

Un nuovo campo di ricerca applicata

# La teoria della informazione

L'accurata esposizione di J. R. Pierce - I rapporti con la fisica e con il linguaggio e le arti

Tra i recenti sviluppi della ricerca applicata uno dei più importanti è quel complesso di teorie e tecniche che viene oggi indicato col termine di cibernetica. Uno dei pilastri fondamentali della cibernetica è la teoria dell'informazione.

Per avere un'idea dell'oggetto di questa disciplina è opportuno accennare brevemente ai principali aspetti storici connessi alla sua origine e al suo sviluppo. Come accade sempre nella storia della scienza, la nascita di una nuova teoria non avviene mai sotto forma di trovata improvvisa e « miracolosa » di uno scienziato geniale. Si può affermare che lo sviluppo della teoria dell'informazione trova la sua origine nei lavori di S. F. B. Morse, W. Thomson (Lord Kelvin), O. Grassman, M. Pupin, G. A. Campbell, H. Nyquist e R. V. Hartley.

## Il « bit »

Nel corso della seconda guerra mondiale uno dei principali aspetti relativi alla teoria del radar era il seguente. Si supponga di avere una corrente variabile proveniente dalla sezione ricevente di un radar, tale corrente deve essere la somma di due gruppi di correnti: uno è quello che contiene i dati di informazione sulla posizione dell'obiettivo; l'altro è quel complesso di onde elettriche dovute a vari fenomeni naturali, complessive, cui risultante è ciò che i tecnici chiamano rumore.

Che cosa si può fare, a tali trasformazioni è conveniente sottoporre la corrente variabile che assume in sé il segnale utile e il rumore, e come e per la somma di due gruppi di correnti: uno è quello che contiene i dati di informazione sulla posizione dell'obiettivo; l'altro è quel complesso di onde elettriche dovute a vari fenomeni naturali, complessive, cui risultante è ciò che i tecnici chiamano rumore.

Durante e dopo la guerra, un altro matematico americano, C. Shannon, si interessò del problema delle comunicazioni. Shannon lavorava intorno alla possibilità di ideare nuovi sistemi di comunicazioni e sui metodi matematici che permettono di misurare i pregi e i difetti dei diversi sistemi. A coronamento di questi studi, nel 1948, e cioè nello stesso anno in cui apparve il famoso libro di Wiener sulla cibernetica, Shannon pubblicò una memoria che costituisce la prima formulazione generale della teoria matematica dell'informazione.

Il problema affrontato e risolto da Shannon si può riassumere nei seguenti termini. Si supponga di avere una sorgente che produce messaggi di un dato tipo, per esempio un testo inglese. Si ammetta inoltre di disporre di un canale di comunicazione disturbato (un canale in cui è presente un certo rumore), avente determinate caratteristiche. In che modo bisogna rappresentare e codificare i messaggi della sorgente per il tramite di segnali elettrici per far sì che si ottenga la massima velocità di trasmissione nel dato canale, e che sia possibile estrarre dai dettagli tecnici e spiegare in che modo Shannon ha risolto questo problema. E' sufficiente rilevare che tale soluzione ha portato a una trattazione completa e sistematica della misura della quantità di informazione trasmessa da un messaggio.

E' stata così introdotta una nuova unità di misura, il bit (contrazione della frase inglese binary digit = cifra binaria), che rappresenta la più piccola unità, il quantum d'informazione trasmissibile; per esempio: la scelta fra due possibilità che hanno la stessa probabilità di verificarsi. L'importanza pratica della teoria dell'informazione non deriva solo dal-

le sue applicazioni nella tecnica delle comunicazioni, ma anche dalle utilizzazioni che essa trova nella costruzione dei calcolatori elettronici e di tutte le apparecchiature a controllo automatico. Data questa situazione riesce particolarmente utile l'iniziativa dell'editore Mondadori che ha recentemente pubblicato la traduzione italiana del volume (1) che il noto specialista americano J. R. Pierce ha dedicato alla teoria dell'informazione.

Nel giudicare l'opera di Pierce si deve tener presente, in linea preliminare, che egli, nello scrivere il volume in esame, ha affrontato e risolto brillantemente numerosi problemi molto complessi. La prima difficoltà era data dal livello matematico dell'esposizione. La teoria dell'informazione si basa su alcuni teoremi matematici piuttosto complessi. Pertanto il parlare della teoria dell'informazione senza nemmeno accennare al suo contenuto matematico, sarebbe stato « come parlare all'oscuro di un grande compositore senza far mai sentire un brano della sua musica » (pag. 8).

Pierce ha compiuto uno sforzo veramente notevole nel risolvere questo problema e il suo principale merito è quello di avere esposto gli aspetti matematici in modo semplice e, nello stesso tempo, rigoroso. Il secondo gruppo di difficoltà affrontate dall'autore è costituito dall'esame delle relazioni, o delimitazioni, che esistono fra la teoria dell'informazione e i diversi settori ai quali essa è stata applicata o si tenta di applicarla. In questo senso ogni sviluppo una acuta analisi dei rapporti che intercorrono fra la teoria dell'informazione e la fisica, la cibernetica, la psicologia e la arte.

Per ciò che concerne il rapporto fra la teoria dell'informazione e la fisica, Pierce analizza a fondo il legame che esiste fra il concetto di entropia e della termodinamica classica e quantitativa e quello correlativo che va sotto lo stesso nome nella teoria dell'informazione. Ma il problema è troppo complesso perché se ne possa dare qui un'idea.

## La musica

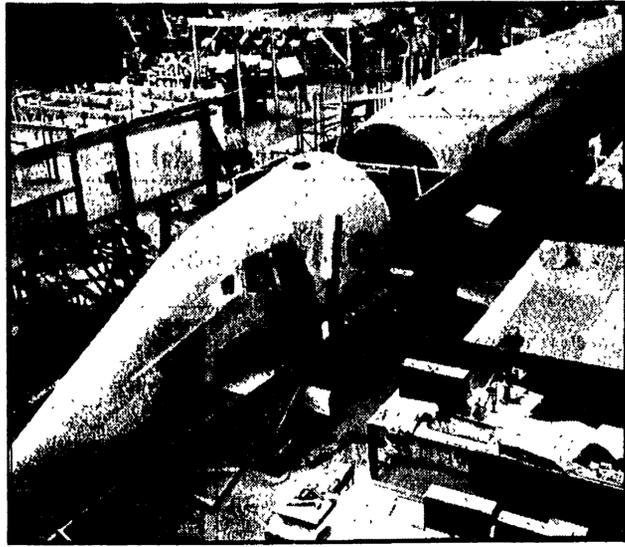
Quanto alla possibile applicazione della teoria dell'informazione alle arti, Pierce afferma esplicitamente che tale teoria può offrire pochissimo di veramente serio » (pag. 250) tranne un aspetto: quello della produzione fondata su regole probabilistiche, di testi musicali e letterari. Lo stesso autore, in collaborazione con M. E. Shannon (la moglie del teorico già citato) ha condotto degli interessanti esperimenti di composizione di musica statistica. In questo settore uno dei tentativi più seri è stato quello di L. A. Hiller e L. M. Isaacson dell'Università di Illinois.

Questi formularono, nel linguaggio dei calcolatori elettronici, delle regole di contrappunto di prima specie in quattro parti, di modo che il calcolatore potesse scegliere a caso le note e scartarle se esse violavano le regole prestabilite. Data però la limitazione derivante dal fatto che le regole collegavano solo gruppi di tre note successive, la musica così composta è piuttosto ineguale, ma in brevi battute appare sorprendentemente buona, naturalmente da un punto di vista « grammaticale » e « sintattico ». Secondo Pierce i risultati ottenuti da Hiller e Isaacson dimostrano in modo conclusivo che un calcolatore elettronico può assolvere pienamente molti lavori musicali tecnici, che prima erano realizzabili solo da esseri umani. Oggi un compositore, specialmente se inesperto di materia contrappuntistica e di armonia, potrebbe limitarsi a guidare il discorso musicale e lasciare al calcolatore il compito di introdurre i particolari di armonia e contrappunto secondo una certa cadenza e un dato stile.

## F. Di Pasquantonio

(1) John R. Pierce, La teoria dell'informazione, edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, Milano, 1963, pp. 303, L. 1.500.

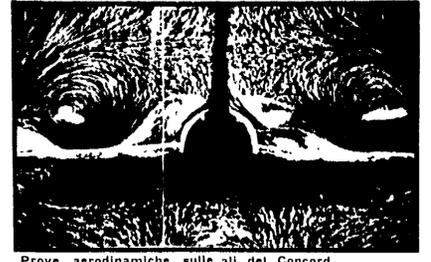
# scienza e tecnica



Il Concord in costruzione

## rassegna

Gli industriali USA pretendono che il costo della relativa ricerca sia sostenuto per il 90 per cento dal bilancio federale — Intanto il Concord anglo-francese volerà tra due anni a 2500 chilometri-ora



Prove aerodinamiche sulle ali del Concord

# Gli SU stanno perdendo la corsa all'aereo supersonico di linea

Note e apprezzate anche in Occidente

## Le macchine utensili dell'Unione Sovietica

I nuovi compiti dell'AMBC — Elevate potenze e velocità di lavorazione unite a una estrema precisione

AMBC è una sigla ancora poco nota nel mondo, e che va facendosi invece sempre più conosciuta e stimata entro i confini dell'URSS. AMBC è il Comitato Statale per l'Automazione e la Costruzione di Macchine Utensili, che ha compiuto, nel corso degli ultimi due anni, un lavoro cospicuo, e i cui compiti quanto a progettazioni dirette, coordinamento dei piani costruttivi e collegamento tecnico tra le diverse officine produttrici di macchine utensili sono stati notevolmente ampliati con le decisioni prese nello scorso novembre. L'AMBC, infatti, che è stato fino a pochi mesi fa un organismo con funzioni di studio e di progettazione avanzata, ma che sottoponeva poi i propri piani tecnici e produttivi al Comitato Statale di Pianificazione per l'attuazione e la realizzazione degli stessi, sta assumendo gradualmente funzioni di coordinazione e di direzione vera e propria delle officine che producono macchine utensili, e comincia ad operare, a tali effetti, in stretta collaborazione con il Consiglio Economico di Stato ed il Comitato Statale di Pianificazione, oltre che con il Comitato per l'Elettronica, di recente costituzione.



Una freatrice sovietica

Delle nuove incumbenze dell'AMBC si è occupato di recente lo stesso Krusiov indicando i problemi da risolvere e le linee d'azione, che si possono così riassumere, massima modernizzazione di tutta la produzione, eliminazione di « paralleli » nella progettazione e nella produzione, maggiore specializzazione delle varie officine.

Per valutare la portata di tali decisioni, sarà opportuno riferire alcuni dati quantitativi sulla produzione sovietica di macchine utensili, e puntualizzare alcuni aspetti tecnici di particolare interesse.

Nel 1962 l'industria sovietica ha prodotto 176.000 macchine utensili (torni, fresatrici, rettifiche, presse, traccio ecc.) e 178.000 nel 1963; nel corso del biennio, oltre 100.000 unità esistenti sono state completamente revisionate e modernizzate, sono state messe in funzione oltre 4.000 catene transfer per produzione automatica di pezzi « meccanici »; la produzione nel biennio è aumentata del 18%; circa il 20 per cento delle macchine utensili in funzione in URSS si sta avvicinando rapidamente ai 3 milioni di unità (2.700.000 unità in funzione a fine 1962).

Esaminando in particolare le cifre comparate della produzione 1962 e 1963, si nota come il primo anno del biennio sia stato caratterizzato da un aumento cospicuo della produzione rispetto all'anno precedente, mentre nel secondo anno si è svolto un profondo lavoro qualitativo, e la quantità è aumentata in maniera meno sensibile. E' cominciato cioè il lavoro che dovrà essere portato avanti dall'AMBC in base ai nuovi compiti e alla maggiore autorità conferitagli. E' stato pubblicato in primo luogo un catalogo-programma delle macchine utensili, che le raggruppa in 360 categorie, con una diminuzione dell'assortimento complessivo delle macchine del 25%, nonostante compaia oltre il 20% di macchine di progettazione sostanzialmente nuova.

Il programma dei prossimi anni è di far scendere ancora il numero di tali categorie al di sotto delle 200, unificando la produzione ed introducendo largamente la produzione di componenti (teste operatrici e simili) da impiegare in differenti tipi di macchine utensili. Il risparmio ottenibile nel corso del 1964, in conse-

guenza di questa unificazione e normalizzazione nella produzione delle macchine utensili, è di circa due miliardi di lire, che potranno l'anno prossimo salire a oltre quattro. Un programma, quindi, di aumento della produzione, di miglioramento della qualità, accompagnato da una cospicua riduzione di costi.

Sul piano più strettamente tecnico, alcune delle tendenze degli specialisti sovietici appaiono di rilevante interesse. In primo luogo, sono particolarmente curate le elevate velocità di taglio, considerate più economiche ed anche atte ad ottenere superfici lavorate più lisce. I sovietici sono stati tra i primi ad adottare come utensili da taglio per torni e fresatrici le placchette in materiali ceramici, che permettono velocità di taglio nettamente superiori a quelle realizzabili con le placchette in carburo di tungsteno e cobalto come legante (il cosiddetto Widia, dal nome di una casa tedesca che li esporta ampiamente in Italia).

Le macchine, di conseguenza, risultano molto veloci, e munite di motori di notevole potenza in quanto la placchetta ceramica più che « tagliare », « strappa ». Per fare un riferimento chiaramente comprensibile, possiamo notare come un classico tornio parallelo capace di lavorare su diametri dell'ordine dei 35-40 centimetri di costruzione sovietica, ha oggi ormai oltre 20 velocità, raggiunge i 3.000 giri quando non li supera, ed è equipaggiato con un motore da 6 o 7 cavalli. Nelle fresatrici verticali e universali di medie dimensioni, il mandrino può girare a 1.000-1.500 giri. Nelle macchine convenzionali del nostro mercato, si hanno comunemente valori inferiori, anche del 20-30%.

Il fattore « precisione » viene anch'esso messo in primissima posizione, anche per lavorazioni convenzionali. In una recente esposizione, per darne un'idea, molta sorpresa destarono le macchine automatiche presentate dai sovietici per la selezione dei rulli e degli anelli dei cuscinetti a rotolamento; i pezzi, compresi nelle normali tolleranze, venivano da queste macchine suddivisi in 18 classi, mentre la suddivisione convenzionale non si spinge

di solito oltre le 4-5. Non occorre sottolineare come un cuscinetto a sfere, a rulli o a rullini costruito con maggiore precisione, abbia poi una durata in esercizio di gran lunga superiore: l'esperienza insegna che la durata di un cuscinetto a rotolamento, proprio in conseguenza alla maggiore o minore precisione di costruzione, può variare facilmente da uno a quattro o anche più.

Tale ricerca della precisione conduce i costruttori sovietici ad una progettazione delle macchine, assai ampia, onde limitare la usura degli organi in moto, che si risolve sempre in una progressiva diminuzione della precisione della macchina stessa. In certi casi, i sovietici, per ottenere questo, ricorrono a bronze di ampia dimensione, a lubrificazioni forzate, al posto di cuscinetti a rotolamento: soluzione in apparenza meno perfetta, ma in realtà, in molti casi, di assai migliore riuscita e più lunga durata.

Una particolare attenzione è stata dedicata negli ultimi anni dagli specialisti sovietici alle macchine ad abrasione, il cui funzionamento si basa cioè su mole (diamantate, al carburo di silicio, alundum ecc.) e che vengono normalmente impiegate per lavori di finitura e di precisione. I sovietici hanno ormai in produzione unità di una potenza, a pari dimensione dei pezzi lavorabili, sei o sette volte superiore alle unità convenzionali, e che vengono impiegate in molti casi (tipica la lavorazione di grandi pezzi facenti parte di turbine, macchine elettriche, utensili navali) in sostituzione di grandi fresatrici e freiatrici-pilane.

Molta attenzione è stata rivolta, nell'ultimo periodo, anche alle macchine per la lavorazione delle lamiere, e per la costruzione degli stampi e dei ferri occorrenti allo scopo. Sono in produzione tra le altre, macchine « ad impulso elettromagnetico », basate sull'interazione tra impulsi di corrente estremamente energici entro bobine e le correnti costanti indotte nelle lamiere da lavorare. Le correnti in gioco, nelle bobine della macchina e nel pezzo da lavorare, danno origine a forze meccaniche sufficientemente energiche per deformare il pezzo stesso. L'entità e la « forma » di questa deformazione vengono determinate dalla forma del pezzo all'inizio, dalla forma delle bobine impiegate ed eventualmente da uno stampo al quale il pezzo vien fatto aderire. Si possono così, ad esempio, ottenere strozzature e rifiniture su pezzi tubolari, che altrimenti richiederebbero l'uso di cariche esplosive o costose operazioni di martellamento e calibratura.

Per la costruzione degli stampi, gli specialisti sovietici hanno portato ad un elevato grado di perfezione le macchine ad elettroerosione, che hanno oggi una diffusione, nell'URSS, senz'altro superiore che negli altri paesi (vari paesi, tra cui ad esempio la Francia, ne costruiscono su licenza sovietica). Tali macchine operano diripendo sul pezzo in lavorazione un susseguirsi di archi elettrici, ognuno dei quali archia una piccola parte del materiale. Regolando l'intensità e la frequenza di tali archi (che vengono fatti scoccare sotto l'olio) si possono ottenere tutte le forme volute, con un rilevante risparmio di tempo. Basta poi una finitura con i metodi convenzionali per completare lo stampo, adatto alla lavorazione di lamiere, alla pressofusione ed alla produzione di oggetti in materia plastica.

Paolo Sassi

Gli Stati Uniti desiderano procedere nello sviluppo di un aereo di linea supersonico americano, che sia tecnologicamente molto avanzato rispetto al Concord, ma nessuna decisione ultima è stata raggiunta sulle scadenze del programma, la direzione e il finanziamento di esso, riferisce il londinese Financial Times, che informa inoltre su un progetto presentato al presidente Johnson da Eugene Black, già presidente della Banca Mondiale.

Secondo tale progetto, l'aereo supersonico americano dovrebbe essere — più dispendioso del Concord, più grande e pesante, fatto di metalli e di altri materiali capaci di assicurare lunghi voli a velocità più elevata, a maggiori altitudini, e concepito sotto l'aspetto della progettazione delle componenti ne produce in modo molto più avanzato del Concord. Tale progetto viene descritto, in rapporto al Concord, come un progetto « evolutivo », cioè tale da comprendere un largo margine per i miglioramenti e perfezionamenti da apportare in base alle esperienze di esercizio, analogamente a quanto è stato possibile fare, in campo sub-sonico, per esempio nel DC-8.

Lo stesso giornale rileva l'interesse che a tal fine sembra presiedere l'annuncio dato dal presidente Johnson, relativo all'aereo federale A-11, che raggiungerebbe la velocità di 3500 chilometri-ora, e potrebbe perciò aver ruolo non pochi dei problemi inerenti alla costruzione di un aereo di linea supersonico rispondente alle esigenze del progetto americano.

Maggiori informazioni sulla gara che oppone gli americani alla coalizione franco-inglese nell'appuntamento di un aereo di linea supersonico sono fornite dalla rivista americana Fortune, sotto il titolo: « Siamo perdendo la gara per il supersonico ». Potrebbe facilmente accedere — dice l'articolo di Fortune — che proprio nell'epoca in cui i primi astronauti americani arriveranno sulla Luna, vale a dire nel 1970 o giù di lì, i loro competitori della industria aeronautica costruiranno aerei e gestori di avio-linee internazionali, si troveranno impegnati in una lotta per salvare i loro interessi nella zona dell'atmosfera terrestre in cui è possibile ricavarne profitti.

Il testo continua con una serie di notizie sullo stato del progetto franco-britannico Concord, relativo a un aereo di questo nome, capace di volare a circa 2500 chilometri-ora con cento passeggeri. Due prototipi dovrebbero essere in grado di volare tra circa un anno, e il servizio passeggeri dovrebbe avere inizio nel 1970. Questo significa che la combinazione anglo-francese ha un vantaggio sugli americani di 15-2 anni.

Il ritardo americano è giudicato dagli autori dell'articolo « paradossale », perché « è dovuto a difficoltà tecniche che tre delle maggiori ditte produttrici, di aerei — Boeing North American e Lockheed — presentano poche settimane fa al vertice federale per l'aviazione tre diversi progetti di aereo supersonico, tutti più avanzati del Concord » e già due mesi prima Pratt-Whitney, Curtiss-Wright e General Electric avevano presentato le linee generali per la progettazione dei relativi motori. Il costo di un tale programma sarebbe però eccessivo non solo per ciascuno dei gruppi industriali americani, ma anche per una combinazione fra loro.

E' qui la difficoltà è creabile, ma il fatto è che gli industriali hanno anche respinto — come si dice nel titolo — una offerta del governo federale, che avrebbe consentito ad accollarsi il 75 per cento della spesa valutata a un miliardo di dollari. Gli industriali stimano di non poter rischiare nemmeno un quarto di tale somma, e insistono perché il governo ne fornisca addirittura il nove decimi. Questo significa che essi intendono semplicemente tenersi alla linea speculativa che da molti anni ha permesso alla industria aeronautica e a molti altri settori industriali USA di ammontare quasi interamente a spese dei contribuenti, attraverso soprattutto i bilanci militari. Ed è probabile, naturalmente, che gli industriali

la spunteranno anche questa volta.

Non è probabile invece che essi riusciranno a colmare il divario acquistato dagli anglo-francesi: è solo alcuni di essi — quelli che sono stati recentemente in Europa e hanno visitato le officine in cui si sta montando il Concord — cominciano a rendersi conto dell'errore computato due o tre anni or sono, quando ricevettero l'invito ad associarsi nel progetto Concord. Essi ritennero allora che gli europei avrebbero fatto fiasco, sottovalutando le capacità tecniche di inglesi e francesi, stranamente, a dire il vero, visto che anche in campo sub-sonico gli americani hanno ricevuto più di una lezione dall'Europa occidentale (oltre che dall'URSS): per i motori, dalla Gran Bretagna, che naturalmente ne produce di molto migliori di quelli fatti negli Stati Uniti; per gli aerei, anche dalla Francia, che con il Caravelle ha indicato una soluzione ora largamente accolta e imitata.

Dal punto di vista degli affari, se gli americani non si affrettano potranno veramente trovarsi in una situazione difficile. Ancora nel 1963 essi avevano fornito il 75 per cento dei reattori il 90 per cento degli aerei con motori a pistone in servizio sulle linee occidentali, e negli ultimi tre anni hanno esportato aerei commerciali per un valore annuo complessivo di 1,3 miliardi di dollari, cioè quasi mille miliardi di lire.

Il mercato degli aerei commerciali supersonici potrà essere anche più importante: secondo una agenzia americana, nel 1970 si prevedono 100 miliardi di dollari di vendite annue di questi aerei, ne potranno essere venduti 378, e secondo un'altra agenzia specializzata in questo settore il mercato previsto in dieci milioni di dollari.

## notiziario

Estrazione di metalli con i batteri

In un Istituto minerario sovietico della regione degli Urali sta per essere sperimentato in pratica, dopo le prove di laboratorio che hanno fornito risultati promettenti, un nuovo metodo per l'estrazione di ferro e rame, che presenta estremo interesse tecnologico ed economico.

Il metodo consiste nell'iniettare nei filoni metalliferi batteri ossidanti, così da ottenere composti solubili dei metalli che si intende estrarre. L'estrazione potrebbe avvenire dopo aver lasciato il tempo necessario alla azione dei batteri, mediante pompaggio di acqua: si avrebbe così a bocca di pozzo una soluzione di composti di ferro (o rispettivamente di rame) dalla quale si potrebbe ottenere facilmente il metallo puro, anzi a un grado di purezza maggiore di quello connesso con i procedimenti ordinari. Inoltre il processo non può che risultare più economico di quelli convenzionali, la difficoltà maggiore, che non si sa in quale misura, sta stata già superata, nasce evidentemente dal tempo occorrente perché i batteri compiano la loro opera, e sul quale non si hanno precisazioni.

## Dizionario nucleare



Foto di un « plasma »

### BOTTIGLIA MAGNETICA

È il nome dato alle apparecchiature ideate per la cattura e la conservazione di plasma — ad altissime temperature, in vista soprattutto del controllo della reazione termonucleare. Sono indispensabili alcuni chiarimenti preliminari. La reazione termonucleare che si intende ottenere consiste nella « fusione » di nuclei di idrogeno con formazione di nuclei di elio e liberazione di ingente energia. Tale reazione avviene a temperature dell'ordine delle centinaia di milioni di gradi centigradi, come è provato dalla « bomba H » in cui tali temperature sono prodotte dalla esplosione di una bomba a fissione.

Per ottenere le stesse temperature senza la bomba a fissione, e in forma non esplosiva, occorre evidentemente lavorare su idrogeno (particolarmente l'isotopo deuterio — che ha il nucleo formato da un protone e un neutrone) gassoso e « ionizzato », in cui cioè i nuclei siano separati dall'elettrone che normalmente ruota attorno ad essi; la ionizzazione si ottiene facilmente alle temperature elevate. Sorge qui il problema del recipiente, poiché è evidente che nessuna sostanza materiale potrebbe tollerare temperature di milioni o centinaia di milioni di gradi senza volatilizzarsi e dissolversi.

Di qui l'idea della « bottiglia magnetica »: poiché il gas sul quale si lavora è ionizzato, le particelle che lo compongono sono dotate

di carica elettrica: esse dunque risentono l'influenza di un campo magnetico opportunamente predisposto, che può restringere o delimitare determinate direzioni, « plasma » il gas ionizzato, che perciò è detto appunto « plasma ». Si dispone allora un campo magnetico in modo che gli ioni in questione siano spinti verso il centro del recipiente in cui si trovano all'inizio, si distaccano cioè dalle pareti di esso; a questo punto essi sono contenuti non più dal recipiente materiale ma dal campo magnetico, che perciò si chiama « bottiglia » o anche « trappola » magnetica.

Questo effetto di contenimento risolve anche il problema di ottenere le altissime temperature necessarie: infatti la piccola quantità di materia contenuta dalla « bottiglia magnetica », non avendo contatti con altri corpi materiali, scuba tutta la energia che le è somministrata (attraverso un campo elettrico), e perciò la sua temperatura sale rapidamente. Con macchine di questo tipo — le prime dette Zeta, Ogra, Stellarator, furono costruite rispettivamente in Gran Bretagna, URSS, USA, ma oggi ne esistono anche in altri paesi fra i quali l'Italia — sono stati effettivamente raggiunti temperature di decine, e in alcuni casi di centinaia di milioni di gradi, sebbene non si sia ancora attuata la reazione termonucleare controllata, a causa della difficoltà relativa soprattutto alla stabilità del plasma in tali condizioni.