

# PLASMA FOCUS PER PRODUZIONE DI ENERGIA

V. Benzi\*, M. Frignani\*, D. Mostacci\*, F. Rocchi\*, M. Sumini\*, A. Tartari°

\*Laboratorio di Montecuccolino, DIENCA, Università di Bologna, via dei Colli 16, 40136 Bologna

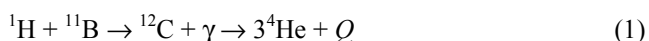
°Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, via Paradiso 12, 44100 Ferrara

## SOMMARIO

La recente crisi petrolifera ha in vario modo incrementato l'interesse per la produzione di energia elettrica tramite fonti alternative. Una possibilità in tale direzione potrebbe essere data dalla reazione nucleare protone-Boro realizzata con l'impiego di macchine tipo Plasma Focus, con le quali e' possibile il raggiungimento di temperature superiori ai  $10^9$  gradi K, in connessione con l'impiego di tecniche di conversione diretta dell'energia con rendimenti del 60-70%.

## (P,11B) E DENSE PLASMA FOCUS

Nel 1973 Weaver et al. [1] dei Laboratori LLL di Livermore proposero che oltre ai "combustibili standard" fino ad allora presi in esame per i reattori a fusione (quali le miscele D-D, D-T o D- $^3\text{He}$ ), venisse considerato anche un "combustibile esotico" formato da una miscela di idrogeno e boro, che può "bruciare" nuclearmente secondo lo schema di reazione



con  $Q = 8.78$  MeV. In Figura 1 è mostrata la sezione d'urto per tale reazione. Tra i maggiori vantaggi offerti da questo combustibile deve essere annoverato il fatto che in oltre il 99.9% delle reazioni non vengono prodotte scorie radioattive o comunque inquinanti, poiché  $^4\text{He}$  è nuclearmente "magico" e chimicamente "nobile". Il restante 0.1% di casi è dovuto alle reazioni primarie (p, $\gamma$ ) e (p,n) o a reazioni secondarie ( $\alpha$ ,n) e ( $\alpha$ ,p) indotte nel boro; tuttavia, a parità di energia generata, la radioattività globalmente prodotta da questi inquinanti risulterebbe inferiore per molti ordini di grandezza rispetto a quella che si produrrebbe con i "combustibili standard". Un altro fondamentale vantaggio della reazione "esotica" di Eq. (1) è rappresentato dal basso costo e dalla grande abbondanza dei combustibili, dato che  $^{11}\text{B}$  costituisce l'80.1% del diffusissimo boro naturale ed è facilmente separabile per ultracentrifugazione dal restante 19.9% di  $^{10}\text{B}$ . Si può incidentalmente notare che l'Italia è un paese particolarmente ricco di giacimenti boraciferi.

Sulla base di considerazioni riportate in [1], Weaver et al. conclusero che la reazione di Eq. (1) non può essere favorevolmente impiegata in reattori di tipo Tokamak, in quanto in questo caso il plasma in essi generato non avrebbe la

densità necessaria per riassorbire la quantità di radiazione da Bremsstrahlung richiesta per realizzare la condizione di breakeven o di equilibrio energetico (criterio di Lawson).

Secondo quanto proposto in [1] si potrebbe invece ottenere un bilancio energetico positivo con una tecnica di confinamento inerziale laser, per mezzo della quale sarebbe possibile implodere per ablazione delle microsfele di combustibile, raggiungendo i valori di densità e temperatura necessari per la fusione.

La reazione di fusione Eq. (1) può essere realizzata più facilmente per mezzo del cosiddetto "Dense Plasma Focus" (DPF). Si tratta di un apparato estremamente semplice, compatto ed economico, ideato indipendentemente, tra la fine degli anni 50 e gli inizi degli anni 60, da Filippov in Unione Sovietica e da Mather negli Stati Uniti. Il tipo di DPF oggi maggiormente in uso è quello ideato da Mather: schematicamente esso consiste di due elettrodi cilindrici coassiali in rame, separati alla base da un anello di materiale isolante e collegati ad un banco di condensatori a scarica rapida. I due elettrodi, l'esterno dei quali ha generalmente un diametro di una quindicina di centimetri ed un'altezza circa doppia, sono posti all'interno di un recipiente a tenuta di vuoto che contiene il combustibile sotto forma di gas a bassa pressione. La chiusura di un interruttore rapido provoca una scarica elettrica tra gli elettrodi e per qualche microsecondo si produce un'intensa corrente ionica che, per effetto del campo magnetico autoindotto ad essa concatenato, viene sospinta ad implodere in un punto (detto "focus") situato sull'asse di simmetria degli elettrodi. Nell'intorno di questo punto il gas ionizzato viene compresso per qualche decina di milionesimo di secondo, raggiungendo concentrazioni ioniche e temperature così elevate da provocare fusione nucleare tra le specie componenti il plasma.

Nel suo insieme un DPF risulta avere dimensioni assai

ridotte: infatti l'intero impianto, comprensivo dell'alimentazione, potrebbe essere integralmente contenuto in una normale stanza di laboratorio.

La potenza specifica  $P_S$  prodotta nei processi di fusione dipende ovviamente dalle densità ioniche dei nuclidi reagenti, dal  $Q$ -valore della reazione di fusione e dal tasso medio di reazione  $\langle\sigma v\rangle$  a sua volta dipendente dalla temperatura ionica  $T_i$  (in Figura 2 è mostrato uno spettro protonico per un DPF). Per un plasma binario, se indichiamo con  $n_1$  ed  $n_2$  le densità dei reagenti, si ha:

$$P_S = n_1 n_2 \langle\sigma v\rangle Q \quad (2)$$

per una frequenza di ripetitività di scarica del DPF di 1 Hz; nel caso della reazione di Eq. (1), se si vuole ottenere un "bruciamento" significativo del plasma, è necessario che la temperatura ionica  $T_i$  sia superiore al miliardo di gradi Kelvin ( $kT_i > 100$  keV,  $k$  costante di Boltzmann). Recentemente un gruppo di ricercatori statunitensi [2] ha annunciato di avere misurato nel focus di un DPF temperature di plasma superiori a 100 keV e densità ioniche superiori a  $\sim 10^{21}$  nuclei/cm<sup>3</sup> con combustibile formato da una miscela D-He per molti versi simile al combustibile <sup>1</sup>H<sup>11</sup>B. La ricerca, finanziata dal Jet Propulsion Laboratory della NASA, è stata svolta impiegando un DPF con banco di scarica da 268  $\mu$ F di capacità e 30-35 kV di tensione (240-330 kJ) della Texas A&M University; il volume  $\Omega$  del plasma reagente era di  $\sim 6 \cdot 10^{-9}$  cm<sup>3</sup>.

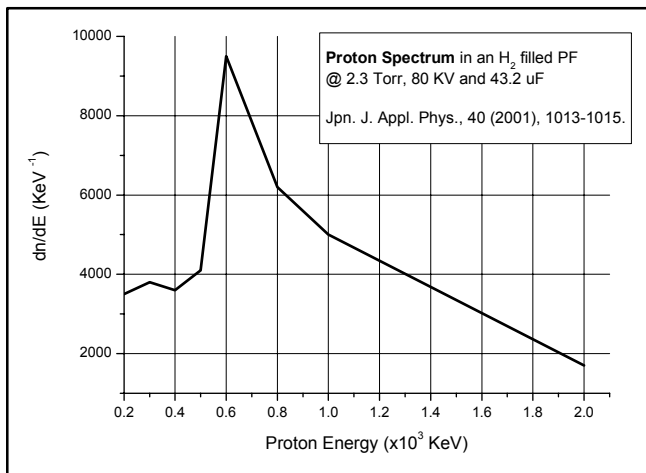


Figura 2. Spettro protonico in un DPF.

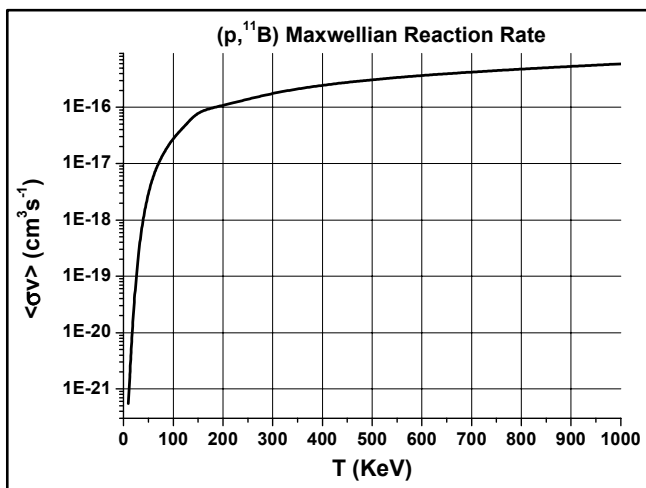


Figura 3. Tasso medio di reazione maxwelliano per la reazione di Eq. (1).

Sulla base di questi risultati si può stimare l'energia ottenibile con un DPF che operi in maniera ottimale con atmosfera ionica di decaborano B<sub>10</sub>H<sub>14</sub> (un idruro del boro solido che vaporizza a circa 60 °C) o di diborano (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, gassoso a temperatura ambiente).

Per una valutazione di massima delle potenzialità energetiche del combustibile esotico, assumeremo che il volume di reazione  $\Omega$  nell'intorno del focus sia quello sopraindicato con una densità ionica pari a  $10^{21}$  nuclei/cm<sup>3</sup> ed una temperatura  $T_i$  di 150 keV alla quale corrisponde un tasso medio di reazione  $\langle\sigma v\rangle \approx 10^{-16}$  cm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (vedi Figura 3).

Poiché il rapporto stechiometrico B/H del decaborano è 5/7, le concentrazioni ioniche dell'<sup>1</sup>H e del <sup>11</sup>B saranno  $8.75 \cdot 10^{20}$  e  $6.25 \cdot 10^{20}$  rispettivamente; poiché inoltre è  $Q = 8.78$  MeV (=  $1.4 \cdot 10^{-15}$  kJ), si ha  $W \approx 460$  kJ.

A seguito dei processi di fusione in considerazione, si forma nel DPF una corrente assiale di particelle  $\alpha$  con la quale è possibile, in linea di principio, produrre una corrente elettrica indotta in un avvolgimento coassiale esterno agli elettrodi del DPF, con un rendimento che può essere stimato del 60-70% pari cioè, nel caso in esame, a 276-332 kJ.

Su questa base sembra quindi lecito ritenere che con i valori dei parametri precedentemente indicati sarebbe possibile superare la condizione di pareggio energetico (breakeven), anche considerando la spesa energetica relativa alla separazione isotopica del boro. In base alle stime precedenti ed assumendo la validità della c.d. Legge di Scala (validata empiricamente dalla sperimentazione con "combustibili standard" D-D e D-T), secondo la quale il tasso di reazione in un DPF è proporzionale al quadrato dell'energia di scarica del banco di condensatori, dovrebbe essere dunque possibile ottenere una resa di 4-5 MW operando con un banco di condensatori da 1 MJ alla frequenza di 1 Hz, con un guadagno netto di 3-4 MJ/impulso.

## VANTAGGI

Secondo Lerner [3], la fusione (H,B) offre i seguenti vantaggi:

- la reazione (H,B) via DPF non produce scorie radioattive;
- il 98% dell'energia è rilasciata sotto forma di energia cinetica del fascio ionico e può essere trasformata in energia elettrica per conversione diretta nella misura del 60-70%;
- il costo dell'energia elettrica prodotta sarebbe di circa 0.06 centUSD/kWh, pari a circa l'1% degli attuali costi statunitensi;
- i reattori del tipo DPF sono di piccole dimensioni e tecnicamente decentrabili; un locale delle dimensioni di un garage può ospitare un reattore da 2 MW<sub>e</sub>;
- idrogeno e boro sono disponibili in quantità praticamente illimitata.

## NOMENCLATURA

- $k$  costante di Boltzmann
- $n_i$  densità della specie i-esima (m<sup>-3</sup>)
- $P_S$  potenza specifica (Wm<sup>-2</sup>)
- $Q$  Q-valore di una reazione nucleare (J)
- $T_i$  temperatura ionica (K)
- $v$  velocità (m/s)
- $\sigma$  sezione d'urto microscopica (m<sup>2</sup>)
- $\Omega$  volume di reazione (m<sup>3</sup>)

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. T. Weaver, G. Zimmermann and L. Wood, Exotic CTR Fuels: Non-thermal Effects and Laser Fusion Applications – UCRL-74938, 1973.
2. E. J. Lerner, Electron and ion energies over 100 keV in a

3. E. J. Lerner, Focus Fusion – 2 MW Electricity Generator Facility Development – version 5 (2004), non pubblicato.

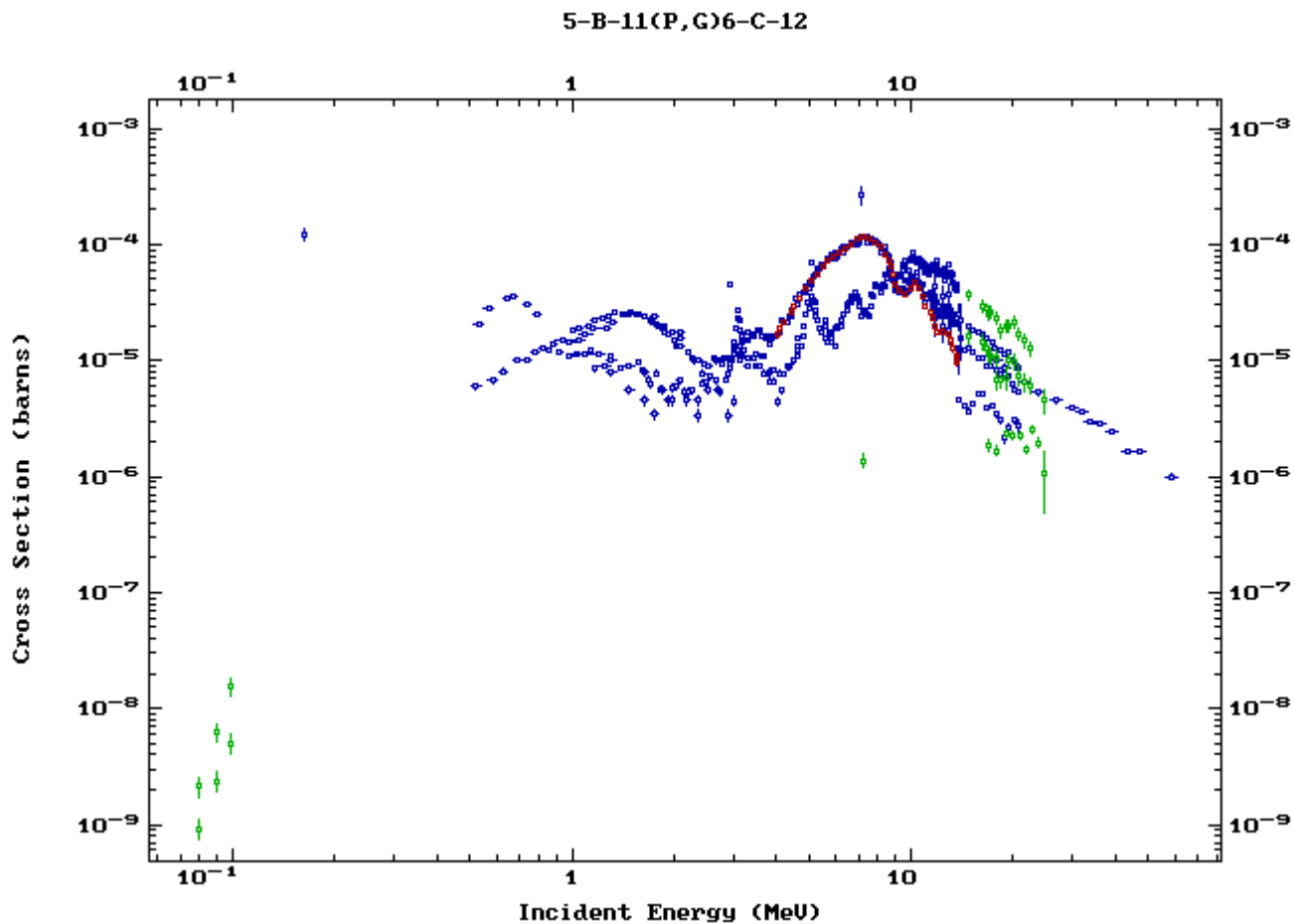


Figura 1. Sezione d'urto per la reazione Eq. (1) (fonte: EXFOR).