

**NOTE DI RISPOSTA A TALUNI QUESITI,  
FORMULATI NELLA SEDUTA DELL'11 DICEMBRE 1986,  
DEI RESPONSABILI DEI PROGRAMMI DI RICERCA DELL'ENEA**

PAGINA BIANCA

**NOTA  
DEL DOTTOR ALBERTO BRACCI**

PAGINA BIANCA

**Appunto per la Commissione Industria della Camera,  
in risposta alle domande sulla fusione nucleare  
degli onorevoli deputati**

(A. BRACCI)

**Valutazione delle difficoltà oggettive degli operatori.**

- 1) Difficoltà di pianificazione sulla base dell'assegnazione di finanziamenti: la mancanza di approvazione di un Piano Finanziario Quinquennale, l'assegnazione dei finanziamenti su base annuale, (a volte addirittura trimestrale o semestrale) rende difficile per l'Ente stabilire un'assegnazione di fondi sulla base di piani di sviluppo realistici; le assegnazioni ai diversi programmi sono generalmente determinate da necessità contingenti a breve termine.

Nell'ambito del programma Fusione la costruzione in corso delle due grosse macchine FTU ed RFX (contratti pluriennali per la costruzione di grossi componenti) oltre ad assorbire il grosso delle risorse finanziarie impone la necessità di creare riserve interne atte a garantire la continuità dei lavori. Ciò impone rallentamenti e ritardi nel finanziamento di attività di minore impegno finanziario, ma di non minore importanza riguardanti in particolare: lo sfruttamento scientifico delle macchine esistenti, l'approntamento delle apparecchiature di misure necessarie per lo sfruttamento delle macchine in costruzione piani di ristrutturazione edilizia e di dotazione dei laboratori di attrezzature di base volti al raggiungimento di una maggiore efficienza.

In particolare i finanziamenti previsti per il 1987 sono pari a circa il 60% di quelli necessari per lo svolgimento di una regolare attività.

- ) Carenza di personale: il Piano Quinquennale 85-89 dell'ENEA prevedeva un incremento d'organico per il Dipartimento Fusione di circa 100 unità, con una distribuzione squilibrata a favore dei primi tre anni, onde consentire un pieno utilizzo dei neo assunti in attività produttive negli ultimi tre anni. Le restrizioni imposte sulle assunzioni (necessità di approvazione di deroghe a livello governativo coincidente con un'espansione generalizzata nell'Ente) hanno provocato nei primi due anni del piano praticamente una crescita zero dell'organico del Dipartimento (le nuove assunzioni sono bastate solo a coprire perdite dovute a pensionamento, dimissioni, trasferimenti ad altre unità). I tempi di assunzione sono inoltre allungati per la comprensibile

necessità dell'Ente di concentrare le assunzioni relative nel minor numero possibile di concorsi a copertura delle necessità globali dell'Ente stesso. Difficoltà dello stesso tipo possono essere riscontrate all'interno del C.N.R. con conseguenze sui tempi di realizzazione della macchina RFX a Padova e sulle attività ordinarie dei due Istituti, in particolare Milano.

- 3) Il perdurare di questa situazione rende poco plausibile un rapido allargamento del fronte delle ricerche e l'immediato avvio di iniziative di costruzione di nuovi grossi impianti sperimentali, pur tenendo conto di un maggior coinvolgimento di operatori industriali già in fase progettuale.

### Tecnologia della fusione.

- 1) La percentuale di finanziamento della ricerca e sviluppo in attività tecnologiche rappresenta oggi, nel programma europeo e in quello americano, circa il 20% del totale, il restante 80% è dedicato oggi alla costruzione di macchine ed alla sperimentazione con esse volta al fine di studiare gli aspetti scientifici del problema.

Il rapporto relativo tra le due attività tenderà a bilanciarsi negli anni 90 raggiungendo verso il 2000 un'inversione a vantaggio delle attività tecnologiche.

Mentre la partecipazione italiana al programma europeo (escludendo le attività dirette della Comunità: JET, NET, contratti diretti all'industria) è pari oggi a circa il 20% dello sforzo atto a chiarire gli aspetti scientifici del problema, (tale percentuale è dovuta al fatto che sono in costruzione in Italia due delle 4 macchine di media dimensione intese come supporto alle problematiche trattate dal JET) e tenderà ad aumentare nel caso venga dato avvio alla costruzione di Ignitor, lo sforzo dedicato alle tecnologie rappresenta in Italia circa il 5-6% dello sforzo globale europeo nel campo tecnologico.

Condivido il giudizio del Prof. Colombo che un impegno di grandi dimensioni su tecnologie esclusive del futuro reattore a fusione possa essere prematuro e soprattutto molto costoso, se prolungato per tutto il tempo necessario a definire le opzioni impiantistiche di fondo. Ritengo peraltro che lo sforzo attuale dovrebbe essere perlomeno raddoppiato per non rendere praticamente nullo il contributo italiano al NET, sulle cui necessità è strettamente indirizzato pressochè tutto l'attuale sforzo tecnologico europeo; occorre ricordare che la somma degli sforzi di Francia e Germania supera il 60% del

totale, e che in Italia siamo carenti nei confronti di questi paesi di grosse attrezzature ed impianti già realizzati per lo sviluppo delle centrali a fissione.

La posizione italiana diverrebbe ancora più marginale qualora una macchina tipo NET (ETR) venisse realizzata nell'ambito di una più ampia collaborazione internazionale (a tre: Europa, Giappone, Stati Uniti, o a quattro se venisse coinvolta l'Unione Sovietica).

2) Relazioni tecnologiche tra fusione e fissione: sono due reazioni nucleari, in comune sono quindi senz'altro tutte le tecnologie che coinvolgono radiazioni, in particolare:

- a) Studio degli effetti di danneggiamento da radiazioni su materiali strutturali.
- b) sviluppo di componenti a tenuta di gas radioattivi (fissione: in particolare esafloruro di uranio; fusione: trizio).
- c) Progettazione di meccanismi di manipolazione a distanza.
- d) studi di neutronica: tecniche di misure di sezioni d'urto di reazione, distribuzione di flussi neutronici in materiali rallentanti, problemi di schermaggio.
- e) impatto sull'ambiente: metodologie generali di calcolo; metodologie di studi di incidente.

Sono inoltre derivabili da competenze sviluppate nel corso di attività di ricerca fissionistiche:

- f) Studi delle zone di mantello di rigenerazione del trizio: sviluppo di materiali ceramici, studi di termoidraulica, sistemi di circolazione a metalli liquidi.

Sono attività tecnologiche caratteristiche della fusione:

- g) sviluppo di cavi e di magneti superconduttori, nel caso del confinamento magnetico; sviluppo di laser, di sistemi ottici, acceleratori di ioni nel caso del confinamento inerziale.

Con riferimento al punto g) molte tecnologie sono affini a quelle sviluppate per la ricerca di fisica nucleare. In entrambi i casi pur mutuando molti risultati è però necessario uno sviluppo indipendente.

### Confinamento inerziale.

- 1) Ai fini della produzione di energia dal processo di fusione costituisce in effetti la sola reale alternativa al confinamento magnetico (versione Tokamak); il grosso delle ricerche sono svolte in funzione di applicazioni militari (Stati Uniti, Francia, Inghilterra); i risultati sono generalmente classificati. E' quindi difficile fare una stima dei tempi necessari per raggiungere una eventuale commercializzazione, anche se si può notare un vantaggio intrinseco rispetto al confinamento magnetico: la più facile scomponibilità del sistema in parti il cui sviluppo non è strettamente correlato (driver, bersaglio, camera di scoppio). Sembra di conseguenza possibile affrontare i diversi problemi di sviluppo in modo parallelo, purchè si sia disposti ad accettare maggiori rischi.

Il programma europeo non ha preso in considerazione questa alternativa per ragioni politiche più che per limitazione di risorse.

Anche in questo caso le risorse necessarie trascendono le possibilità di una singola nazione, per cui è necessario impostare un programma sulla base di una collaborazione internazionale. Una spinta in questa direzione potrebbe essere data dal Giappone, che svolge un programma significativo nel campo, al di fuori di ogni classificazione militare.

Ritengo utile che l'Italia sia pronta ad associarsi nel caso che si verificasse un tale evento.

- 2) Il programma attuale condotto in seno ENEA coinvolge circa 5 ricercatori ed una spesa annua dell'ordine di due miliardi di lire, personale compreso. Uno sforzo possibile ed adeguato al fine di inserirsi in un programma di collaborazione potrebbe essere un raddoppio del numero dei ricercatori impegnati e un bilancio dell'ordine di 10 miliardi da raggiungersi nel 1990 (investimento totale nell'arco 88-90 dell'ordine di 20 miliardi).

Nel caso che si verificasse la possibilità di una collaborazione internazionale, è necessario pensare dopo il '90 ad investimenti in impianti dell'ordine di 100 miliardi sull'arco di cinque anni, da aggiungersi ad un bilancio annuo dell'ordine di 20 miliardi.

Si arriverebbe in tal caso ad uno sforzo complessivo valutabile al 40% dell'attuale sforzo italiano sul confinamento magnetico.

- 
- 3) Durante queste fasi non si ritiene indispensabile un grosso sforzo per lo sviluppo di driver; è sufficiente fino ad uno stadio di completa dimostrazione della fattibilità scientifica, l'impiego di laser a neodimio; i risultati ottenuti nel frattempo dall'ENEA nello sviluppo di altri tipi di laser (FEL, eccimeri) sia pure per altre applicazioni, potrebbero essere in tempi brevi riorientati a studi finalizzati allo sviluppo di driver da reattore; driver a ioni sembrano più adatti per la fase successiva di dimostrazione che sarebbe raggiungibile in caso di buoni risultati precedenti dopo gli anni duemila.

PAGINA BIANCA

**NOTA  
DEL PROFESSOR BRUNO BRUNELLI**

PAGINA BIANCA

**In risposta alle domande della Commissione Industria della Camera sulla  
situazione della Tecnologia della Fusione in Italia**

(B. Brunelli)

**1. PREMESSA**

I Professori Fasella e Toschi hanno lamentato una carenza nella Tecnologia della Fusione in Italia.

In Europa nel 1982, in occasione dell'inizio del quinto Piano Quinquennale Euratom, è stato dato un significativo impulso alla tecnologia tipica del reattore a Fusione portandone l'impegno al 20% del programma globale.

Nell'allegato 1 sono elencate le aree tecnologiche tipiche delle attuali macchine (JET) distinte da quelle che si stanno sviluppando dal 1982 per il reattore: la distinzione non può essere ovviamente netta; in ogni caso, la carenza denunciata si riferisce alla tecnologia tipica del reattore a Fusione.

**2. DISTRIBUZIONE DEI FONDI PER LA TECNOLOGIA**

Nell'allegato 2 è descritto graficamente come dal 1982 ad oggi in Europa sono stati distribuiti i fondi (350 miliardi di Lire) tra le sette aree tecnologiche del Programma Europeo sulla Fusione.

Nell'allegato 3 è illustrata la distribuzione dei fondi impegnati da ENEA dal 1983 ad oggi in cinque aree tecnologiche.

Appare chiaro che il nostro impegno nelle aree "Operazioni a distanza" e "Sicurezza e ambiente" è (per ora) modesto, mentre esso è inesistente nell'area "Materiali strutturali".

Nell'allegato 4 è riportato il confronto tra lo sforzo italiano e quello tedesco presso il centro di Karlsruhe; dal confronto risulta che anche in questo campo il gap tecnologico è rilevante (si veda il commento che accompagna la figura).

La distribuzione percentuale tra i Paesi della Comunità dello sforzo finanziario (somma del contributo comunitario e nazionale) è la seguente:

Paesi	D	F	B	NL	UK	I	CH	S	DK
%	35.5	27.2	10.7	7.6	6.1	5.5	4.5	2.4	0.5

### 3. MOTIVAZIONI DEL LIMITATO SVILUPPO TECNOLOGICO IN ITALIA

Le principali ragioni del limitato sviluppo della tecnologia del reattore a Fusione sono le seguenti:

- 1) Il nostro Paese è carente nelle Tecnologie nucleare e dei materiali strutturali speciali; da queste tecnologie viene sostanzialmente mutuata quella dei reattori a fusione.
- 2) ENEA, delle tecnologie tipiche del reattore a fusione, ha privilegiato quelle con ricadute per altre applicazioni a breve termine, pur non escludendo l'impiego di competenze, quando disponibili, per lo sviluppo di tecnologie esclusive della fusione.

Date queste condizioni al contorno, all'inizio del 1983 si sono gettate le basi per lo sviluppo della Tecnologia del reattore a fusione (a confinamento magnetico) raccogliendo competenze ENEA già esistenti e orientandole allo studio di "Tasks tecnologici" proposti, in ambito europeo, ai laboratori associati con Euratom.

Dei 150 Tasks proposti, ENEA è stata in grado di considerarne solo 18, che riguardano:

- Ingegneria dei sistemi nelle aree:  
Mantello - Operazioni a distanza - Sicurezza e ambiente
- Fabbricazione e Caratterizzazione di:  
Materiali superconduttori - Materiali ceramici triziogeni.

I Tasks, ai quali non siamo stati in grado di partecipare e sui quali il programma tecnologico europeo ha concentrato circa 1/3 delle risorse, riguardano le operazioni con il Trizio e i materiali strutturali.

Le motivazioni di questa nostra assenza hanno radici lontane:

la tecnologia del Trizio esiste nei Paesi che hanno sviluppato armi termonucleari (per es. Francia, Inghilterra e Stati Uniti) oppure reattori ad acqua pesante (per es. Canada).

Per quanto riguarda i "Tasks" sui materiali strutturali (v. Allegato 5) questi sono stati distribuiti in Europa col criterio di privilegiare i Laboratori che, oltre ad avere una tradizione in Scienza dei Materiali, possiedono anche attrezzature ad hoc (essenzialmente reattori di ricerca ad alto flusso neutronico e bassa potenza: si veda l'allegato 6 con l'elenco di quelli europei).

Purtroppo il nostro Paese non ha oggi siffatti reattori di ricerca né acceleratori di ioni per studio dei materiali.

Quanto alla Scienza dei Materiali, solo recentemente in qualche Università italiana si stanno organizzando Unità (addirittura corsi di laurea) strutturate non solo per applicazioni a breve termine (le cattedre di Metallurgia sono sempre state orientate a questo fine), ma anche per sviluppare programmi applicativi a lungo termine. Queste unità potrebbero configurarsi, con il concorso dei grossi centri nazionali di ricerca, come i Dipartimenti di "Materials and Mechanical Engineering", che all'estero studiano e propongono leghe e materiali speciali, tecnologie di riporto, ecc., anche di interesse per la fusione nucleare: nel reattore futuro sono previsti strati ceramici protettivi e leghe a bassa attivazione e a ridotto danno neutronico.

#### 4. SVILUPPI FUTURI

Lo sviluppo futuro delle aree tecnologiche è cadenzato dall'evoluzione del progetto NET verso una sua maggiore definizione a partire dal 1989. Per evitare uno scollamento del nostro programma tecnologico da quello europeo sarà necessario raddoppiare (da 24 a circa 50) i tecnici laureati dei dipartimenti FUS e TIB già coinvolti nell'Ingegneria del Reattore a Fusione. Sarà inoltre necessario iniettare nel programma nuove competenze eventualmente reperibili anche in altri dipartimenti ENEA, per poter inserire ENEA e l'industria nazionale nella fase del progetto dettagliato del NET come descritto nel documento ENEA sulla Fusione Termonucleare in Italia.

\* Delle aree già attivate presso ENEA, richiede particolare attenzione quella dei materiali superconduttori per poter estendere l'attuale nostro successo ottenuto con la lega NbTi allo sviluppo tutt'altro che semplice dei cosiddetti materiali A15, che permettono di ottenere i campi magnetici più elevati richiesti nel campo della Fusione e degli Acceleratori.

Vale la pena a questo punto di osservare che oggi il mercato commerciale è rappresentato dai magneti per NMR con una situazione stazionaria di commesse. Per il mercato commerciale a lungo termine è opinione comune che la Fusione nucleare magnetica rappresenterà il maggiore utilizzatore.

\* Un tentativo realistico di aggancio col programma europeo nelle aree tecnologiche dei "Materiali Strutturali" e del "Trizio" deve essere impostato appoggiandoci ad attrezzature a partecipazione internazionale.

Più precisamente:

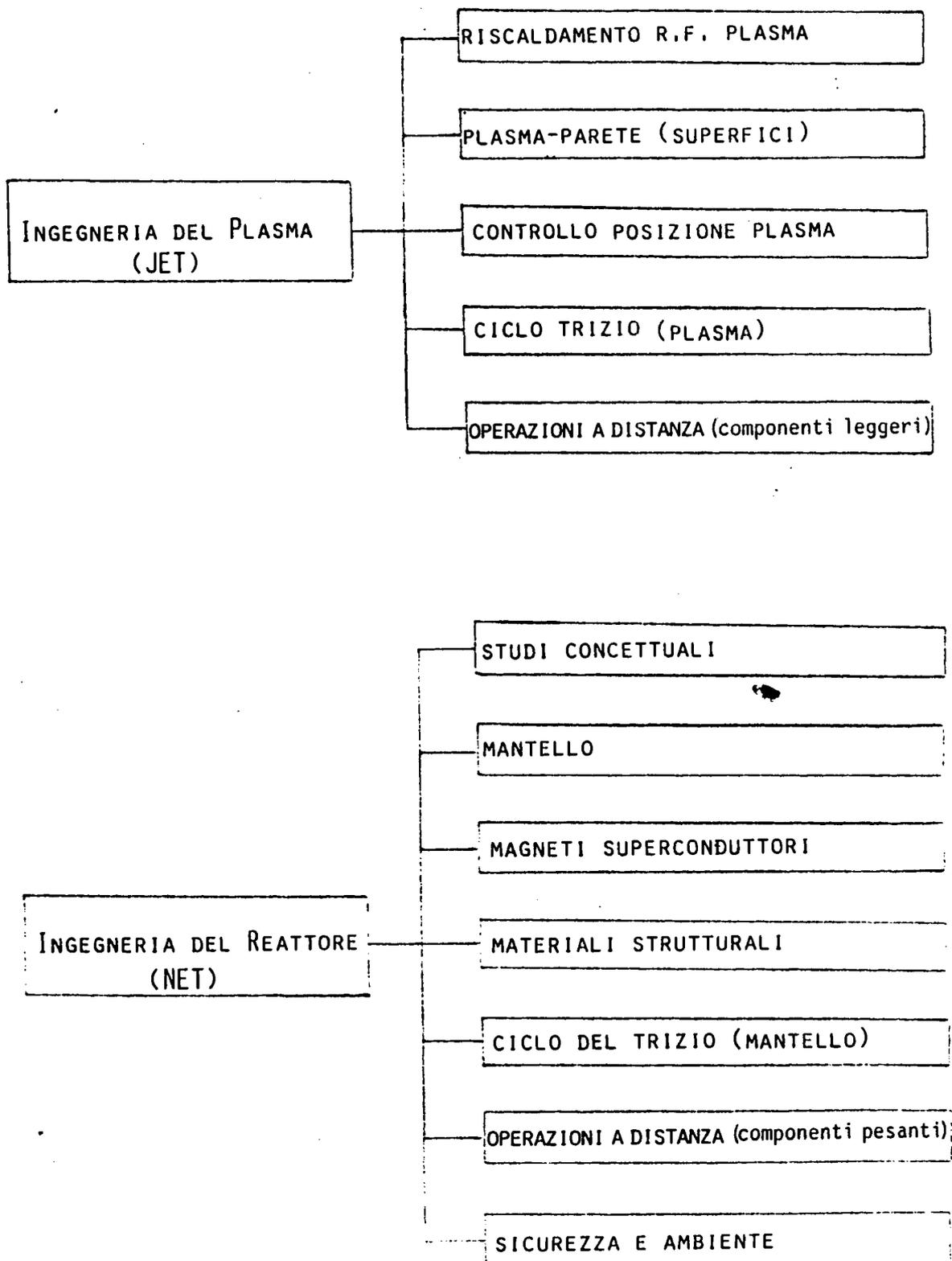
Per i "Materiali Strutturali", un contratto di collaborazione sta permettendo a ricercatori ENEA di irraggiare acciai speciali al Ciclotrone del Centro Comune di Ispra.

E' possibile che nel prossimo decennio venga internazionalmente progettata e costruita una intensa sorgente di neutroni da 14 MeV di intensità  $10^{16} \text{ s}^{-1}$  (da confrontarsi con i  $10^{15}$  neutroni al secondo della sorgente a spallazione del laboratorio inglese "Rutherford"). Essa è ritenuta necessaria per una caratterizzazione "sicura" dei materiali strutturali dei futuri reattori. Per i motivi esposti nel paragrafo precedente questa possibile iniziativa andrebbe seguita con interesse e coinvolgimento.

Per il "Ciclo del Trizio del plasma" può essere prevista una nostra partecipazione alla costruzione del Laboratorio Trizio al Centro Comune di Ispra coinvolgendo l'industria nel progetto per la fabbricazione di componenti compatibili col trizio (grosse valvole, pompe, ecc.).

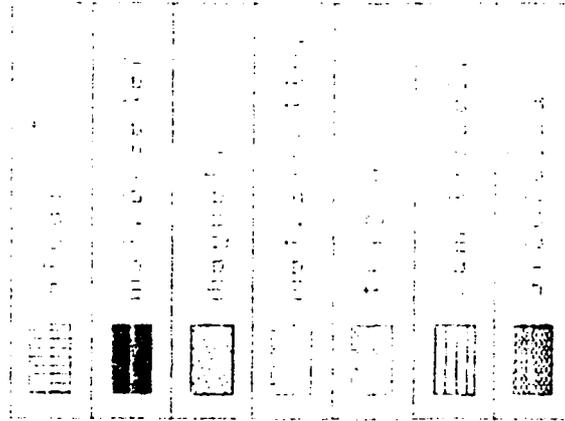
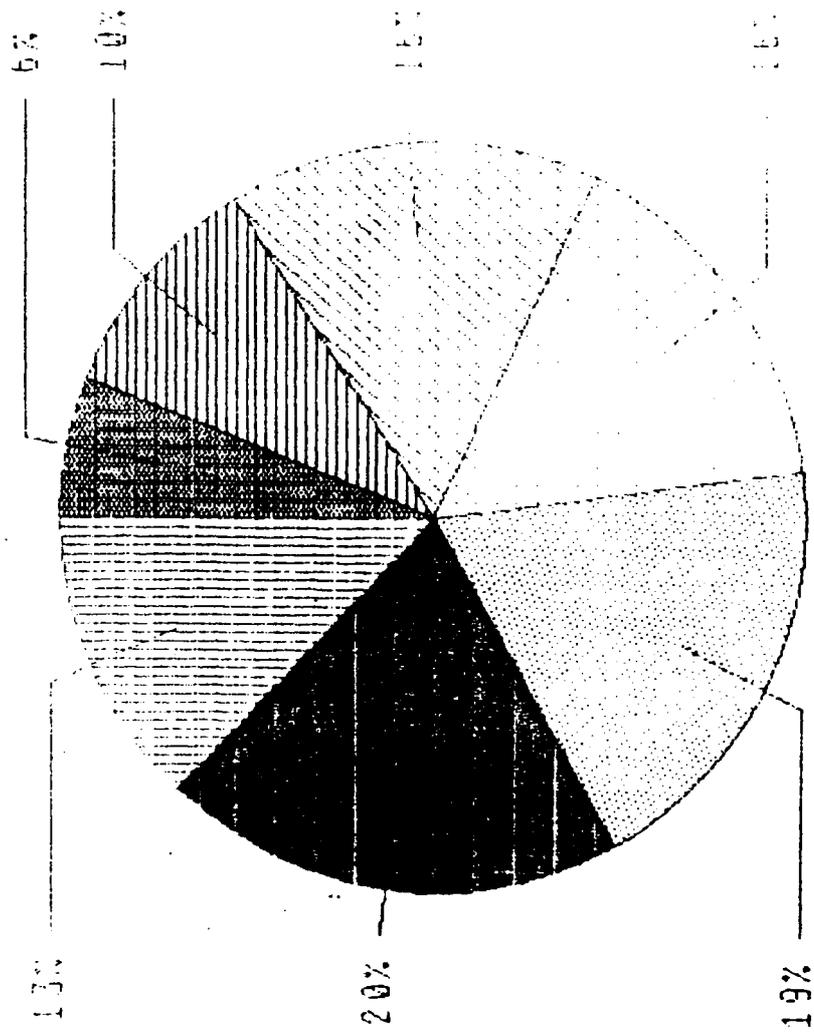
TECNOLOGIA DELLA FUSIONE

All. 1



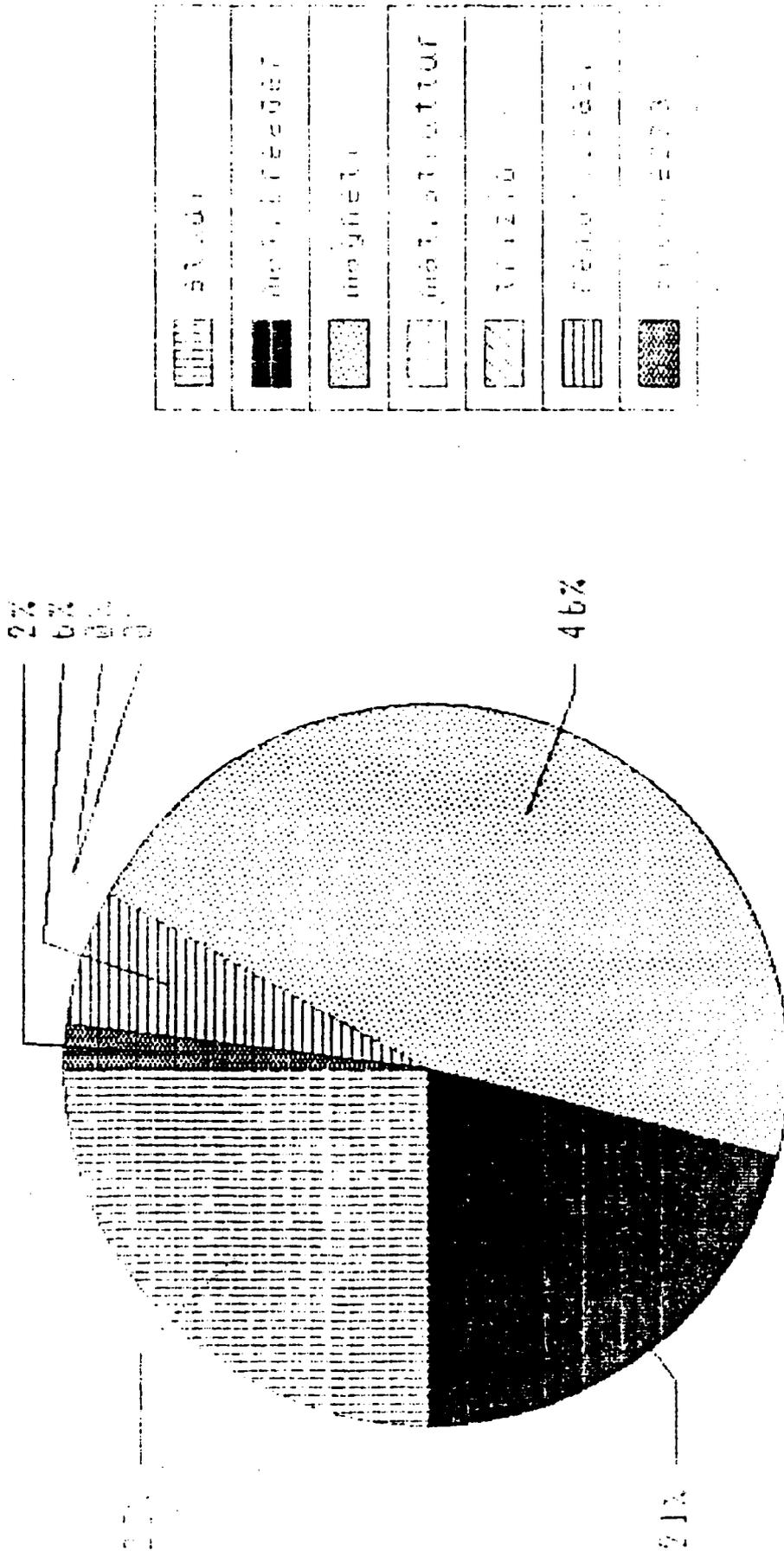
A11. 2

PROGRAMMA 1990-1991  
1992-1997



A11. 3

ENEA - DIPARTIMENTO REGIONALE  
 PROGETTO INGEGNERIA DEL REATTORE  
 Distribuzione della attività 1951-52



**Nota sull'attività del Kernforschungszentrum-Karlsruhe  
nel campo della Tecnologia della FUSIONE**

Fin dal 1982, ossia fin dall'inizio del programma tecnologico Europeo sulla Fusione, la Repubblica Federale Tedesca ha sviluppato una azione convinta di promozione delle tecnologie per la Fusione, trasferendo in questo campo rilevanti potenzialità esistenti nel Centro Nucleare di Karlsruhe (KfK).

Oggi le risorse del KfK dedicate alle tecnologie della Fusione sono:

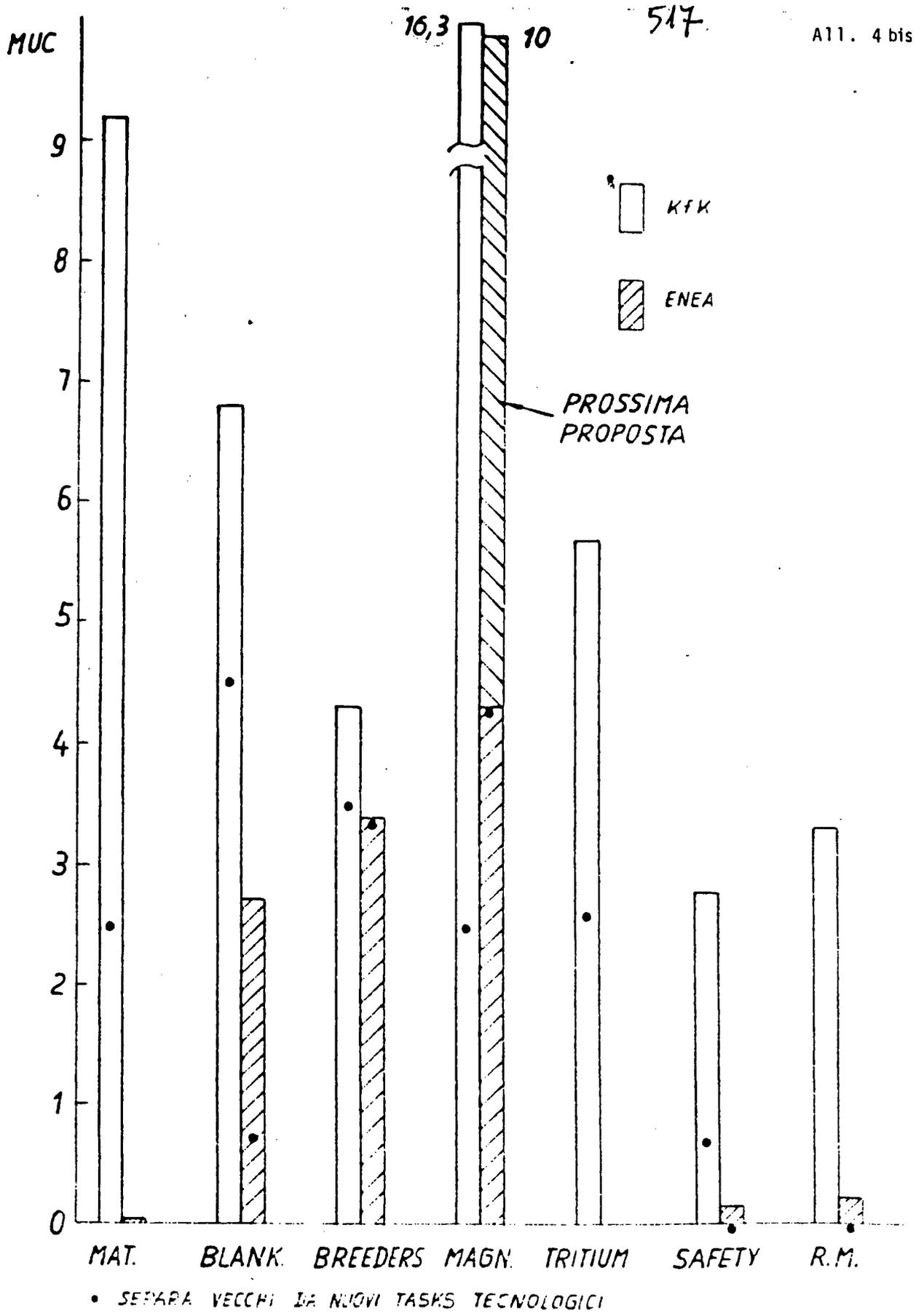
**Personale:**

Laureato:	100
Tecnico di laboratorio:	120
Tecnico di supporto:	300

**Impianti:**

- Reattore alto flusso KNKII per lo studio del danneggiamento neutronico sui materiali.
- TESPE e TOSKA per prove sui magneti superconduttori.
- Laboratorio per l'uso del Trizio, in via di allestimento a seguito del trasferimento delle attrezzature già esistenti al KfA di Jülich.

Nella figura allegata è data per KfK la prima (1982-85) distribuzione dei fondi tra le principali aree tecnologiche e si dà anche il confronto con l'analoga distribuzione dei fondi dell'associazione ENEA-Euratom.



A11. 5

**"TASKS" su Irraggiamenti dei Materiali Strutturali****FIRST ROUND PROJECTS 1982 - 84****M A T E R I A L S****A) Fission Reactor Experiments**

- MAT - 1 Post irradiation tensile, fatigue, and fatigue crack-growth testing of SS
- MAT - 2 In-pile fatigue tests of SS
- MAT - 3 Literature study of hydrogen effects on austenitic and martensitic SS
- MAT - 4 In-pile crack growth tests of SS
- MAT - 5 In-pile creep tests of SS
- MAT - 6 Irradiation behaviour of ceramics ( $Si_3N_4$ , SiC) and graphites
- MAT - 7 Irradiation embrittlement of Cu
- MAT - 8 Irradiation shift of DBTT in W

**B) Accelerator Based Research**

- MAT - 9 In-beam experiments : fatigue of SS
- MAT - 10 In-beam experiments : irradiation creep of SS
- MAT - 11 Effect of implanted He on fatigue : austenitic SS, ferritic steels, V-alloy, Ti-alloy, Mo-alloy
- MAT - 12 Dual-beam irradiation : swelling and phase stability up to high damages (same materials as above)
- MAT - 13 Electrical and mechanical properties of insulators
- MAT - 14 In-beam creep and fatigue of W and Cu

## Allegato 6

## REATTORI DI RICERCA EUROPEI PER STUDIO DEI MATERIALI

SITE	NAME	MW <sub>th</sub>	giorni/anno
Cadarache	RAPSODIE non più funzionante	40	260
Dounreay	PFR	600	270
Grenoble	SILOE	35	230
Harwell	DIDO	25	310
	PLUTO	25	310
Jülich	FRJ-2	23	240
Karlsruhe	KNK II	58	?
Mol	BR2	90	230
Petten	HFR	45	290
Saclay	OSIRIS	70	230
Studsвик	R2	50	260

PAGINA BIANCA

**NOTA  
DEL DOTTOR ANGELO CARUSO  
E RELATIVA NOTA CONTENENTE ALCUNE PRECISAZIONI  
E COMMENTI DELL'ENEA**

PAGINA BIANCA

## **RISPOSTE DI A. CARUSO AD ALCUNE DOMANDE POSTE DAI PARLAMENTARI DURANTE LA AUDIZIONE IN COMMISSIONE INDUSTRIA DEL 11.12.1986**

Onorevoli Commissari,

cercherò di rispondere ad alcune delle domande fatte durante l'incontro del 11.12.1986.

Mi limiterò a considerare le questioni legate alla Fusione a Confinamento Inerziale (FCI) trattandosi dell'attività nella quale sono impegnato da anni.

Risponderò alle domande nell'ordine in cui sono state poste. Mi permetterò inoltre di integrare, secondo il mio punto di vista, alcune considerazioni contenute nei documenti ENEA sulla fusione e di fare qualche osservazione tecnica su quanto dichiarato dal Prof. C. Rubbia nella sua audizione.

### **Tempi per il Reattore a FCI**

Una delle domande riguardava la possibilità di ridurre il tempo necessario per lo sviluppo dei reattori a fusione. Penso che nel caso della FCI questa possibilità sia reale. Infatti un impianto per la produzione di energia sarà composto da parti a basso livello di integrazione e quindi sviluppabili in parallelo una volta che siano determinati in maniera affidabile un numero limitato di dati di base.

Va precisato, a questo proposito, che si tratta di un approccio ad alto rischio; per una propria valutazione di questo dovrà essere tenuto comunque in conto il valore delle tecnologie sviluppate e le loro applicazioni in campi vari anche non prevedibili oggi (nuovi tipi di laser, nuove architetture per laser di altissima potenza, ottica ed elettroottica per alte densità di potenza, sistemi di allineamento automatico, metodi di calcolo per fluidodinamica, nuovi materiali, sistemi diagnostici per fenomeni ultraveloci, ecc.).

E' pensabile, in un clima di non emergenza, che le parti del reattore a FCI possano essere sviluppate in parallelo in un tempo dell'ordine di 10-20 anni.

### **Posizione "ancillare" dell'Europa nella FCI**

La preoccupazione espressa da uno degli onorevoli commissari che l'Europa sia in posizione "ancillare" sulla FCI è fondata; è vero in special modo per quel che riguarda la capacità di produrre i grandi sistemi necessari per esperimenti di "performance" relativi al comportamento fisico del bersaglio irradiato.

E' da notare però che all'inizio degli anni '80 il Giappone si trovava in condizioni simili a quelle europee attuali e che in soli 4 anni l'industria giapponese è riuscita a costruire interamente quello che era il laser più potente del mondo, fino all'entrata in funzione del laser Nova in USA. Questo sforzo ha anche messo il Giappone in condizione di diventare fornitore di alcune parti essenziali per lo stesso Nova (ad es. vetri al neodimio).

In Europa ci sono vari gradi di sviluppo; importanti competenze nel campo dell'ottica per laser e dei sistemi laser di grandi dimensioni esistono in Francia.

### **I laser per la FCI in Italia**

Gli unici sistemi laser italiani utilizzabili per esperimenti sulla FCI sono stati costruiti dal Laboratorio Fusione Laser del Dipartimento FUS dell'ENEA di Frascati. In questi sistemi, italiani sono: la progettazione dell'insieme (Lab. FUS-LASER), la progettazione e la costruzione del banco di alimentazione (Lab. FUS-LASER e Industria Nazionale), parte della meccanica per ottica (Lab. FUS-LASER e Industria Nazionale), sistemi di posizionamento automatico (Lab. FUS-LASER e Industria Nazionale).

La parte ottica ed elettroottica è di importazione.

### **Rapporti fra FCI e SDI**

Una domanda posta dagli Onorevoli Commissari riguardava lo stimolo che potrebbe venire alla FCI dal programma SDI soprattutto per quel che riguarda i laser o più generalmente il cosiddetto "driver" (che potrebbe essere un laser, un fascio di ioni leggeri o pesanti, o altro ancora).

Ritengo che in termini di sviluppo di concetti di base l'interazione fra i due campi potrebbe anche risultare proficua. E' quasi certo però che i sistemi a fascio per SDI saranno profondamente diversi da quelli per FCI e che le relative tecnologie divergeranno. Per esempio un elemento di differenza è che il driver per FCI dovrà funzionare per anni producendo qualche miliardo di impulsi mentre per SDI saranno richiesti sistemi che sopravvivano in stato funzionale per un numero limitato di colpi durante un attacco missilistico; dopo...

Meno stringenti sono anche le richieste relative alla durata e alla forma degli impulsi che devono essere generati da un sistema appropriato per SDI.

## La FCI in Europa

L'impressione di uno degli Onorevoli Commissari che il programma FCI italiano sia "meno strutturato" di quello sulla Fusione a Confinamento Magnetico (FCM) è molto ben fondata.

La situazione italiana è stata in parte determinata da scelte comunitarie che hanno portato alla cristallizzazione della seguente situazione.

Stato	Laboratorio FCI	Supporto
Francia	Limeil	Militare
	Ecole Polytechnique	Civile
U.K.	Aldermaston	Militare
	Rutherford	Civile
Germania	MPQ	Civile / 25% EURATOM
Italia	Frascati	Civile / 25% EURATOM

Come si può vedere le attività della RFT e dell'Italia ricevono il 25% di contributo EURATOM; questa circostanza fa sì che in principio sia le linee programmatiche che le dimensioni dello sforzo di questi paesi siano decisi anche da Francia e Regno Unito; ovviamente le attività dei laboratori francesi ed inglesi non possono essere influenzate da pareri italiani o tedeschi.

E' successo anche che per giudicare il valore dei programmi italiani e tedeschi e dare suggerimenti per il loro sviluppo sia stata formata una commissione composta da due inglesi, un francese ed un belga, (vedi allegato 1). La portata dei suggerimenti la si può valutare leggendo l'allegato medesimo.

La scelta EURATOM di tenere lo sforzo sulla FCI a circa il 2% di quello sulla FCM e di farne un programma per il "mantenimento di competenze" è stata determinata da Francia e Regno Unito. L'ex responsabile dei programmi EURATOM sulla fusione, il Prof. D. Palumbo così si è espresso in un convegno tenutosi a Frascati in novembre '86: "abbiamo a lungo lottato per fare un programma FCI europeo di maggiori dimensioni ma ci siamo sempre scontrati con l'opposizione della Francia e del Regno Unito. Il veto finale è stato posto dal Presidente della Repubblica di uno di questi Stati".

### **Problemi di classificazione militare**

La divisione sulla FCI fra i paesi europei nucleari e gli altri è legata a quelle che nei documenti EURATOM sono definite, da anni, "le possibili implicazioni militari". Non ci si riferisce ad improponibili timori di proliferazione (che avviene attraverso la fissione) o alla diffusione di riposte idee di base sulla fabbricazione delle armi a fusione essendo queste idee comunicate ufficialmente a qualche migliaio di persone, note probabilmente ad altrettante, sviluppate in qualche anno negli anni 50 e deducibili in breve tempo sulla base di comuni conoscenze degli anni 80.

Le "possibili implicazioni militari" cui si allude nei documenti EURATOM sono legate alla possibilità di simulare in laboratorio (e probabilmente in maniera mediocre) alcuni effetti delle esplosioni nucleari, possibilità da alcuni ritenuta rilevante anche in vista di un bando dei test sotterranei.

Negli Stati Uniti è ormai consistente la corrente dei ricercatori coinvolti in attività sulla FCI che sostengono l'opportunità di svolgere questo tipo di ricerca in maniera aperta. La riservatezza infatti, ormai non ha altro effetto che quello di rallentare lo sviluppo di un metodo dalle importanti potenzialità per le applicazioni civili (vedi allegato 2).

E' possibile che, svolgendo attività scientifica ad alto livello sulla FCI, i paesi non nucleari possano spingere gli altri ad abbandonare un tipo di riserbo che forse non ha altro valore che quello di "status symbol".

Il Giappone sta operando ottimamente in questa direzione (vedi allegato 2 già citato).

### **La ricerca sulla FCI in Italia**

In Italia la ricerca sulla FCI è svolta dal Laboratorio Fusione Laser dell'ENEA di Frascati. Questo laboratorio è inserito come progetto divisionale nella struttura del Dipartimento Fusione descritta in allegato 3 (riquadro cerchiato; il resto è Confinamento Magnetico o Amministrazione).

L'impegno su questa linea è circa 2% di quello sulla FCM. Ma le circostanze che hanno determinato lo scarso sviluppo dell'attività sono:

- a) il suo inserimento in una divisione ed in un progetto totalmente dedicati alla FCM;
- b) lo scarso valore dello obiettivo ad essa attribuito, cioè quello di "mantenere le competenze".

La scelta di unificare la gestione scientifica delle linee di attività FCI e FCM è una soluzione originale italiana. Poichè le due linee seguono approcci scientifici e tecnologici completamente diversi, in tutti i Paesi del mondo si è sempre seguito il criterio di separarne la gestione. Oltre che per motivi di competenza, questo criterio è dettato dall'esigenza di fare in modo che non venga soffocata la linea di attività di dimensioni minori.

L'effetto della continuamente dichiarata limitazione degli obiettivi, poi, è che solo persone disinteressate all'evoluzione della propria carriera possano richiedere di essere inserite in questa attività o vi resistano a lungo specie in un ambiente in cui altre vengono indicate come le attività di punta.

E' ben chiaro che con uno sforzo delle attuali dimensioni e nelle condizioni organizzative descritte è impossibile esser promotori di, o inserirsi in, qualunque iniziativa internazionale ambiziosa, e questo nonostante la tradizione ed il valore scientifico di alcune ricerche fatte a Frascati.

#### **Il possibile ruolo dell'Italia in campo internazionale**

Circa la possibilità che l'Italia si faccia promotrice di uno sforzo internazionale sulla FCI, secondo quanto proposto dal Prof. C. Rubbia, penso sia conveniente tener presente due circostanze:

- a) è possibile che al momento attuale i soli partner disponibili siano quei paesi non nucleari che si trovano nella stessa condizione di dipendenza energetica dell'Italia;
- b) non si può esser promotori plausibili sulla base del prestigio di qualche persona o dell'esperienza di pochi addetti ai lavori. Preliminare è la formazione di diffuse competenze ottenibili svolgendo ricerca specifica ai massimi livelli. Uno dei padri della fisica moderna, N. Bohr, definiva esperto chi per sua personale e faticosa esperienza ha trovato tutti gli errori che si possono commettere in un campo ristretto. Penso che la formazione di un gruppo di 30-40 ricercatori capaci di evitare il 20% degli errori e sottovalutazioni che si possono fare sulla FCI sia preliminare a qualsiasi iniziativa promozionale in sede internazionale.

Un atteggiamento riduttivo, osservato in qualche caso, è l'identificare la costruzione del drivers (cioè il laser o il fascio di ioni o altro) come il problema base della FCI.

E' invece conveniente tener presente che le caratteristiche del driver da utilizzare in un eventuale reattore dipendono dalla risposta del bersaglio irradiato e che questa dipende da processi fisici che avvengono al suo interno e che sono determinati anche dalla sua

struttura e composizione; sebbene ormai ci sia una certa fiducia sulla valutazione corrente dei parametri in questione, non ci sono dimostrazioni sperimentali conclusive al riguardo.

Né è da sottovalutare un diverso aspetto relativo all'importanza degli studi fisici sul bersaglio e cioè la possibilità che, tolto il riserbo, i paesi nucleari si presentino con richieste di brevetto, sul processo di fabbricazione e sulla concezione stessa di alcuni tipi di bersaglio, cioè dell'elemento di combustibile.

Svolgere ricerca solo sui driver sarebbe una errata valutazione sia sul piano tecnico che sul piano delle prospettive di sfruttamento civile del metodo.

### **Profili generali di una attività italiana sulla FCI**

Sarebbe un grande successo se il nostro paese riuscisse a svolgere un programma formativo che lo ponesse in condizione di concorrere alla promozione della ricerca sulla FCI in sede internazionale, con priorità per l'Europa; una tale attività potrebbe svolgersi lungo due linee distinte, Fisica della FCI e Sviluppo Driver, ed avere l'obiettivo di poter formulare proposte per una ricerca europea mirante alla dimostrazione della ignizione da una parte ed alla fattibilità del driver da reattore dall'altra.

In quel che segue mi limiterò ad una valutazione dello sforzo necessario per lo sviluppo della ricerca sulla Fisica della FCI.

### **Dimensionamento di una attività italiana sulla Fisica della FCI**

La ricerca sulla Fisica della FCI ha come primo obiettivo di determinare la struttura e la composizione del bersaglio e l'energia driver necessaria per raggiungere i traguardi di interesse (ignizione del bersaglio, alto guadagno energetico).

E' conveniente che il nostro paese inizi in questo campo una attività formativa nazionale della durata di 4-5 anni per mettersi in condizione quindi di proporre in sede internazionale un esperimento di ignizione all'inizio degli anni 90.

La dotazione strumentale e di persone dovrebbe essere tale da consentire esperimenti significativi, anche se di performance ridotta, su bersagli scalati per similarità fisica, in modo simile a quanto viene fatto in aeronautica quando modelli di aereo in scala ridotta vengono studiati in tunnel a vento.

Al momento attuale l'unico driver proponibile per esperimenti è il laser a Neodimio con conversione di lunghezza d'onda. Altri driver richiederebbero attività dedicata, lunga e costosa ed incompatibile con

la scala temporale assunta per gli esperimenti. Il costo di un sistema di dimensioni sufficienti per effettuare esperimenti significativi, nel senso sopra indicato, è valutabile in 10-15 miliardi di lire 1986.

L'acquisizione di questo laser, che deve essere concepito in modo peculiare per la sperimentazione e non caratterizzato come driver, potrà avvenire con il concorso dell'industria estera e di quella nazionale dove è possibile.

Sistemi di acquisizione dati, diagnostiche, ottiche di trasporto e focalizzazione, camere di irraggiamento richiederanno un impegno anche esso dell'ordine 10-15 miliardi.

Ovviamente esperimenti significativi saranno possibili soltanto disponendo di bersagli adeguati. E' questo un problema da non sottovalutare poichè si tratterà di preparare oggetti con dimensioni inferiori o dell'ordine del millimetro, geometricamente perfetti, variamente strutturati, in qualche caso criogenici e, per alcuni esperimenti, contenenti trizio.

La preparazione dei bersagli è un aspetto veramente cruciale e richiede la messa a punto di tecniche sofisticate; non è pensabile di svolgere attività sulla FCI senza autonomia in questo campo.

In Europa non ci sono, al momento, competenze significative al riguardo; se nel nostro paese, nell'ambito del programma relativo allo studio della Fisica della FCI, si riuscisse a creare una competenza valida essa rappresenterebbe una importante risorsa nazionale da far pesare in caso di collaborazioni internazionali.

E' ben chiaro però che senza una attività di ricerca sperimentale avanzata sulla fisica della FCI non sarà mai possibile dare gli indirizzi necessari per uno sviluppo utile di competenze nel campo dei bersagli. Non è facile, in questo caso, stimare un adeguato impegno finanziario; tentativamente si può valutare che sui 4-5 anni l'impegno necessario potrebbe essere dell'ordine dei 10 miliardi.

Le stime precedenti (circa 40 miliardi in totale) non includono il costo del personale nè quello degli edifici.

Le attività precedentemente descritte potrebbero essere svolte da circa 30-40 ricercatori + 30 altri comprendendo anche qualche competenza di tipo teorico-numeric.

In conclusione, si è descritta una possibile linea di sviluppo nazionale della ricerca fisica sulla FCI, che potrebbe portare il nostro paese in condizione di esser plausibile propositore oppure apprezzabile partner in campo internazionale essendo portatore di competenze cruciali.

### Considerazioni sui "driver"

Circa la questione sollevata dal Prof. C. Rubbia dell'inadeguatezza dei laser per la FCI sul piano fisico, su quello delle dimensioni raggiungibili, dell'efficienza e della ripetitività, penso sia conveniente precisare quanto segue.

Per prima cosa va detto che esistono laser capaci di emettere radiazioni di lunghezza d'onda le più diverse (0,25 - 10 milionesimi di metro). Gli esperimenti fatti hanno mostrato che la radiazione a 0,25-0,5 milionesimi di metro può essere assorbita efficacemente senza produrre altri fenomeni fisici sfavorevoli alle densità di potenza richieste dalla FCI (vedi ad es. allegato 4).

L'efficienza minima richiesta ad un driver da reattore è circa il 5% e questa può essere raggiunta da vari tipi di laser: ad esempio a Los Alamos è in costruzione un laser dimostrativo a gas capace di produrre luce di lunghezza d'onda adeguata, efficiente, dotato di ripetitività e scalabile alle dimensioni richieste per il reattore (vedi allegato 5). E' comunque chiaro che un driver per il reattore a FCI si potrà fare ed è prematuro discutere oggi quale sarà la soluzione più conveniente. E' tecnicamente necessario però precisare, sulla base delle attuali conoscenze, che non è possibile oggi programmare a costi ragionevoli esperimenti fisicamente scalati o dimostrativi con sorgenti che non siano i laser senza che gli stessi esperimenti si tramutino in ricerche sul driver e sulle complesse problematiche legate alla focalizzazione del fascio sul bersaglio.

### Aspetti di sicurezza ambientale della Fusione

Ad integrazione di quanto già detto sugli aspetti di sicurezza della fusione nei documenti ENEA, penso sia conveniente precisare quanto segue.

Dal punto di vista della sicurezza, la FCI può esser molto più conveniente della FCM, come risulta da quel tipo di studi che vanno sotto il nome di Progetti Concettuali. E' vero che questi studi sono fatti più per trovare i problemi che non per risolverli, ma le indicazioni che ne risultano sono, comunque, assai interessanti.

Nella FCI non c'è campo magnetico e quindi non esistono i problemi di sicurezza associati alla enorme quantità di energia magnetica presente (circa 200 GJ).

Nella FCI il primo elemento strutturale del reattore ("la prima parete") non è esposto al plasma e all'irraggiamento diretto dei neutroni. Seguono bassa attivazione e la impossibilità che questa parte del reattore (fortemente radioattiva ed esposta ad un possibile urto con il combustibile a 100 milioni di gradi nel caso della FCM) possa essere, sia pure parzialmente, vaporizzata.

Un recente studio (vedi allegato 6) conclude che il reattore a FCI potrebbe essere, oltre che economicamente vantaggioso, talmente poco attivato da non richiedere la qualifica di impianto nucleare (vedi allegato 7).

Un' idea della rilevanza del trizio dal punto di vista della sicurezza, può ottenersi dall'osservazione dal grafico allegato (allegato 8). Si può dedurre che, se il contenuto di trizio del reattore è inferiore o uguale a uno o due milioni di curie (circa 100-200 grammi), non si potranno creare condizioni di grave emergenza anche nelle condizioni dell'incidente più grave. Nello studio già citato (allegato 7) si sostiene che è possibile mantenere la quantità di trizio presente nel reattore a tali bassi livelli, anche se nulla è detto sulla quantità contenuta nell'impianto per la fabbricazione dei bersagli.

In conclusione i problemi di impatto ambientale sono nel caso della FCI notevolmente ridotti e comunque non si vede alcuna ragione di principio che si opponga a soluzioni soddisfacenti.

ALL.1 With Compliments from the Director (Dr Lomer)



UKAEA Culham Laboratory, Abingdon, Oxon. OX14 3DB. Telephone: Abingdon (0235) 463474

### Inertial Confinement Working Group Report

1. The CCFP-PC proposed at its meeting on 12 January that a Working Group be set up to report on the Euratom programmes on inertial confinement fusion carried out at Garching and Frascati. Dr Lomer was asked to form this working party with experts from France, U.K. and at least one of the smaller countries.
2. The terms of reference were agreed as follows
  - to examine in the world context, the activities in the civilian field of inertial confinement and the developments of the last years;
  - to review the achievements so far, and the plans for the period 1985-89 of the two European Laboratories working in that field (MPG - Garching and ENEA - Frascati);
  - to assess the relevance of these plans both to fusion and to the Euratom fusion programme.
3. The membership was Dr Lomer, Dr Peacock (Culham), Dr Balescu (Universite Libre de Bruxelles), Dr Fabre (Ecole Polytechnique). The party met at Culham on 9 March.

ALL. 1

14. The Working Party concludes that the main objectives of the 1981 Beckurts Panel are being met, that any modest increase in funding available should be used to strengthen internal European collaboration with both Euratom and non-Euratom laboratories, and that it should be a duty of the groups concerned to present a world status report every 1½ years to the P.C. The field moves rapidly and we have some anxiety that the programme should be defined as flexibly as possible, with the 5 year budget indicating areas of work and scale of funding, but not defining work in too much detail. We see no case for trying to open up any further new areas of work without a major increase in funding. We recommend that an effort extending the the co-operation inside Europe between the Euratom supported laboratories and the outside Euratom laboratories is to be made, and could will be very fruitful for progress in this field, and the maintenance of a good level capability and confidence. This funding should appear as travel funds from Euratom for exchanges of scientists for short visits or stay of 1 to several months. It seems to us that compared with a slight increase in the funding of Euratom laboratories this the best way to maintain and develop an excellent level of scientific ability in the field in Europe without too much increase of financial effort.

ALL. 2

**Progress of Inertial  
Confinement Fusion at LLNL**



**Erik Storm**

**Presented at the IAEA  
Eleventh Conference on Plasma Physics  
and Controlled Nuclear Fusion Research**

**Kyoto, Japan  
13 - 20 November, 1986**

## **“Bottom-line”**

---

- We have had a very successful last three years
  - Coupling
  - Burn physics
  - Driver strategy
  
- We have a great deal of confidence that high gain, ICF can occur in the Laboratory
  
- Questions remain —
  - Driver size
  - Eventual economics
  
- Progress is hampered by our inability to report on the full program
  - It is time for a review of classification policy

## ALLEGATO 2

Classificazione

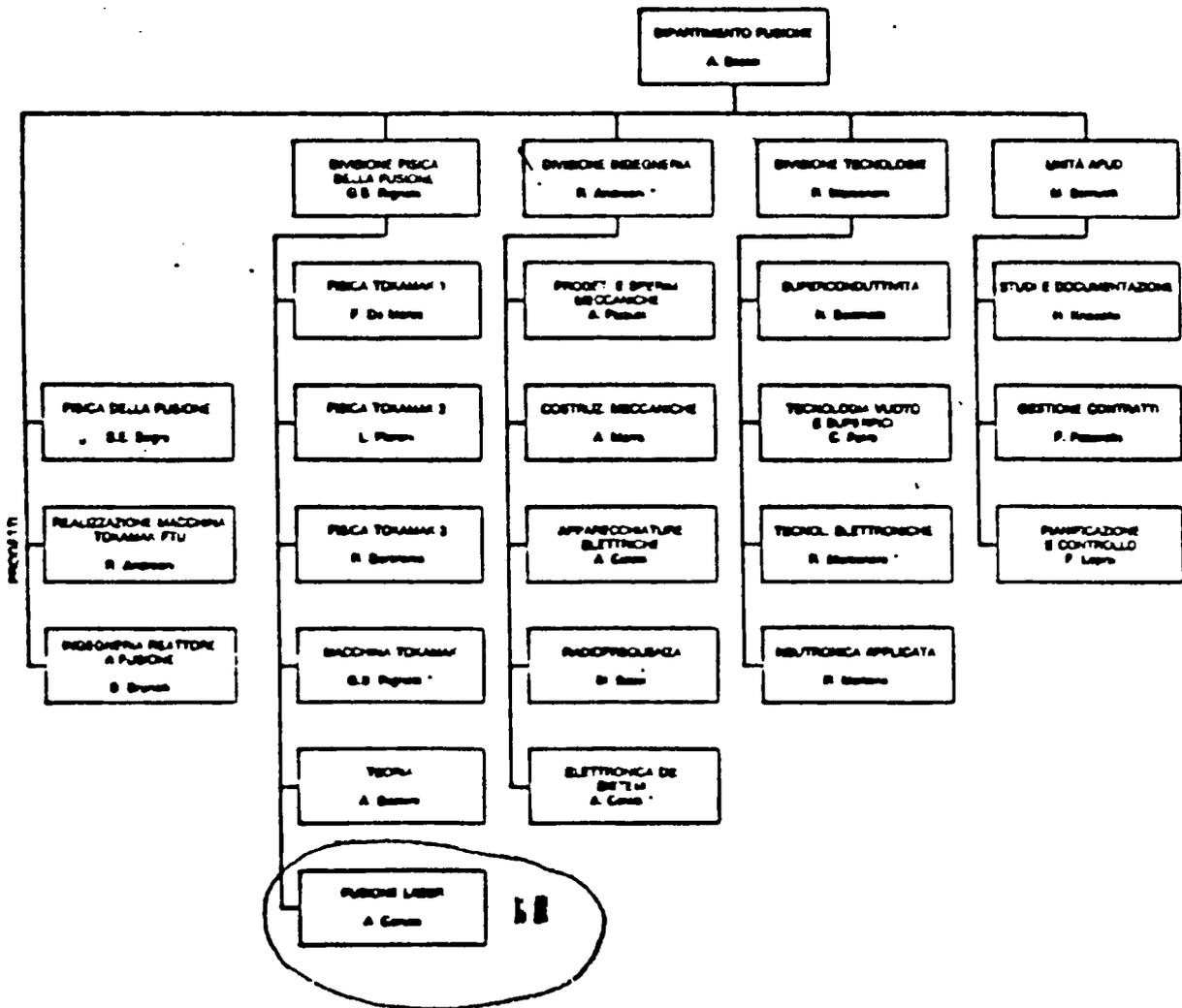
Scrive il fisico J. Cox nell'articolo "Laser Fusion in Japan", Fusion Reports Ottobre 1986:

"Negli Stati Uniti, l'informazione non è distribuita anche dentro lo stesso laboratorio. L'assurdità vi colpisce quando vi rendete conto che i giapponesi stanno facendo ricerca in aree che noi non abbiamo ancora esplorato. Essi ci hanno superato e quando tentano di pubblicare i loro risultati nessuna rivista americana li accetta. La ragione di ciò è o che quel lavoro non viene fatto ancora da noi, o che nessuno è in grado da noi di apprezzarne il valore, o che il lavoro fatto in Giappone sarebbe classificato da noi. E' ridicolo... è una farsa".

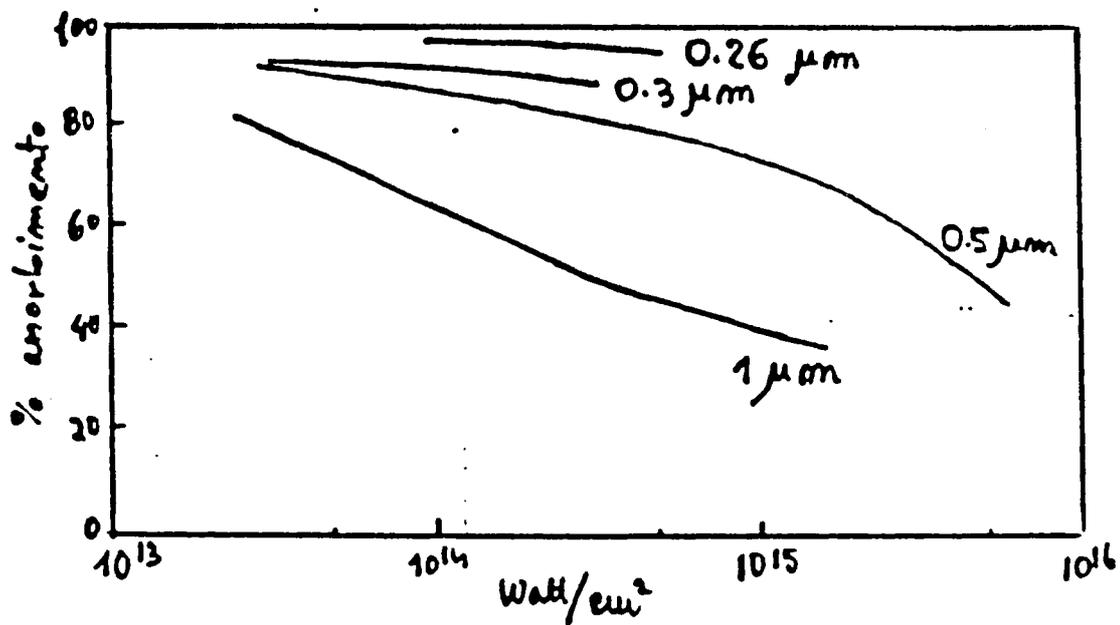
Un altro tipo di riserbo è presentato dallo stesso ricercatore nella maniera seguente: "stavo per presentare un lavoro ad una conferenza in California nel 1983, ma l'Air Force ritirò il mio lavoro e lo dichiarò classificato. Chiesi perchè, trattandosi di fisica fondamentale. Alla domanda "che vantaggio ne viene ai Russi?" essi risposero "guarda, noi abbiamo pagato 100.000 dollari per quei dati e non vogliamo che i Russi li abbiano al costo dell'iscrizione alla conferenza".

ALL. 3

Organization Chart  
December 1985



ALL. 4



Livermore Annual Report 1984

*Laser and Particle Beams* (1986), vol. 4, parts 3 & 4, pp. 569-571  
Printed in Northern Ireland

ALL. 5

## Excimer laser development for fusion

By D. GIOVANIELLI

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545

(Received 3 April 1986)

The future utility of inertial confinement fusion requires a new driver. Successful experiments coupling laser energy to targets, and our understanding of fuel capsule behavior strongly suggest that a Laboratory thermonuclear source is attainable and power production may be considered if a suitable driver with high efficiency, high repetition rate, and most importantly, low capital cost, can be identified. No adequate driver exists today; however, the krypton fluoride laser holds great promise (Rosocha *et al.* 1986). By the end of this decade, driver development can be brought to the point that a technically justifiable choice can be made for the future direction of ICF.

---

The understanding we have gained through research on inertial confinement fusion (ICF) has led us to a rather well substantiated and stringent set of requirements. We now know, for example, that for ICF to represent a potential future large-scale energy source, we need: (1) a driver with a wall-plug efficiency (drive energy out compared to electrical energy input) of at least 7% at a repetition rate greater than 5 Hz, (2) a target gain such that the product of target gain and driver efficiency exceeds 5, and (3) a strong technical justification for eventual low capital cost. In fact these requirements depend on what other alternative power sources are available in the next century, but generally they represent a set of minimum criteria which must be met if ICF is to be an economically competitive source of energy.

Although we have made great progress in our understanding of driver-target coupling and in the design of fusion capsules, we today have no driver capable of testing our high-gain designs, and certainly no proven driver which could be scaled to use in power production. One of the most promising drivers to be considered, the CO<sub>2</sub> laser, was indeed efficient, scalable, and capable of high repetition rate operation. However, detailed examination of the physics involved when high intensity long wavelength laser light irradiates target materials has shown that significantly shorter wavelengths than that obtainable from CO<sub>2</sub> lasers will be necessary as well. In fact, our data and calculations have shown that, to optimize the laser-target interaction process we would prefer to have a wavelength in the region of 200 nm.

Ion drivers have been considered for some time, and such drivers have the immediate advantage of high efficiency. Light ion drivers offer low capital cost but have not been able to demonstrate either high power density, high repetition rate, adequate temporal history of the pulse, or sufficient stand-off distance between target and driver. Work continues at several laboratories to address and solve these problems, but we cannot be guaranteed of successful solutions today. Heavy ion drivers offer the potential of high efficiency and high repetition rate but at considerably higher cost than light ion drivers and the issues of obtaining adequate stand-off (beam propagation) and pulse shaping are still major questions.

Lasers, with their coherent output are focusable to high power densities and provide the necessary target stand-off; but to find a single laser which satisfies all necessary ICF

criteria at once is not a simple exercise. After an exhaustive examination of possible laser candidates we have come to the conclusion that the krypton fluoride (KrF) excimer laser holds great promise as a future ICF driver.

The KrF laser can be constructed with a high efficiency, exceeding 8%, and a high pulse repetition rate, since the lasing medium is a gas. Its output at 248 nm is near optimum for coupling to ICF targets, without any added complications of wavelength shifting. A detailed examination of the costs for a large KrF laser suggest that a total system cost of less than \$90/J should be possible for a laser which produces 10 MJ output, in a short, temporally shaped pulse. Achieving such a low cost will require development of manufacturing capabilities to incorporate known techniques for the production of large optical components.

There are, of course, technical issues associated with the KrF laser which must be addressed before a definite statement can be made as to their future use in ICF. Moderately large KrF lasers have been constructed, but issues of scaling to very large size while maintaining (and improving, somewhat) overall efficiency have yet to be addressed experimentally. Since the excimer is not a storage laser, some technique must be used to obtain the short pulses, with the required temporal dependence necessary for fusion. This must be done without sacrificing either efficiency or cost. There are two approaches which have been identified to accomplish the necessary pulse shortening—optical angular multiplexing or Raman, nonlinear compression. Since we expect a significant loss in efficiency with a nonlinear optical scheme, we have chosen optical multiplexing as the most likely technique to meet the ICF requirements.

Using optical multiplexing provides a large number of individual beamlets which can be added together at the target with suitable individual delays to obtain a required temporal pulse shape. In fact, our calculations tell us that with only twenty-two beamlets passing sequentially through a high-efficiency amplifier we can reconstruct a temporal shape required for one of the most demanding high-gain target designs. The individual beamlets are not all of the same time duration but the production of such segments is a relatively simple exercise in the front end of the laser system.

The optical complexity introduced by multiplexing is another issue to be addressed because of the apparent large number of control points involved. Optical multiplexing is an issue which would probably be faced with any large laser system since it would be required to obtain adequate efficiency by multipassing amplifiers. With the KrF laser, we are addressing this question from the start. The optical design we have developed requires that only four mirrors be controlled for each beamlet throughout the system, a number comparable to many other multibeam laser systems. In a recent test we have demonstrated the simultaneous alignment of 96 beams to 5  $\mu$ rad precision in a total of eight minutes (Kortegaard *et al.* 1985). Individual mirror motions were controlled by a small computer which also performed the image analysis, making use of statistical techniques employing inherent noise. This alignment scheme is being incorporated into an end-to-end laser system which will demonstrate operation of a complete KrF laser architecture and its utility for ICF target experiments.

Efficiencies of four to seven percent have been demonstrated. We believe, for single pulse operation, this efficiency can be increased to greater than ten percent principally by advances to be made in the deposition of electrical energy into the laser gas and increases in the intrinsic efficiency. Since the KrF laser is pumped by electron beam deposition into the krypton fluoride gas mixture, significant efficiency improvements can be made if care is taken to make use of all electrons emitted from the cathode. Segmented cathodes, expanding flow (B field embedded) diodes, and properly chosen

*Excimer laser development for fusion*

571

electron beam window support geometries can improve electrical energy deposition by approximately 25%. Using krypton-rich gas mixtures will improve the intrinsic laser efficiency from 11% to 16%.

Another important issue, as we mentioned, is cost. KrF amplifiers, and, as we have demonstrated, control systems are relatively inexpensive. However, a major cost is that for optics, in particular the ultraviolet optics required to operate at 248 nm wavelengths. The manufacture of optics for a very large laser system would, of course, require increased manufacturing capability. In collaboration with industrial optics manufacturers we have determined that large optics (two meter diameter) could be manufactured for less than \$20/cm<sup>2</sup> using conventional technologies. If new (but demonstrated) techniques were employed for substrate production, coating and polishing, this cost could be brought down to less than \$10/cm<sup>2</sup>. Incorporating these costs into a conceptual design for a 10 MJ output KrF laser system leads us to a total optics cost which is just 24% of the total system cost. This system assumes operation at a fluence of 3 J/cm<sup>2</sup> at the most stressing point.

In a program we have carried out for the past three years to identify damage mechanisms in ultraviolet optics and use that information to attempt to improve optical coatings, we have been able to increase damage thresholds to acceptable levels. Both high reflectance and anti-reflectance coatings, either fluorine compatible (for use in amplifiers) or not have been studied. Anti-reflectance coatings for use in nonfluorine environments can now be made with damage thresholds of approximately 12 J/cm<sup>2</sup> while such coatings for use with fluorine show thresholds for damage at about 2.5 J/cm<sup>2</sup>. High reflectance coatings are achievable with 4 J/cm<sup>2</sup> (fluorine compatible) and 7 J/cm<sup>2</sup> (no fluorine) damage thresholds. Utilizing these coatings in the manufacture of large optics would satisfy the requirements for a large KrF fusion laser.

At Los Alamos we are constructing a complete system, named Aurora (Rosocha *et al.* 1986), which will demonstrate end-to-end operation of a multiplexed KrF laser. This laser will produce in excess of 5 kJ in a short (5 ns) pulse which can be used to irradiate ICF targets. Completion of this system is scheduled for 1987. The final amplifier, named LAM, has been built and operated. This amplifier has a 1 m × 1 m output aperture and has produced approximately 13 kJ of laser light in a pulse length slightly less than half a microsecond. In this experiment the LAM, which was not designed to demonstrate high efficiency, nevertheless achieved an intrinsic efficiency in excess of 6% and an overall efficiency of greater than 2%. In separate, smaller experiments, using higher krypton concentrations, intrinsic efficiencies exceeding 13% have been achieved. Aurora will be an integrated test bed for examining: front ends, angular optical multiplexing, beam control, amplifier staging, nonlinear optics and target physics.

An eventual fusion laser capable of driving targets to high gain may require significantly larger amplifier modules than the LAM. At Los Alamos we are progressing toward amplifier scaling experiments to address issues including: high intrinsic efficiency in a large volume, minimum magnetic guide field requirements, *e*-beam diode segmentation (expanding flow), large cathode performance, maintenance and reliability, and advanced mirror and window technology. We expect to have completed these experiments by 1989. That is also the appropriate time scale to have addressed the issues for light ion and other laser drivers as well.

At that time it will be possible to examine all ICF driver technologies to determine if we can indeed look to ICF for a Laboratory thermonuclear source and an eventual source of power.

572

*D. Giovanielli*

## REFERENCES

- KORTEGAARD, B. L. 1985 *Proceedings of SPIE Symposium on Optical and Electro-optical Engineering*, (to be published).
- ROSOCHA, L., BOWLING, P., BURROWS, M., KANG, M., HANLEN, J., MCLEOD, J. & YORK, G. 1986. *Laser and Particle Beams*, 4, 55.

ALL. 6  
**GA Technologies**

**GA-A17842**

**Final Report**

**INERTIAL CONFINEMENT  
FUSION REACTION CHAMBER AND  
POWER CONVERSION SYSTEM STUDY**

by

**I. MAYA            R.J. PRICE  
K.R. SCHULTZ    J. PORTER  
R.F. BOURQUE    H.L. SCHUSTER  
E.T. CHENG       M.T. SIMNAD\*  
R.L. CREEDON    D.L. SONN  
J.H. NORMAN     ING TANG  
R.K. WISE**

**Work supported by  
Lawrence Livermore National Laboratory  
Subcontract 2632605 under  
Department of Energy Contract No. W-7405-ENG-48**

\*University of California, San Diego

**GA PROJECT 3400  
OCTOBER 1985**

(FCI)

ALL. 6

The Cascade plant possesses many inherent (passive) safety features (see subsection below) which may avoid the need for nuclear-grade systems and components and dedicated safety systems, and may allow conventional (fossil plant) construction methods. The capital cost of the Cascade plant with conventional construction is \$1500M (\$1800/kWe), resulting in a Cost-of-Electricity (COE) of 34 mills/kWe-hr. It is possible that future safety analysis of the Cascade plant or more stringent licensing guidelines may result in additional safety requirements or nuclear qualification of

Cascade equipment. The capital cost of the Cascade plant with nuclear-grade construction and component qualification would be \$1900M (\$2400/kWe), resulting in a COE of 41 mills/kWe-hr. In either case, these costs are competitive with the 37, 40, and 49 mills/kWe-hr costs for LWR, HTGR, and coal plants calculated using the same economic groundrules. Individual features of the Cascade plant are summarized in the following subsections.

\$ 1985 , 2005 operation date

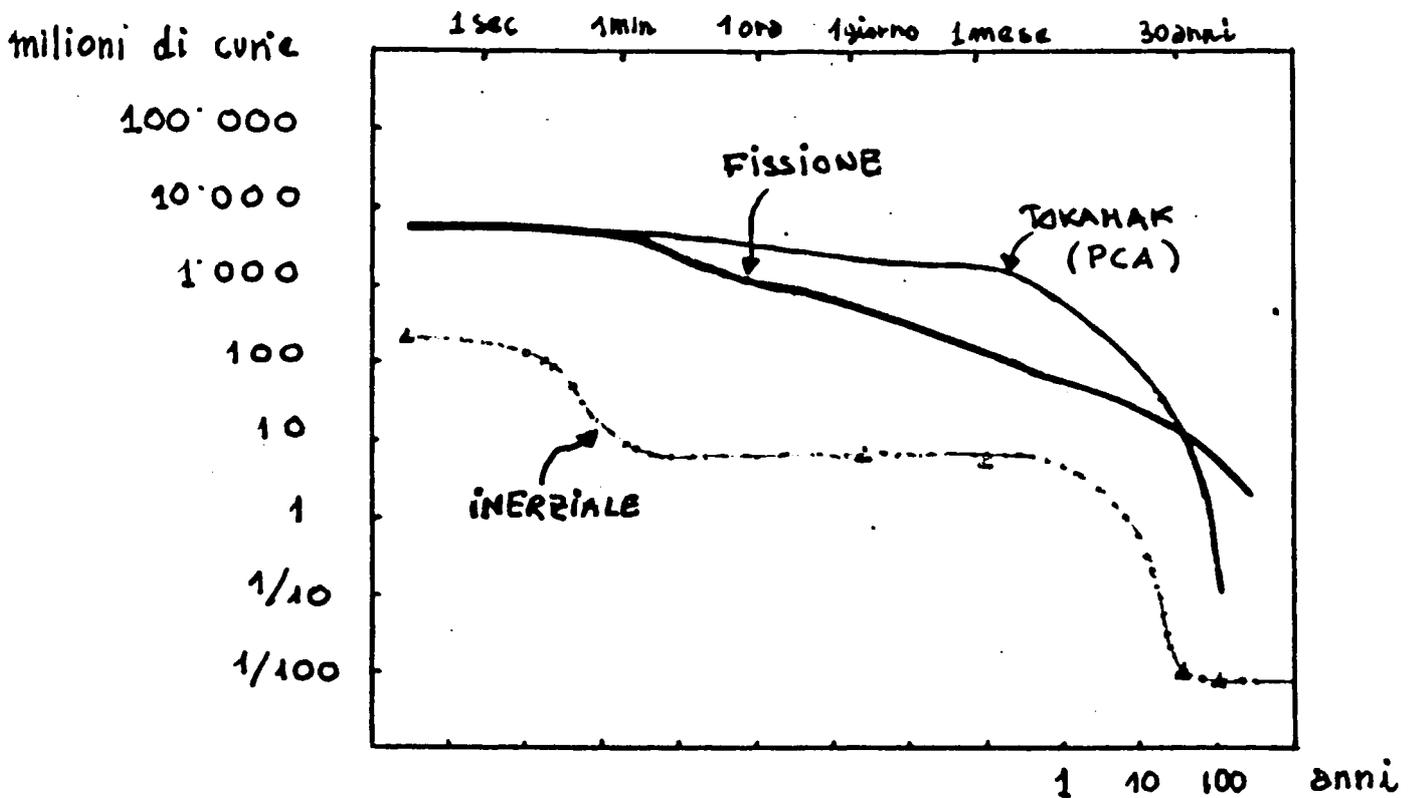
ALL 7

FISSIONE PWR (R. WILSON, NATURE 1973)

FUSIONE { TOKAMAK (STARFIRE, H.S. KAZIMI, NUCL.FUS. 1985)  
 INERZIALE (CASCADE, J.A. BLINK, LIVERMORE REP. 1983)

PCA (PRIMARY CANDIDATE ALLOY): 64.9% Fe, 14% Cr,  
 16% Ni, 2% Mo, 2% Mn.

.....  $N^{16}$ ,  $Fe^{55}$ ,  $C^{14}$



- RADIOATTIVITA' IN FUNZIONE DEL TEMPO  
 DOPO LO SPEGNIMENTO: ATTIVAZIONE DELLE  
 STRUTTURE.

ALL..8

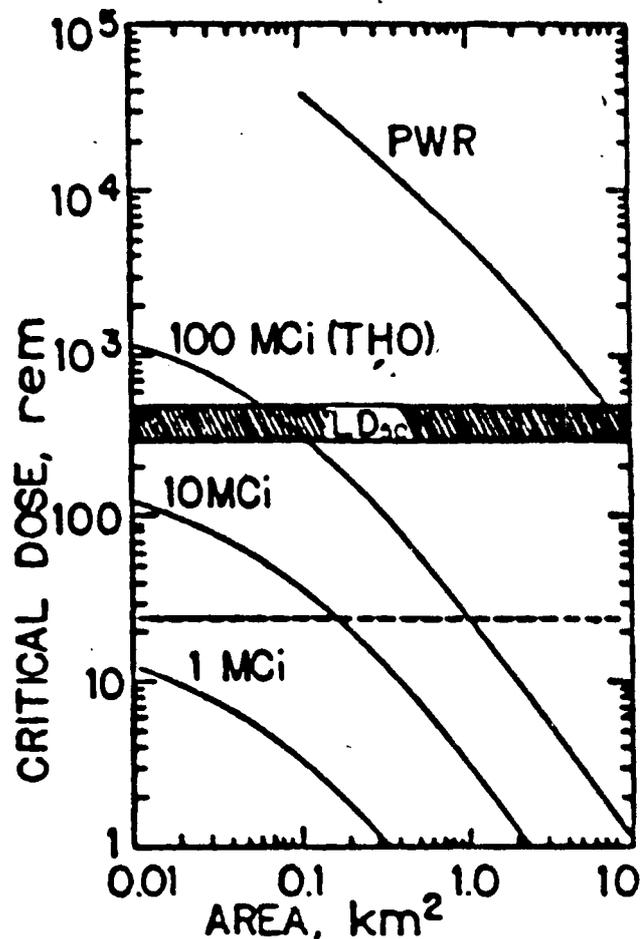


Fig. 28B5. Critical dose to bone marrow vs. area receiving that dose for "worst possible case" accidents of a fission reactor (PWR), of fusion reactors with various tritium (THO) releases. A dose of 25 rem is considered an emergency (dashed line). "Critical dose" means 100 % of the dose delivered in the first seven days plus half the dose delivered from days 8 to 30. The LD<sub>50</sub> is the dose fatal within 60 days to half those exposed, in the absence of heroic medical measures. From J. P. Holdren, *Science* 200, 168-180 (1978), Fig. 4. Copyright 1978 by the American Association for the Advancement of Science.

Alcune precisazioni e commenti dell'ENEA alla nota di A. Caruso in risposta alle domande poste dagli onorevoli Deputati durante l'audizione in Commissione Industria dell'11.12.1986 sulle prospettive della ricerca sulla fusione in Italia

#### **Tempi per il reattore a fusione a confinamento inerziale**

Non e' realistico affermare genericamente che le parti del reattore possono essere sviluppate in parallelo in un tempo dell'ordine di 10-20 anni. Va precisato inoltre che la realizzazione e la messa in funzione del reattore nel suo complesso non puo' richiedere meno di altri 10 anni.

#### **La fusione a confinamento inerziale in Europa**

Non si capisce bene se l'assunto della nota e' che Francesi e Inglesi boicotterebbero la fusione come sforzo europeo perche' non ci credono o perche' la vorrebbero sviluppare ognuno per conto proprio. L'ipotesi che il freno sia dovuto al segreto militare sembra infatti smentita da quanto esposto dal successivo paragrafo, che peraltro e' molto parziale a favore della fusione nel confrontare i rischi relativi di proliferazione posti dalle due tecnologie. In realta' il problema di fondo e' se convenga a livello di paesi europei una strategia di concentrazione delle risorse sull'obiettivo confinamento magnetico o se sia piu' saggio investire anche sul confinamento inerziale. Finora si e' scelta la strategia della concentrazione. Puo' essere opportuno rivedere questa scelta, ma e' necessario che l'Italia si muova in questa direzione, se intende farlo, sempre stimolando i partners europei mantenendo l'attuale quadro di intensa collaborazione europea in atto.

#### **La ricerca sulla fusione a confinamento inerziale in Italia**

Non e' pensabile che l'ENEA persegua tutti gli obiettivi programmatici al massimo dell'intensita' di risorse a livello mondiale. Soprattutto non deve suscitare sorpresa, come invece

appare dalla nota, che le risorse destinate siano coerenti con il limitato obiettivo dichiarato e perseguito di "mantenere le competenze", in accordo con le scelte adottate in sede comunitaria. L'organizzazione strutturale adottata presso il Dipartimento Fusione dell'ENEA e' stata quindi anch'essa adeguata al limitato obiettivo finora perseguito.

### Il possibile ruolo dell'Italia in campo internazionale

Corretta l'affermazione che se si vuole "cambiare scala" di impegno la dimensione necessaria e' quella di 30-40 ricercatori.

Corretta anche l'affermazione che identificare la costruzione del driver (il sistema laser o fascio di ioni che da' energia al combustibile) come problema base della fusione e' solo parzialmente vero: concentrarsi solo su questo sub obiettivo potrebbe essere sbilanciato, in quanto la preparazione di adeguati bersagli e in generale la fisica dell'interazione luce-bersaglio o ioni-bersaglio sono vitali per conseguire l'obiettivo fusione.

Quanto alla opportunita' e alle modalita' di avvio di una piu' ampia collaborazione europea sulla fusione inerziale e in questo ambito di un notevole sviluppo delle attivita' italiane nel settore, si rinvia alle valutazioni espresse nella relazione introduttiva del Presidente dell'ENEA "Il primo passo per l'auspicabile collaborazione internazionale dovrebbe essere un impegno volto a integrare a livello europeo le iniziative a diverso titolo gia' in corso sul confinamento inerziale e sulle tecnologie connesse. Nel quadro di un nuovo programma europeo aperto anche a piu' ampie collaborazioni internazionali, il nostro livello di sforzo sulla fusione a confinamento inerziale potrebbe convenientemente essere incrementato. Riteniamo di avere acquisito, con l'attivita' fin qui svolta anche al di fuori del settore strettamente fusionistico, le premesse sufficienti per rendere fattibile un tale sviluppo".

**NOTA  
DEL PROFESSOR GIORGIO ROSTAGNI**

PAGINA BIANCA

**RISPOSTA AD ALCUNI DEI QUESITI FORMULATI DALLA COMMISSIONE INDUSTRIA  
DELLA CAMERA DEI DEPUTATI NELL'AUDIZIONE DELL' 11-12-86**

(GIORGIO ROSTAGNI)

Desidero anzitutto ringraziare vivamente per l'opportunità che mi è data di partecipare al dibattito in corso su un tema al quale ho dedicato gran parte della mia attività scientifica.

Poichè condivido integralmente quanto illustrato dal prof. Colombo, ritengo di dovermi limitare ad alcune brevi notazioni in risposta ai quesiti formulati. In particolare tre osservazioni derivanti dall'esperienza di avvio del Progetto RFX e tre commenti personali su problemi più generali.

**1. L'importanza della collaborazione internazionale**

L'Europa ha conseguito una posizione di primo piano nelle ricerche sulla fusione grazie ad un programma unitario ed integrato, con meccanismi che hanno consentito di finalizzare e coordinare efficacemente tutte le risorse dedicate.

La possibilità di articolare un programma, dell'ampiezza necessaria per garantire il successo finale dell'impresa, in alcuni obiettivi centrali ed una serie di obiettivi complementari, di graduare la ripartizione delle risorse tra sinodi esperimenti di grandi dimensioni (JET, NET), poche macchine intermedie (FTU, TORE SUPRA, RFX ecc.) e molti piccoli esperimenti, esiste solo su aree economiche abbastanza vaste, come quella Europea.

RFX, in particolare, è frutto di questa logica, che vede l'impegno sulle linee alternative affiancare quello sui Tokamak, in scala complessiva più modesta ma con singole realizzazioni di dimensioni equivalenti; ciò ha consentito ad un progetto, nato dalla collaborazione tra Culham (U.K.) e Padova per essere realizzato in Inghilterra, di venire trasferito in Italia senza difficoltà, con il completo travaso di conoscenze ed esperienza, in una collaborazione che prosegue a ruoli scambiati.

Partendo da questa esperienza e da quella - più personale - che mi deriva dall'aver partecipato per oltre quindici anni, in vari ruoli, al processo di definizione del programma europeo, ritengo di dover affermare che anche il potenziamento delle ricerche sulla fusione, anche il tentativo di accelerare il raggiungimento dell'obiettivo deve essere affrontato su scala europea: un raddoppio delle risorse europee può essere significativo, un raddoppio solo di quelle italiane può dare benefici complessivamente marginali, anche se portasse a brillanti risultati su specifici problemi.

## 2. L'arco di tempo necessario per realizzare nuovi esperimenti

E' esperienza comune che per costruire un esperimento di medie dimensioni come RFX, occorrono almeno cinque o sei anni, dopo lo sviluppo di un progetto di massima sufficientemente dettagliato e la sua completa approvazione: da uno a due anni per sviluppare il progetto esecutivo ed avviare i principali contratti di realizzazione, almeno due anni per la costruzione dei componenti critici, da uno a due anni per installare e provare tutte le parti dell'impianto e per metterlo in funzione.

Nel caso di RFX, dovendo stabilire la collaborazione tra più Enti e formare un gruppo di progetto molto più ampio del nucleo esistente, la prima fase ha richiesto circa tre anni.

Tra le cause vorrei citare:

- la difficoltà di assunzione di nuovo personale, ed a questo proposito un esempio concreto mi sembra significativo: l'aumento dell'organico di personale dell'Istituto Gas Ionizzati, incluso nel pacchetto di impegni del CNR, posto a base della delibera del CIPE dell'ottobre '83 che autorizzava la realizzazione di RFX, dopo un estenuante ping pong tra CNR e Ministeri Vigilanti, è tuttora bloccato;
- una normativa estremamente restrittiva, che rende praticamente impossibile usufruire di collaborazioni occasionali, indispensabili per un'impresa che si evolve rapidamente nel tempo;
- un iter burocratico lungo e complesso per ogni gara di appalto, che costituisce una parte non trascurabile dell'intero tempo di realizzazione del progetto.

Dato che, molto positivamente, si parla qui di accelerare lo sviluppo delle ricerche sulla fusione, vorrei con la menzione di questi problemi porre l'attenzione sul fatto che tra i programmi e la loro attuazione proprio in Italia c'è un grosso divario ed i tempi risultano spesso più lunghi del necessario.

Ed è probabile che sia così anche per eventuali nuove imprese se - al momento di deciderle - non si affrontano in modo organico tutti gli aspetti normativi ed organizzativi.

### 3. Collaborazione con le Università

E' stato chiesto se esistono problemi di risorse umane, di competenze adeguate per accelerare i programmi e se è possibile superarli con un maggiore coinvolgimento dell'Università: certamente il limite principale all'accelerazione delle ricerche non è finanziario ma di risorse umane. Ritengo che dall'Università possano venire contributi validi ed importanti, ma limitati.

Premetto che la realizzazione di RFX è basata su una rilevante partecipazione universitaria ed io stesso sono universitario. Questa partecipazione ha però origini remote e si è sviluppata gradualmente. Quando, nel passare da progetti più limitati ad RFX, si è dovuto allargarla sono emerse alcune difficoltà. Anzitutto perchè le ricerche sulla fusione richiedono un lavoro di gruppo a lungo termine, con forme organizzative abbastanza lontane dalla tradizione universitaria, più libera e spontaneistica, ed inoltre con una forte prevalenza di problemi tecnici e pratici, poco redditizi per una carriera accademica.

Ciononostante l'Università può fornire competenze qualificate per la soluzione di problemi specifici, con la collaborazione di persone mature a tempo limitato.

Questa potrebbe essere molto potenziata dalla collaborazione di un adeguato numero di giovani, che oggi mancano nell'Università italiana perchè si è voluto farne un ambiente chiuso, in cui entrano solo persone destinate a restarvi fino alla pensione. Altrove l'Università, attraverso il sistema del dottorato di ricerca, attraverso contratti di ricerca a tempo determinato, costituisce il naturale vivaio cui attingere per nuove imprese tecniche o scientifiche.

#### 4. Tempo prevedibile per giungere alla possibilità di realizzare centrali elettriche a fusione

Gran parte degli addetti ai lavori parlano di 40-50 anni, suscitando un certo disagio negli interlocutori e la domanda se sia possibile accelerare.

Vorrei sottolineare come 50 anni sono un tempo breve nella scala delle tecnologie energetiche.

Corrispondono pressapoco alla vita di una centrale o al tempo per realizzare in successione tre grossi esperimenti (tra progetto, costruzione e sperimentazione).

Ora, per la fusione con confinamento magnetico, si ritiene possano essere necessari da 5 a 10 anni per completare la dimostrazione di fattibilità scientifica, da 15 a 20 anni per realizzare e collaudare prototipi di reattori che consentano la sperimentazione sui principali aspetti tecnologici, dai 15 ai 30 anni per lo sviluppo di prototipi con affidabilità e costi idonei all'impiego commerciale.

Per la fusione inerziale, se anche la fattibilità scientifica potesse essere dimostrata più o meno nello stesso tempo, se è vero che una parte dei problemi tecnologici potrebbe venire risolta indipendentemente ed in parallelo come sottoprodotto di ricerche militari, almeno 10 anni sembrano indispensabili per la sperimentazione di prototipi capaci di dimostrare la fattibilità tecnologica e, di nuovo, da 15 a 30 anni per prototipi commerciali.

In questo quadro un aumento delle risorse per la fusione può essere molto utile per consentire di esplorare più alternative in parallelo, al fine di giungere ad ottimizzare la scelta finale e di evitare un allungamento dei tempi, qualora qualche risultato fosse meno favorevole del previsto.

Tuttavia ben difficilmente può accorciare in misura significativa il tempo minimo.

#### 5. Confinamento inerziale

Non si tratta di una alternativa ma di un gruppo di alternative, ciascuna con vantaggi e svantaggi potenziali.

Nel complesso il suo sviluppo richiede risorse confrontabili con

quelle della fusione magnetica.

Ha senso dedicarsi se si ritiene di poter mettere in gioco risorse finanziarie, umane e tecnologiche di quell'ordine di grandezza, perciò in particolare se si riesce a far nascere, con la necessaria gradualità, un programma Europeo equivalente a quello magnetico e con le stesse caratteristiche di coordinamento e integrazione.

L'Italia può utilmente adoprarsi per giungere a questo, ma sarebbe illusorio credere di poter fare da soli.

#### 6. Partecipazione al programma tecnologico

Si è rilevata una scarsa presenza italiana in certi settori della ricerca tecnologica per la fusione.

Vorrei osservare che la possibilità di contributo, in ogni settore, dipende dal livello di sviluppo precedentemente raggiunto.

Nella tecnologia degli esperimenti, la competenza italiana sia nei laboratori che nelle industrie si è sviluppata gradualmente per almeno venti anni e riguarda settori in cui l'Italia è tradizionalmente forte (ad es. quello elettromeccanico).

Per i futuri reattori e per il NET si devono sviluppare le tecnologie nucleari in genere e quelle dei materiali in particolare: è necessario prendere atto che in tali settori lo sforzo italiano è sempre stato piuttosto limitato ed una crescita improvvisa non è possibile. Vale la pena di porvi attenzione, ma richiederebbe programmi di sufficiente ampiezza e perciò non finalizzati solo alla fusione.

PAGINA BIANCA

**NOTA  
DEL PROFESSOR SERGIO SEGRE**

PAGINA BIANCA

Appunto per la Commissione Industria della Camera,  
in risposta alle domande sulla fusione nucleare  
degli onorevoli deputati

(S. Segre)

1. Desidero prima rispondere alla domanda dell'on. Grassucci sulle difficoltà oggettive che incontrano oggi gli operatori nel campo della ricerca scientifica sulla fusione nucleare in Italia. Siamo in una situazione paradossale. Nel momento in cui si parla, in diverse sedi, di allargare il fronte delle ricerche e di aumentare le risorse, i fondi disponibili sono stati ridotti e per il 1987 siamo in gravi difficoltà per fare ciò che era stato già pianificato. Infatti la recente riduzione degli stanziamenti per l'ENEA comporta che, nonostante un trattamento di favore per la fusione all'interno dell'ENEA, i fondi disponibili al Dipartimento Fusione di Frascati per l'acquisizione dei nuovi impianti e della strumentazione necessaria saranno nel 1987 ridotti circa del 40%, provocando ritardi gravosi rispetto a quanto previsto nella programmazione congiunta ENEA-Euratom.

Inoltre vi è da segnalare una carenza di laureati nel programma fusione italiano già in relazione alle attività in corso. Questa situazione appare chiaramente quando si fanno confronti con i programmi fusione di altri paesi europei che hanno progetti simili per dimensione ed impegno (Francia, Tore Supra; RFG, Asdex U; Italia, FTU, RFX, Ignitor).

2. Sulla possibilità di accelerare i tempi richiesti perchè la fusione diventi una fonte energetica viabile, è vero che per la fattibilità tecnologica e poi per l'industrializzazione, come ha indicato il prof. Colombo, una certa accelerazione sarebbe possibile, se fosse effettivamente richiesta, attraverso un "crash program" (tipo il progetto Manhattan) che accetti una forte ridondanza di linee di attività, con alti rischi di insuccesso per alcune di esse e con alti costi. Tuttavia per la fattibilità scientifica della fusione (cioè il raggiungimento dell'ignizione e la soluzione di eventuali problemi di un plasma ignito) è più difficile fare previsioni. Trattandosi ancora di ricerca scientifica è sempre possibile la scoperta di fenomeni nuovi, per cui la valutazione di cinque o dieci anni per la dimostrazione della fattibilità scientifica va presa con cautela.

3. Infine è innegabile che un reattore a fusione richiederà molte delle tecnologie nucleari sviluppate o in corso di sviluppo per i reattori a fissione. Per questa ragione una decisione di arresto sulla fissione, che coinvolga anche la ricerca e lo sviluppo tecnologici nel campo della fissione non può non avere un effetto negativo sullo sviluppo della fusione.
  
4. L'università italiana già oggi dà un contributo sia alla ricerca sperimentale e teorica sulla fusione (anche attraverso i laboratori del CNR di Milano e di Padova), sia ad alcuni aspetti della tecnologia. E' auspicabile che in futuro queste attività si possano sviluppare ulteriormente in relazione ai progetti oggi avviati in Italia e in Europa.

Inoltre l'università ha il compito importante della formazione dei giovani ricercatori che sono necessari per un adeguamento delle risorse umane del programma fusione alle esigenze già dei progetti oggi in corso.

**LETTERA INVIATA AGLI ESPERTI  
A LIVELLO INTERNAZIONALE**

PAGINA BIANCA

*Testo della lettera inviata, nel novembre 1986, dal Presidente della XII Commissione industria Michele Viscardi ai professori Furth (Stati Uniti), Horowitz (Francia), Mori (Giappone), Kadomtsev (Unione Sovietica), Pease (Gran Bretagna), Pinkau (Repubblica federale di Germania), Trivelpiece (Stati Uniti), Velikov (Unione Sovietica) e Yamanaka (Giappone) con la quale sono stati posti taluni quesiti sulla « fusione nucleare »:*

Gentile Professore,

quale Presidente della Commissione industria della Camera dei Deputati, desidero renderLe noto che la Commissione ha deliberato di dar luogo ad audizioni sullo stato della ricerca sulla fusione nucleare quale mezzo per produrre energia, sulle prospettive della ricerca diretta a realizzare il reattore e sui problemi di sicurezza.

A tale fine, la Commissione ha invitato numerosi esperti italiani, ma intenderebbe anche acquisire le valutazioni ed i punti di vista di scienziati stranieri.

L'indagine è diretta, in modo particolare, a chiarire i seguenti aspetti:

(i) quale linea di sviluppo (confinamento magnetico, confinamento iner-

ziale e catalisi muonica) è più promettente ai fini della costruzione di un reattore da fusione;

(ii) quali passi devono essere compiuti allo scopo di realizzare un prototipo di reattore da fusione e, quindi, costruire un reattore « commerciale », e l'arco di tempo giudicato necessario per l'intero progetto;

(iii) in quale modo la cooperazione internazionale potrebbe contribuire a ridurre le risorse necessarie, ed il tempo previsto per realizzare il progetto; e

(iv) il possibile impatto della linea del Tokamak compatto sul progetto di reattore e, in questa prospettiva, quanto sia giudicato utile il progetto « Ignitor ».

Saranno molto gradite le sue valutazioni sul programma italiano per la fusione, nell'ambito dell'impegno europeo, ed i suoi suggerimenti sui possibili miglioramenti.

Le esprimo la gratitudine dei componenti la Commissione e mia personale per la sua gentile collaborazione.

Resto in attesa di ricevere le sue osservazioni in vista della decisione finale che la Commissione prevede di adottare entro la fine del 1986.

PAGINA BIANCA

**NOTE DI RISPOSTA RESE DAGLI ESPERTI  
A LIVELLO INTERNAZIONALE**

PAGINA BIANCA

**NOTA DEL PROFESSOR HAROLD FURTH**

PAGINA BIANCA

8 gennaio 1987

Gentile Presidente,

la mia risposta giunge con un certo ritardo e quindi è opportuno che sia succinta:

(i) il confinamento magnetico con il sistema Tokamak è progredito maggiormente verso gli obiettivi di attuazione del reattore rispetto al confinamento inerziale, ma non sono ancora disponibili dati sufficienti per poter assumere una decisione realistica circa il relativo potenziale economico.

La catalisi muonica non appare altrettanto promettente per la produzione di energia dalla fusione pura, mentre potrebbe dimostrarsi efficace nel quadro di una economia ibrida fusione-fissione.

(ii) Nel quadro del programma relativo alla fusione magnetica, il primo reattore sperimentale con un apprezzabile *duty cycle* (rapporto tra la durata della scarica e la durata dell'intero ciclo) e con avvio della produzione di trizio e dello sviluppo di energia (ETR) potrebbe essere portato a compimento entro l'anno 2000, raggiungendo quindi – a distanza di parecchi anni – il regime di massimo impiego.

Un prototipo di reattore « commerciale » potrebbe essere fattibile entro il 2010, per cui una stima realistica collocherebbe la prima apparizione di energia economica da fusione nel decennio compreso tra il 2020 e il 2030.

(iii) La collaborazione internazionale costituirà senz'altro un presupposto essenziale per l'attuazione di un ETR entro i limiti di tempo indicati nel precedente paragrafo (ii).

(iv) Un piccolo Tokamak ad alto campo (*high field tokamak*) non sembra essere un valido candidato all'impiego in un reattore commerciale a fusione pura, ma dovrebbe risultare assai utile per lo studio della fisica dei plasmi in condizione di bruciamento, a sostegno dei piani operativi dell'ETR. A tal fine occorrerà un esperimento compatto che sia un ragionevole prototipo dell'ETR, cioè un Tokamak che incorpori il riscaldamento ausiliario e un divertore (*divertor*) e che sia in grado di funzionare a temperature del plasma dell'ordine di 20-keV (un progetto del genere, il CIT, è stato inserito nella proposta di bilancio per l'anno finanziario 1988 presentata al Congresso dal Presidente Reagan lo scorso 5 gennaio).

Il contributo fornito dall'Italia alla ricerca sulla fusione magnetica è particolarmente importante nel settore della strizione a campo magnetico invertito (RPF: *reversed field pinch*) e del Tokamak ad alto campo (*high field tokamak*). Un appoggio al programma italiano in quest'ultimo settore risulterebbe valido nel quadro delle iniziative internazionali indicate nel paragrafo (iv).

Mi auguro che le predette brevi considerazioni possano essere utili.

PAGINA BIANCA

**NOTA DEL PROFESSOR CHIYOE YAMANAKA**

PAGINA BIANCA

5 gennaio 1987

Gentile onorevole Viscardi,

sono lieto di offrirLe il mio parere circa le prospettive della ricerca in materia di fusione nucleare sulla base del questionario da Lei proposto:

(i) il confinamento magnetico ed il confinamento inerziale sono entrambi in procinto di raggiungere un punto assai prossimo alle condizioni di pareggio. Tuttavia, al di là di tale punto di produzione, numerose difficoltà di ordine tecnologico ostano alla costruzione di un reattore a fusione, specialmente per quel che concerne il piano di confinamento magnetico. Il confinamento inerziale appare di assai più facile attuazione nel quadro del progetto del reattore. Ma l'elevato aumento di energia per quest'ultimo costituisce un problema.

(ii) Il primo passo da compiere è il conseguimento del pareggio (per cui l'energia immessa e quella prodotta siano in equilibrio) che potrà essere raggiunto nel corso degli anni '90. Un prototipo di reattore a fusione potrà essere costruito negli anni 2000. Un reattore commerciale potrà essere costruito negli anni 2010 sempre che sia prevedibile un urgente fabbisogno di fusione. Il più breve lasso di tempo per la costruzione di un reattore commerciale è valutabile all'incirca in trenta anni.

(iii) La cooperazione sul piano internazionale gioverà a ridurre doppioni di ricerca e provocherà anche un accorciamento dei tempi di attuazione dei progetti.

(iv) La linea del Tokamak compatto figura tuttora nel quadro della ricerca fondamentale sul dispositivo. La dimostrazione dello schema Tokamak dipenderà dall'ignizione e dalla lunga durata del bruciamento (*burn*).

Vorrei sottoporLe l'opportunità che la ricerca sulla fusione da confinamento inerziale in Italia venga riorganizzata. Il dottor Angelo Caruso a Frascati possiede una valida esperienza ed una eccellente capacità di *leadership* in materia, che è stata notevolmente apprezzata a suo tempo. Sarebbe opportuno tener conto della sua capacità di avviare la ricerca sulla fusione inerziale su scala adeguata in Italia.

PAGINA BIANCA

**NOTA DEL PROFESSOR SEBASTIAN PEASE**

PAGINA BIANCA

13 gennaio 1987

Gentile Presidente,

ho ricevuto poco prima di Natale la Sua richiesta per un commento sulla fusione nucleare. Devo innanzitutto scusarmi per il ritardo con cui Le rispondo.

La fusione nucleare offre la prospettiva di una fonte di energia per il genere umano avente il vantaggio di una disponibilità illimitata e largamente diffusa del combustibile, caratterizzato per di più da prodotti di reazione non pericolosi, nella fattispecie un gas inerte quale è l'elio.

Occorre tener presente però che non si può ancora dire con certezza se l'energia di fusione può essere rilasciata in maniera controllabile, se essa sarà troppo difficile da ottenersi praticamente o quale potrà essere il suo costo su base commerciale.

Posso dirLe comunque che, personalmente, confido sul primo punto e ritengo che anche tutti questi problemi potranno essere risolti ad un prezzo sostenibile.

Sono convinto che la Comunità Europea (ed il mio stesso Paese) debbano proseguire ricerche in questo settore sempre che chi se ne accolla l'onere, i cittadini che pagano le tasse o i governi, siano convinti che i risultati delle ricerche possano in ogni caso essere ritenuti utili.

È mia personale opinione, allo stato attuale, che si debbano considerare le ricerche sulla fusione come dirette ad assicurare un'ulteriore fonte energetica; la dimensione dello sforzo di tale ricerca può essere pertanto messo in relazione con il costo di produzione e la necessità di elettricità per il futuro. Non dobbiamo ovviamente supporre che la fusione nucleare sia l'unica fonte di energia in prospettiva tale da meritare tale sforzo di ricerca. Dalla ricerca sulla fusione potrebbero scaturire altri benefici non previsti derivanti dallo studio della materia ad altissima temperatura. Come contropartita, all'energia di fusione, come ad ogni forma di energia, è associato un impatto ambientale ivi compresa una certa radioattività.

Nel caso dell'Italia, la partecipazione al programma di ricerca europeo sulla fusione sembra naturale conseguenza della necessità di una continua crescita nell'espansione della richiesta di energia elettrica per il futuro anche nelle prospettive a lungo termine, a questo si aggiunge l'indubbio beneficio derivante dalla partecipazione ad uno dei maggiori e più prestigiosi programmi comunitari di ricerca ad alto contenuto tecnologico.

Per quanto riguarda i punti specifici da Lei sollevati, il maggior sforzo comunitario è concentrato nel confinamento magnetico. Questa ricerca è promettente e lascia intravedere risultati positivi. Personalmente ho sempre pensato che la fusione inerziale fosse un metodo difficile per ottenere una netta uscita di energia a causa della bassa efficienza dei sistemi eccitati da impulsi di alta energia. Quanto detto non esclude che, in ultima analisi, la via sia percorribile.

Per quanto riguarda la catalisi muonica, i nostri colleghi teorici non sono stati in grado, sfortunatamente, di prevedere in modo soddisfacente la dimensione dell'effetto catalitico osservato. I risultati attuali suggeriscono una possibilità remota di produzione netta di energia per tale via.

Sono convinto che:

1) la Comunità giustamente abbia concentrato i propri sforzi sulla linea più promettente, ovvero il confinamento magnetico;

2) ricerche su entrambi gli approcci dovrebbero essere perseguite, anche se non necessariamente, come parte di un programma energetico.

La Sua seconda domanda, sui passi da intraprendere per realizzare un prototipo, richiede una risposta attenta e piuttosto dettagliata che superficialmente potrebbe essere: costruire un impianto dimostrativo capace di generare energia elettrica non appena la fisica fondamentale e le tecnologie adeguate saranno state provate. Fino a che non sarà stato fatto questo non sarà possibile dare risposta a problemi quali costi e praticabilità. L'attuale programma che vede il NET come passo successivo al JET è in linea con questa esigenza ed ha come obiettivo un impianto dimostrativo: il DEMO.

Personalmente posso dire di avere esperienza di collaborazioni internazionali a vari livelli. La più ambiziosa collaborazione mondiale sul progetto INTOR, uno studio congiunto fra URSS, Europa, America e Giappone, sotto gli auspici dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica, AIEA, per il prossimo *step* sembra non riuscirà a sfociare in un esperimento comune.

Le collaborazioni internazionali più fruttuose sono quelle dove esiste la volontà di subordinare le finalità nazionali, almeno in parte, ad un beneficio comune ed in questo contesto sono convinto dei mutui benefici derivanti dalla collaborazione Euratom.

Le necessità energetiche dell'Europa occidentale giustificano a mio avviso un programma di ricerca e sviluppo europeo sulla fusione, autosufficiente a patto che esso sia realmente efficiente.

Poter garantire partecipazione entusiastica di altre nazioni o blocchi in questo programma porterebbe indubbiamente vantaggi di riduzione dei tempi e di minor costo per ciascun paese coinvolto. Comunque il programma dell'Europa occidentale non dovrebbe dipendere da collaborazioni con, per esempio, Stati Uniti o URSS.

La Sua ultima domanda si riferisce ai Tokamak compatti, ed alla proposta per « Ignitor ». I Tokamak compatti, intendendo macchine di dimensioni del raggio maggiore il più piccolo possibile, hanno vantaggi a breve e lungo termine. Per esempio il JET ha un valore di raggio maggiore molto compatto. L'uso di campi magnetici di alto valore, al di là del *range* delle bobine superconduttrici, è una caratteristica molto discutibile dei Tokamak compatti ed è un'opzione già studiata a Frascati nell'ambito di un progetto comunitario.

Per quanto concerne la proposta Ignitor, occorre ricordare che il JET è la principale macchina europea intesa a raggiungere condi-

zioni prossime alla accensione (ignizione). Un'altra macchina avente essenzialmente lo stesso scopo e facente uso della stessa configurazione magnetica dovrebbe, a mio avviso, venir discussa con particolare attenzione e propriamente giustificata qualora la si volesse includere nel programma europeo.

Quanto detto è particolarmente vero, se si considera che gli americani stanno certamente progettando e prevedono di realizzare entro il 1992-1993 un Tokamak per ignizione compatto e che il costo di tale macchina non è trascurabile.

Noi apprezziamo moltissimo il lavoro scientifico ed ingegneristico portato avanti dai colleghi italiani nei gruppi di fusione nazionali. Essi hanno dato un validissimo contributo al programma EURATOM. Essi hanno dato un apporto sostanziale al JET fin dalle prime fasi di progetto ed attualmente stanno fornendo un costante supporto.

Con gli importanti esperimenti di Frascati (Tokamak compatto FT e la successiva macchina potenziata) e dell'Università di Padova (progetto RFX con il quale Culham ha uno stretto collegamento), l'Italia ha dato un valido contributo all'ingegneria della fusione ed alla sua tecnologia. Io credo che il supporto del Governo del Suo Paese all'ENEA-EURATOM sia stato e sia vantaggioso per l'Italia così come per tutti i Paesi partecipanti.

Per quanto riguarda l'estensione dell'impegno italiano per finanziare un altro maggiore progetto: Ignitor, è essenzialmente un problema di vostra pertinenza giudicarne l'opportunità, tenendo ovviamente conto dell'attuale programma europeo, e finalizzarne la proposta alla Comunità per ottenere supporti finanziari.

La ricerca sulla fusione è un programma a lungo termine. Non sarà possibile avere ritorni economici dall'energia elettrica generata ancora per parecchi decenni e potrebbe anche accadere di non giungervi mai. Per essere portata avanti essa richiede lo sforzo instancabile di scienziati ed ingegneri creativi, il supporto tecnico ed il sostegno delle industrie nonché accordi internazionali a lungo termine. Detto programma è gravemente danneggiato dalla larga fluttuazione nel livello dei suoi finanziamenti. Un importante *desideratum* sarebbe l'adozione di un livello di fondi pubblici che dovrebbe essere mantenuto costante per parecchi decenni, ovviamente condizionato dal raggiungimento di progressi soddisfacenti ma, come già detto, senza ritorni immediati. Questo è senza dubbio l'aspetto da tenere in maggiore considerazione.

Devo mettere in chiaro che quanto esposto è il mio punto di vista personale e che non necessariamente rispecchia il parere dell'UKAEA e dell'EURATOM.

PAGINA BIANCA

**NOTA DEL PROFESSOR KLAUS PINKAU**

PAGINA BIANCA

13 gennaio 1987

Gentile Signore,

la Sua lettera concernente la fusione nucleare mi è pervenuta la scorsa settimana e mi affretto a risponderLe.

All'incirca fin dal 1960, tutta la ricerca sulla fusione in Europa è stata unificata nel quadro del Programma europeo di fusione alle dipendenze dell'EURATOM. Il Programma è diretto dal Comitato consultivo per il Programma sulla fusione (CCPF), in seno al quale, ciascun Paese è rappresentato da un membro del Governo e da uno scienziato.

(i) Il Programma europeo di fusione è limitato al confinamento magnetico toroidale in quanto questo offre la linea di sviluppo più promettente. Una efficace descrizione dello stato attuale di esso è fornita da un articolo del Professor Pease.

(ii) La strategia europea è stata costantemente definita e migliorata dal CCPF. Essa si basa sui seguenti elementi:

— impiego del JET, con il sostegno del programma tokamak generale per l'Europa e dei dati forniti dagli Stati Uniti e dal Giappone per la costituzione della banca dati per il prossimo Torus europeo NET.

— Impiego del NET in due fasi: la prima con l'obiettivo di stabilire la fisica della combustione del plasma con impulsi lunghi; la banca dati per l'attività attuale deve garantirne il conseguimento. La seconda fase consiste nella elaborazione della tecnologia, mediante l'impiego del plasma in combustione ottenuto in modo da fornire un banco di prova per i mantelli, per i materiali e per altre esigenze di elaborazione tecnologica.

— Costruzione di un reattore dimostrativo DEMO.

— Elaborazione di sistemi di confinamento toroidale alternativi, come lo *stellarator* o la strizione a campo magnetico invertito (*reversed field pinch*), poiché sono questi sistemi che alla fine possono risultare più adatti per le centrali elettriche.

(iii) Il programma di fusione ha carattere internazionale. Esiste una completa collaborazione e ripartizione dei compiti nel quadro del Programma europeo per la fusione. Esso costituisce il programma di maggior successo della Comunità europea. Il tempo necessario può essere calcolato semplicemente tenendo presente che il JET ha avuto inizio nel 1974, è tuttora in fase di impiego, e lo sarà ancora per un bel po' nel prossimo decennio. Se a quell'epoca sarà dato l'avvio al NET, ci vorranno  $2 \times 20 = 40$  anni prima che il DEMO possa essere completato ed i suoi risultati resi disponibili. I tempi complessivi necessari non dipendono da motivi di incompe-

tenza scientifica, ma occorrono semplicemente per l'ineliminabile *iter* da percorrere per l'organizzazione, l'attuazione e lo sfruttamento di un grande progetto internazionale ventennale per il quale le decisioni di natura politica devono obbedire ad un ordine sequenziale. Ella forse sa che la costruzione di una macchina del tipo NET è in fase di studio nel quadro di una vasta collaborazione internazionale tra i programmi di fusione degli Stati Uniti, dell'URSS, del Giappone e dell'Europa.

La linea Tokamak compatta non è quella adottata nel quadro dell'attuale strategia europea. Un tokamak compatto *Zephyr* è stato accuratamente studiato presso il nostro Istituto alla fine degli anni '70, ma non è stata presa alcuna decisione nel senso di dar corso ad esso quale progetto effettivo. La ragione è data dal fatto che è improbabile che i tokamak compatti vengano impiegati in un reattore. Ciò è dovuto al fatto che il reattore richiede un mantello fertilizzante e una schermatura tra il plasma e le bobine del campo magnetico. Stante tale separazione, sarebbe necessario creare campi magnetici elevatissimi presso le bobine, ed anche se si disponesse di materiali superconduttori, non si potrebbero sostenere gli *stress* meccanici. Pertanto il reattore dovrà operare in un regime di parametri del plasma che è assai diverso da quello di un tokamak compatto.

Alcuni sostengono che potrebbe tuttavia essere utile ricavare cognizioni da un tokamak compatto sperimentale e servirsene, ad esempio, per la costruzione del NET. Gruppi di esperti internazionali (come ad esempio l'Unità tecnica del gruppo di lavoro sulla fusione dei membri del Vertice - Technical Working Party of the Summit Members Fusion Working Group - di Tokio, 11-13 luglio 1985) sono giunti alla conclusione che così non è.

Mentre alcuni parametri del plasma, quali il prodotto della densità del plasma per il tempo di confinamento o la collisionalità del plasma, sarebbero uguali a quelli previsti per un reattore tokamak, altri non lo sarebbero. Ad esempio, lo specifico carico sulle pareti, l'accumulo di elio, il rapporto tra tempi di accensione (*skin*) e di combustione, e la densità particellare saranno diversi, sì da postulare una indagine decisamente separata nei confronti del NET.

In tal modo, anche se la scienza può apprendere qualcosa dal tokamak compatto, è nel quadro dei parametri che esso non è utile ai fini della nostra strategia, che mira a seguire una linea diretta verso il reattore. Non servirebbe a farci risparmiare qualcuna delle fasi programmate, e non ci consentirebbe di accorciare i tempi necessari. Anzi, impiegando personale e mezzi finanziari in iniziative come quella del tokamak compatto, che a poco servono per il raggiungimento dell'obiettivo finale, correremmo il rischio di allungare i tempi necessari a tale scopo. Il Programma europeo non può ora permettersi il lusso di assegnare uomini e capitali ad esercizi che rivestono principalmente un interesse di natura accademica ed hanno una scarsa incidenza nei confronti del reattore a fusione.

Spero di aver dato una franca risposta alle Sue domande e confido che essa possa essere di una qualche utilità per le vostre deliberazioni.

**NOTA DEL PROFESSOR ALVIN TRIVELPIECE**

PAGINA BIANCA

8 febbraio 1987

Gentile onorevole Viscardi,

mi scuso per il ritardo nel risponderLe. Purtroppo la Sua lettera non mi è pervenuta se non ai primi di gennaio. Le unisco il mio parere sulle varie questioni che La interessano in materia di sviluppo dell'energia da fusione.

### SVILUPPO DELLA FUSIONE

(i) Fra le tre linee di sviluppo citate nella lettera cui si risponde, la più avanzata è quella del confinamento magnetico sia in termini di parametri conseguiti sia quanto alla tecnologia necessaria per le future strutture di ricerca. Tuttavia, è importante rilevare come tutte e tre le linee siano tuttora in fase di ricerca, ed è difficile prevedere l'esito finale di ciascuna di esse.

(ii) Il Gruppo di Lavoro sulla Fusione dei Membri del Vertice Economico (Fusion Working Group of the Economic Summit Members) ha di recente stabilito che la ricerca in materia di fusione magnetica debba essere indirizzata verso i problemi scientifici dell'ignizione e del lungo impulso del plasma. Sarà, poi, necessario disporre di un reattore sperimentale per completare la base scientifica per il Tokamak e per affrontare le questioni dell'ingegneria della fusione. Una struttura del genere è considerata obiettivo comune, a medio termine, di tutti i programmi di fusione magnetica. A causa della mole delle installazioni richieste, si prevede che la relativa attività di attuazione si protrarrà fin dopo l'anno 2000. Se tali sforzi saranno coronati da successo, in uno con la conduzione di attività di scala minore per la messa a punto di materiali adeguati per l'applicazione della fusione, potrebbe configurarsi la fattibilità di un primo tentativo di prototipo integrato di reattore a fusione.

Tenuto conto dei tempi richiesti per tutti gli adempimenti suddetti, ritengo di poter concludere che l'energia da fusione per impieghi commerciali potrebbe aversi all'incirca entro il 2020.

(iii) Sono convinto dell'assoluta necessità di una stretta collaborazione internazionale per l'attuazione del programma sopra accennato, compatibilmente con le risorse disponibili. A tal fine, il Gruppo di Lavoro sulla Fusione è all'opera allo scopo di ridurre doppioni e migliorare l'efficacia della ricerca sulla fusione magnetica a livello internazionale.

(iv) Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti ha progettato e inserito nella propria proposta di bilancio per l'anno finanziario 1988 un esperimento compatto per lo studio dell'ignizione-bruciamento.

Sono convinto che un simile esperimento produrrà dati essenziali per il positivo funzionamento del grande reattore sperimentale che costituisce l'obiettivo comune, a medio termine, di tutti i programmi di fusione magnetica del mondo. Per quel che concerne il Progetto Ignitor, ho letto le pubblicazioni che lo riguardano e ne ho ascoltato la descrizione. Ritengo, tuttavia, che sarebbe inopportuno formulare commenti in proposito senza poter contare su una approfondita valutazione tecnica.