summary has been organized according to the various ways that the driver can be coupled to the pellet: radiation drive with lasers, radiation drive with light ions or heavy ions, and direct drive with lasers. It should be noted that a few of the latest ICF results mentioned in this summary were only presented orally or in posters, and are not in the final written manuscripts.

1. RADIATION DRIVE WITH LASERS

The Nova facility at Lawrence Livermore National Laboratory has been completed and is operating. Using 20 kilojoules at the third harmonic, they have imploded a pellet and achieved a fuel temperature of 1.7 keV with an estimated $n\tau$ of 2 to 4 x 10¹⁴ sec/cc (B-I-2). This is a very positive result, but it should be noted that the $n\tau$ measurement is based on only a single diagnostic that is known to give optimistic results. More importantly, $n\tau$ is not a sufficient measure of progress in inertial fusion. One also needs to know several other factors, such as the total coupling efficiency of laser energy to DT fuel. For electrical energy applications, a high total coupling efficiency is needed in order to overcome the inherently low efficiency of laser drivers.

For the radiation drive concept, one component of the total coupling efficiency is the x-ray conversion efficiency. Labs in the U.S. (B-I-2), Fed. Rep. Germany and Japan (B-I-3), and Peoples' Republic of China (B-III-2) all reported unexpectedly low x-ray conversion, with the conversion monotonically decreasing with increasing laser energy. For example, Lawrence Livermore National Laboratory showed x-ray conversion efficiency of only 20-30% at a laser intensity of 2-4 x 10¹⁵ W/cm², rising to only 50-60% at an intensity of 10¹⁴-10¹⁵ W/cm².

At this conference, LLNL graphs also showed that a conversion efficiency of 50% implies a predicted pellet gain of only about 50 with a laser energy of five megajoules (B-I-2). For electrical energy applications, the product of the pellet gain times the driver efficiency must be at least 10-15. This pellet gain would then require a laser efficiency of 20-30%, far above what is expected from any laser. Some of the labs hope to raise the conversion efficiency by appropriate choice

of the high-Z target materials, and some improvement should be possible, but for energy applications there is the additional constraint. A power reactor would use a few tons per week of this high-Z material, and therefore the material has to be both low cost and non-radioactive under the neutron bombardment.

Limeil laboratory (B-III-1) presented a large variety of x-ray diagnostics with spatial, temporal, and spectral resolution, with an emphasis on very careful absolute calibration.

2. RADIATION DRIVE WITH LIGHT IONS OR HEAVY IONS

Light ions and heavy ions have a substantial advantage over lasers for pellets that use radiation drive, because the driver efficiency is expected to be approximately 20%. The coupling of these ions to the pellet is also expected to be relatively benign as compared to a laser beam, although the detailed pellet designs and the techniques for beam propagation and focussing are still under development. In addition, the cost of a light ion driver is much less than for a laser; Sandia Laboratory (B-II-4) has already built PBFA-II, a megajoule facility, with the eventual milestone of pellet ignition.

Most research in ion beam fusion is still concentrated on driver development, rather than driver-target coupling. PBFA-II is currently in an accelerator debugging phase which is expected to last another year. First experiments on target are expected before the next IAEA meeting in 1988. At the previous IAEA meeting, the generation of a pure lithium source was identified as a critical problem. At this meeting Sandia announced that a 96% pure lithium source had been developed and was now being installed on PBFA-II.

Osaka Laboratory announced a 3-4 fold increase in the ion beam intensity on target, using a non-spherical shaped diode (B-II-5). This is the first confirmation of the shaped diode technique presented by Sandia at the last conference. Osaka also presented results on a new technique that starts with a low voltage pulsed power source and uses serial connection in the diode to produce a higher voltage. This is an important result that could lead to repetitive operation of a diode -- one of the key requirements for electrical energy production using light ion fusion.

At Nagaoka (B-III-9) a technique for "post acceleration" of ions was demonstrated. This technique offers the possibility of utilizing intermediate-Z ions, rather than light ions.

The Tokyo Institute of Technology (B-III-7) presented results on the development of cryogenic ion sources for light ion diodes. As an initial test, they have produced 90% pure nitrogen. With colder sources, they expect to soon produce pure hydrogen and helium.

At DENIM in Spain, they have developed a state-of-art 1D computer code, primarily for the study of ion beam fusion (B-III-6). This code has capabilities that are similar to that of the largest computer codes in the world, and has been used to find regimes of operation with enhanced pellet gains with light ion fusion.

Research in heavy ion fusion was presented by Lawrence Berkeley Laboratory, representing the United States effort (B-III-3). A two-year reactor systems assessment found that the driver cost could be held to

\$200/joule with a 3-4 megajoule driver, with net cost of electricity of 50 mills per kilowatt-hour. This result is of great importance, since the heavy ion fusion program had been previously criticized on the grounds that one needed too large and expensive a driver to be relevant to inertial fusion.

In order to obtain this reduction to 3-4 megajoules of ion driver energy, it was necessary to redesign the accelerator. Instead of singly charged ions, the new design uses triply charged ions, along with multiple parallel beam lines in the same accelerator tube. Preliminary experiments with the Single Beam Transport Experiment support the concept of using multiply charged ions. A proof of principle induction linac experiment is underway to test the concepts of current amplification and acceleration of multiple beam lines.

3. DIRECT DRIVE WITH LASERS

The direct drive approach to inertial fusion is attractive because of the simpler geometry. Since the target consists of just the pellet, there is less physical complexity and therefore inherently less risk of failure. Second, the direct drive approach has one less energy conversion step, with the laser light directly heating the pellet corona. Each energy conversion introduces inefficiencies; with direct drive the pellet gain is therefore potentially higher and the ignition energy is lower. Ignition and breakeven are estimated to be in the range of 100-200 kilojoules. And with a five megajoule laser, pellet gains for direct drive are estimated to be in the range of 150-300, depending upon the pellet design details such as shell thickness. These pellet gains are high enough for electrical energy production, given a 6-7% efficient KrF laser.

Because of the high cost of lasers, the direct drive laser fusion concept will probably proceed in a set of steps, as follows:

- (a) test critical physics elements; 0.1 to 10 kilojoule lasers
- (b) hydrodynamically equivalent implosion; 10 to 100 kilojoules
- (c) breakeven and ignition; 0.1 to 1 megajoule
- (d) high gain; 1 to 5 megajoules

Currently, the direct drive laser fusion program is still in phase (a), (as is the program using radiation drive with lasers). In the next phase, (b) the pellet would be designed to behave hydrodynamically the same as a high gain pellet. In other words, it would have the same ratio of pellet thickness to radius, the same convergence ratio, the same final shell velocity, the same peak laser intensity and pulse shape, the same sensitivity to nonuniformities, etcetera. If these implosions are successful, the next stage, with a factor of ten more laser energy, would be breakeven and ignition. For a direct drive target this is expected to require a laser of about 100-200 kilojoules. The final step before engineering is then the demonstration of high pellet gain.

To make a rough analogy, the tokamak program is now completing the equivalent of the hydrodynamically equivalent geometry and is ready to attempt ignition. The direct drive program is still in phase (a), the study of the critical physics elements of high gain, but

progress presented at this conference and elsewhere has been sufficient, I believe, to justify an attempt at imploding a hydrodynamically equivalent pellet.

The direct drive laser fusion papers at this conference can be organized according to the various critical physics elements. These are: preheat control, laser symmetry, coupling efficiency, ablative Rayleigh-Taylor instability, and the central ignition concept. I have ordered these five physics issues according to our level of understanding; preheat control is the best understood topic, the ignition concept is the least understood. In addition to these five topics, there are requirements for laser development, pellet fabrication, reactor chamber design, and various supporting physics.

3.1 Preheat Control

Directly driven laser fusion pellets are extremely sensitive to fast electron preheat; controlling this preheat will probably require a short laser wavelength of 1/4 micron and a laser intensity of less than 10^{15} W/cm². At this conference Ecole Polytechnique presented experimental data (B-II-3) that there would be very low preheat with 1/4 micron laser light. Further experiments are planned with longer scale lengths. The Naval Research Laboratory has previously presented experimental results that their ISI optical smoothing technique would reduce most plasma instabilities, if the laser wavelength was less than one micron. At this conference they presented data (B-I-5) that showed that ISI with both spatial and temporal incoherence reduced the Raman instability, while the use of just spatial incoherence without temporal averaging (the random phase plate) enhances the Raman mode over an ordinary laser beam.

3.2 Symmetry

A high pellet gain requires that the implosion symmetry be uniform to about 1-2%. This laser uniformity can be achieved in principle with one of several optical techniques that add spatial and temporal incoherence to the laser beam. The smoothing has been experimentally demonstrated on an individual laser beam, and calculations indicate that the uniformity on an imploding sphere should be sufficient. In the future these optical smoothing techniques will probably be installed on the various spherical implosion facilities, but this will require further time and money. At this conference, two laboratories presented status reports on spherical implosion experiments that did not utilize any optical incoherence for smoothing.

At the University of Rochester (B-I-5), there is an ongoing program to improve the laser uniformity sufficiently to obtain an implosion to 100-200 times solid density. This demonstration would then be followed by a larger facility that would incorporate spatial and temporal incoherence smoothing techniques. Currently the Omega laser at the University of Rochester can produce 15% RMS nonuniformity, summed over all surface harmonic modes. With improvements now underway, they expect to soon reduce this nonuniformity by a factor of three.

At the Electrotechnical laboratory in Japan, (B-III-8), they have

experimentally measured thermal smoothing, using both an intensity modulated laser beam and a laser beam with a random phase mask. Consistent with theory, they found significant thermal smoothing of higher wavenumber disturbances when one uses 1/2 micron laser light, but negligible smoothing with 1/4 micron laser light. They also presented their progress in building a one kilojoule KrF laser, which will probably utilize one of the ISI techniques.

3.3 Efficiency

The University of Rochester and the Naval Research Laboratory reiterated (B-I-5) that they have found pellet design regimes with a hydrodynamic rocket efficiency of 10-15%, with the higher values requiring thinner pellet shells. Thinner shells are of course more sensitive to the ablative Rayleigh-Taylor instability, which leads us naturally to the next topic.

3.4 Ablative Rayleigh-Taylor Instability

As a high gain direct drive pellet implodes, the in-flight aspect ratio, $R/\Delta R$, can approach 100 to 150, where the shell thickness is defined by the $1/e$ density surfaces. One of the outstanding issues in laser fusion is whether in fact one can stably drive such thin pellet shells. To do so, the ablative Rayleigh-Taylor instability must be reduced below the classical \downarrow kg. Computer simulations at the University of Rochester, Rutherford-Appleton Laboratory, Osaka University, and the Naval Research Laboratory all predict that the growth rate is reduced, with calculations at Osaka and NRL indicating that the growth rate can be 30% of the classical value, if one uses 1/4 micron laser light. But so far, there is very little experimental data on the growth rate of the Rayleigh-Taylor mode. At this conference, two laboratories, Rutherford/Appleton and NRL, announced new experimental methods and results. (A third lab, Osaka, did not present their recent Rayleigh-Taylor experiments at this conference.)

Rutherford/Appleton lab has used an ingenious α -particle backlighting of an ablatively accelerating foil to measure the eventual breakup of that foil (B-II-1). The α particles came from the thermonuclear burn of a separate imploding pellet.

The Naval Research Laboratory directly measured the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor mode by using two separate backlighters shining through an ablatively accelerated foil onto x-ray streak cameras (B-I-5). One source measured the acceleration of the foil, the other measured the changes in the mass per unit area in the thick and thin regions of the foil. The growth rate was consistent with the computer simulations for 100 and 150 micron perturbations, but was much less than the non-ISI simulations for the 50 micron perturbation. These experiments were done with one micron laser light. Future experiments are planned with 1/2 micron light, and perhaps with 1/4 micron KrF laser light.

5. Ignition Concept

By the phrase "ignition concept" I refer to the point design of a high gain pellet, the creation of a central hot spot that can ignite the fuel, and the Rayleigh-Taylor mix of the hot fuel with the surrounding

cold denser fuel. Several laboratories reported spherical implosion experiments that attempted to create optimum fuel conditions, given the constraint of limited laser energy.

Osaka University (B-I-4) and Lawrence Livermore National Laboratory (B-I-2) have both obtained about 10^{13} neutrons by carefully tailoring the shock waves in a high aspect ratio pellet. And Osaka University has emphasized the technique of stagnation-free implosions in order to minimize shell/fuel mix, and has suggested that these implosions are the equivalent of the tokamak "supershots". The type of pellet used in these high neutron yield experiments can not be extrapolated to high gain, but they do demonstrate substantial control of the implosion process, and there may be some long term application to the stagnation-free technique.

The University of Rochester has an ongoing campaign to compress fuel to about 100-200 times solid density. Progress is limited by laser asymmetry, as discussed in Section 3.2. At this conference they reported (B-I-5) they reported on the development of various complimentary diagnostic techniques that are being utilized in order to insure that the measurement of high density will be accurate.

Ecole Polytechnique has been imploding pellets using their unique 1/4 micron spherical implosion facility (the fourth harmonic of Nd:glass). Their diagnostics showed (B-II-3) that the implosion was degraded by fuel/shell mix that was in turn driven by laser nonuniformities on the imploding shell. They are now working to improve this situation.

Limeil laboratory reported (B-I-1) on planar experiments designed to isolate the physics of Rayleigh-Taylor mix. Extrapolating on a technique first utilized at Osaka, they built a target of aluminum layered with a thin coating of gold on each side. By accelerating the target with one laser, and burning through the other side with a second laser beam, they were able to demonstrate that the acceleration process produced mix on the rear of the foil. This technique may be a powerful one for future studies of mix.

3.6 Laser Research and Development

Both the Los Alamos National Laboratory (B-II-2) and the Electrotechnical Laboratory (B-III-8) reported briefly on their ongoing effort to build KrF lasers. Both will probably incorporate ISI optical smoothing, and both will be used for one-sided flat target experiments.

3.7 Pellet Fabrication

Lawrence Livermore National Laboratory announced the development of a low density foam pellet that can "wick" up the DT fuel. This is a very significant development, since previously there had been no way to build a thick cryogenic DT fuel layer in a pellet.

3.8 Reactor Chamber Design

A reactor design that could be applicable to direct drive laser fusion is being developed by the University of Wisconsin in the U.S.

It would utilize a simple dry chamber wall and a gas fill. But no direct drive reactor designs were reported upon at this meeting.

3.9 Supporting Research

There is a variety of important fundamental research that does not fall into any of the above programmatic categories, but that is necessary if we are to succeed in laser fusion. For example, the University of California, Los Angeles, has completed a microwave simulation of laser plasma interactions (B-III-4). With the longer wavelength microwaves they were able to study the saturation mechanisms of ions waves that are driven two electromagnetic waves. And at the University of British Columbia they have performed detailed quantitative studies of radiative and shock heating in simple planar targets (B-III-10).

I would especially like to note the success at several labs to understand thermal transport, leading to a nonlocal transport theory! Early in the history of the laser fusion program, several labs noted that transport in layered targets did not match the classical Spitzer-Harm formula, even though the gradient scale lengths were many times the electron mean free path. This was followed by several years of careful experimentation under various conditions at many laboratories, along with some crude transport models that are best forgotten. But eventually this led to a sophisticated Fokker-Planck study at Rutherford-Appleton lab that showed the importance of electrons with velocity that is several times the thermal level. And at this conference a sophisticated non-local transport model was presented by the group working with Limeil (B-II-3). (Another nonlocal transport model has been developed at Osaka, but was not presented at this conference.)

3.10 Future Directions in Direct Drive Laser Fusion

In my opinion, the primary pellet physics issues in the direct drive laser fusion program that need to be addressed next are: (1) How thin a pellet shell can one use? We need to experimentally demonstrate that the growth of the ablative Rayleigh-Taylor mode is as low as the computer codes indicate at 1/4 micron laser wavelength. (2) How thick a pellet shell can one use? In case the Rayleigh-Taylor growth rate is larger than predicted, we need further plasma instability data with reactor-sized scale lengths, short laser wavelength, and spatial and temporal incoherence. (3) The successful developments to-date imply that the program should start imploding hydrodynamically equivalent pellets, and continue the physics study of hot/cold fuel mix.

4. SUMMARY OF SUMMARY

The inertial fusion concept has made substantial progress since its inception. Large Nd:glass lasers and pulsed power devices have been successfully developed, beyond most scientist's initial imagination. Plasma coupling problems that led to fast electron preheat have been essentially solved. The initial pellet design concepts that started the program were flawed, but they have been replaced by superior pellet design concepts. Optical techniques have solved the fundamental

problem of laser nonuniformity. The pellet physics emphasis of the program is in the process of shifting, from plasma instabilities to fluid instabilities, from pulsed power development to ion-beam target experiments, from Nd:glass laser development to KrF and heavy ions. As seen at this conference, inertial confinement fusion is healthy, lively, and with strong potential for attractive electrical energy applications.