Appendice

§ A.0: Le pompe da vuoto impiegate per la Jet Target.

Lo stadio di recupero della Jet Target e' stato progettato per minimizzare il flusso di idrogeno nell'*Antiproton Accumulator*. a questo scopo sono stati impiegati 2 diversi tipi di pompe da vuoto: le rotative (*rotary vane pumps* e *roots blowers*) e le turbomolecolari (*turbomolecular pumps*). Mi appresto a descrivere i principi di funzionamento e le caratteristiche di ciascuna [16].

§ A.1: Le pompe rotative.

Le rotative appartengono a quella categoria di pompe meccaniche che comprimino ed espellono il gas con l'impiego di pistoni, rotori, valvole e altri dispositivi (pompe a compressione). Esistono in commercio pompe rotative a secco (ad esempio le *roots blowers*) o lubrificate con olio (ad esempio le *rotary vane pumps*). Nel caso delle seconde, il contatto con l'olio delle parti meccaniche in movimento consente di ottenere, in un unico stadio, elevati (fino a 10^5) rapporti di compressione (il rapporto tra la pressione nel volume da pompare e la pressione alla bocca di uscita della pompa). Senza lubrificazione, come nel caso delle pompe a secco, i flussi contrari di gas (quelli che dalle regioni della pompa a piu' alta pressione vanno verso la bocca di entrata) sono molto grandi e, di conseguenza, i rapporti di compressione ottenibili molto piu' bassi (circa 10). Tutte le rotative, ad eccezione delle *roots*, sono fornite del dispositivo di "*gas ballast*", il quale permette, ponendo dei limiti sulla prestazione della pompa, di eliminare i vapori (specialmente d'acqua). Senza questo dispositivo, tali vapori, nella fase di compressione, condenserebbero, peggiorando il rapporto di compressione della pompa e deteriorando velocemente gli olii di lubrificazione. Nel caso della Jet Target questo dispositivo non e' usato, dal momento che il gas da pompare e' idrogeno praticamente "puro" (si veda paragrafo § 3.3).

§ A.1.1: Le *Rotary vane pumps*.

Le *rotary vane pumps* (si veda figura A.1.1.1) sono costituite da una camera di pompaggio cilindrica (statore) (1) nella quale ruota, nella direzione della freccia, un rotore scanalato montato eccentricamente (2). Dentro le scanalature del rotore sono sistemate alcune palette (16), che vengono spinte fuori dalla loro sede per effetto della forza centrifuga o, in alcuni modelli, da opportune molle. Queste palette strisciano contro le pareti dello statore e, pertanto, trascinano l'aria risucchiata dalla bocca di entrata (4) per poi espellerla attraverso la valvola di scarico (12). La funzione dell'olio, in tutte le rotative, e' molteplice: serve come lubrificante a tenuta stagna, riempe le

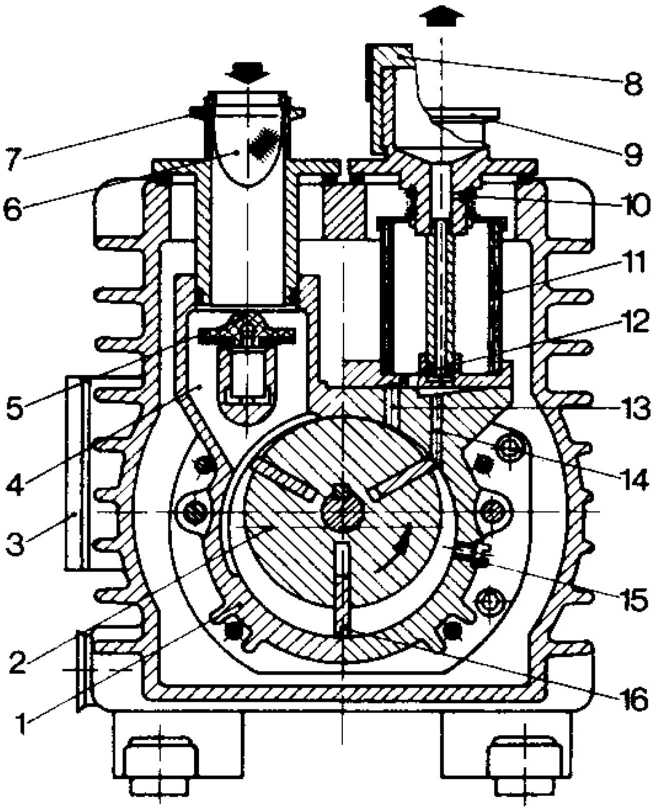

Fig.:A.1.1.1: 1 Camera di pompaggio; 2 Rotore; 3 Indicatore del livello dell'olio; 4 Condotto di entrata; 5 Valvola isolante; 6 Filtro per le impurita'; 7 Bocca di entrata; 8 Copercio della valvola del *gas ballast*; 9 Bocca di uscita; 10 Silenziatore dell'aria in entrata; 11 Filtro dell'olio; 12 Valvola di scarico (immersa nell'olio); 13 Condotto di uscita; 14 Condotto del *gas ballast*; 15 Iniettore dell'olio; 16 Paletta.

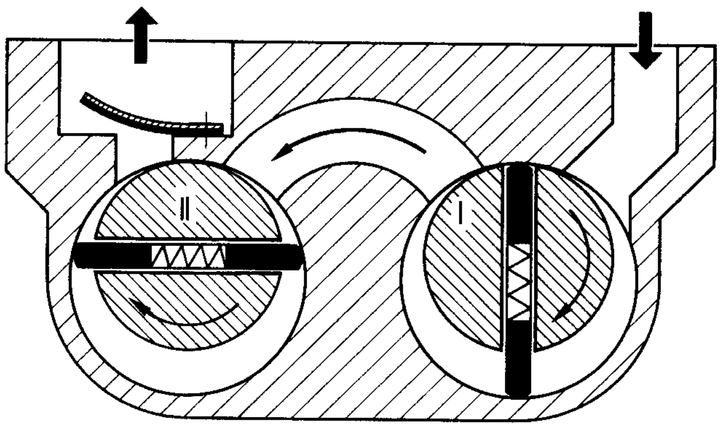

Fig. A.1.1.2: Sezione schematica di una *rotary vane pump* a due stadi. I° Stadio dell'alto vuoto (in cui viene usato olio lubrificante predegassato); II° Stadio del basso vuoto.

intercapedini vuote e aiuta il raffreddamento della pompa conducendo il calore generato dalla compressione.

Impiegando rotative in due stadi e' possibile raggiungere delle pressioni di lavoro e una pressione limite piu' basse, rispetto a quelle ottenibili da rotative ad un solo stadio. Cio' e' dovuto al fatto che, in quest'ultimo caso, l'olio di lubrificazione viene necessariamente in contatto con la pressione atmosferica, da cui assorbe una gran quantita' di gas che e' rilasciato in parte, durante la circolazione, nella zona a bassa pressione. Nel caso di rotative in due stadi, invece, nella regione del vuoto piu' spinto (si veda figura A.1.1.2) viene usato olio predegassato. Di conseguenza, la pressione limite raggiunge gia' la regione dell'alto vuoto ($10^{-3} \div 10^{-7}$ *mbar*), mentre le piu' basse pressioni di lavoro si aggirano intorno alle minime del medio vuoto (10^{-3} *mbar*).

§ A.1.2: Le *Roots blowers.*

Le *roots pumps* sono generalmente impiegate in combinazione con stadi di pompaggio a monte (spesso costituiti da pompe rotative lubrificate ad olio) e portano l'intervallo di lavoro fino alla regione del medio vuoto ($1 \div 10^{-3}$ *mbar*) e, nel caso di *roots* a due stadi, dell'alto vuoto ($10^{-3} \div 10^{-7}$ *mbar*). Il principio di funzionamento delle *roots* permette la costruzione di pompe con velocita' di pompaggio (volume spazzato nell'unita' di tempo) molto alte (sopra i 10^5 m^3/h) e, spesso, molto piu' economiche di altre pompe che lavorano nello stesso intervallo di pressione.

Le *roots* sono pompe a compressione nella cui camera interna ruotano, in direzioni opposte, due rotori sagomati, la cui forma, in sezione, e' approssimativamente ad otto (si veda figura A.1.2.1). La rotazione e' pilotata da un motore che sincronizza il movimento in maniera tale che i rotori non si tocchino e non urtino le pareti interne. Lo spazio tra i due rotori e tra i rotori e le pareti interne misura qualche decimo di millimetro. Di conseguenza, sono possibili alte velocita' di rotazione senza attriti meccanici.

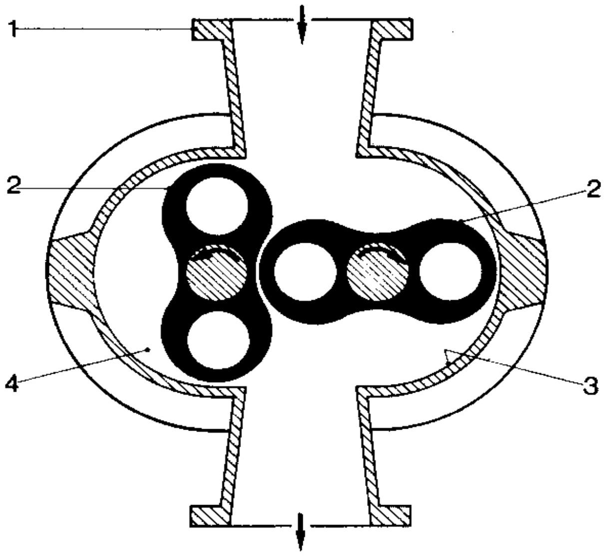

Fig. A.1.2.1: Sezione schematica di una *roots*. 1 Flangia di entrata; 2 I due rotori identici; 3 Pareti interne della camera di pompaggio; 4 Camera di pompaggio.

A differenza delle altre pompe rotative, le *roots* non sono lubrificate. Cio' causa la presenza di un flusso contrario di gas (come in tutte le pompe a secco) che portano ad ottenere rapporti di compressione relativamente bassi (da 10 a 100 a seconda della pressione alla bocca di entrata della pompa). Queste "perdite" sono strettamente correlate al principio di funzionamento della pompa, dal momento che alcune parti della superfice interna della camera di pompaggio sono alternativamente esposte alla bocca di entrata e alla bocca di uscita del gas (regione di piu' alta pressione). Qui, sia i rotori sia le pareti assorbono il gas, che viene poi rilasciato, a causa della rotazione, nella regione di basso vuoto. Il flusso contrario di gas dipende quantitativamente dallo spessore dello spazio vuoto tra i due rotori e tra i rotori e le pareti della camera di pompaggio. Tale spessore e' funzione della distribuzione di temperatura all'interno della pompa ed ha un minimo per pressioni all'entrata intorno ad 1 *mbar* (la curva sperimentale del rapporto di compressione, infatti, ha un massimo circa per questo valore). Per questa ragione, tale intervallo di pressioni rappresenta il punto di maggior pericolo di urto tra i rotori e le pareti.

Passero' ora a descrivere nel dettaglio le quantita' caratteristiche di una *Roots*, grandezze che risultano di fondamentale importanza nel progetto di un sistema da vuoto.

Il *throughput* effettivo Q_{eff} di gas che una pompa *roots* puo' trasportare si puo' esprimere come il *throughput* teorico Q_{th}, trasportato da una *roots* ideale (in cui non vi sia flusso contrario), meno il *throughput* di gas Q_{iR} del flusso contrario:

$$Q_{eff} = Q_{th} - Q_{iR}. \tag{A.1.2.1}$$

Il *throughput* teorico e' dato da

$$Q_{th} = p_a \cdot S_{th} \tag{A.1.2.2}$$

dove p_a e' la pressione alla bocca di entrata della pompa e S_{th} e' la velocita' di pompaggio teorica, esprimibile come il prodotto del volume V_s della camera di pompaggio per il numero n di giri dei rotori per unita' di tempo:

$$S_{th} = n \cdot V_s. \tag{A.1.2.3}$$

In analogia con la A.1.2.2, il *throughput* del flusso contrario si esprimera'

$$Q_{iR} = p_V \cdot S_{iR}, \tag{A.1.2.4}$$

dove p_V e' la pressione alla bocca di uscita della pompa e S_{iR} e' la velocita' di pompaggio (fittizia) di ritorno, esprimibile come

$$S_{iR} = n \cdot V_{iR}, \tag{A.1.2.5}$$

essendo V_{iR} il volume di gas che fluisce nella direzione inversa durante un giro dei rotori.

L'efficenza volumetrica η di una *roots* si scrive, per definizione,

$$\eta = \frac{Q_{eff}}{Q_{th}}. \tag{A.1.2.6}$$

Pertanto, usando le relazioni precedenti:

$$\eta = 1 - \frac{p_V}{p_a}\frac{S_{iR}}{S_{th}}. \tag{A.1.2.7}$$

Se si denota con la lettera k il rapporto di compressione $\frac{p_V}{p_a}$, ne segue

$$\eta = 1 - k\frac{S_{iR}}{S_{th}}. \tag{A.1.2.8}$$

Il massimo valore del rapporto di compressione si ha per un *throughput* effettivo Q_{eff}=0 (condizione di regime: i rotori trasportano tanto gas quanto ne ritorna indietro come flusso contrario). Tale valore (indicato con k_0) si scrive

$$k_0 = \left(\frac{S_{th}}{S_{iR}}\right)_{\eta=0} \tag{A.1.2.9}$$

e rappresenta una quantita' caratteristica di ciascuna *roots*. Generalmente, la ditta costruttrice ne da' il valore sperimentale in funzione della pressione alla bocca di uscita della pompa (si veda grafico di figura A.1.2.2). Il valore di k_0 dipende anche dalla natura del gas.

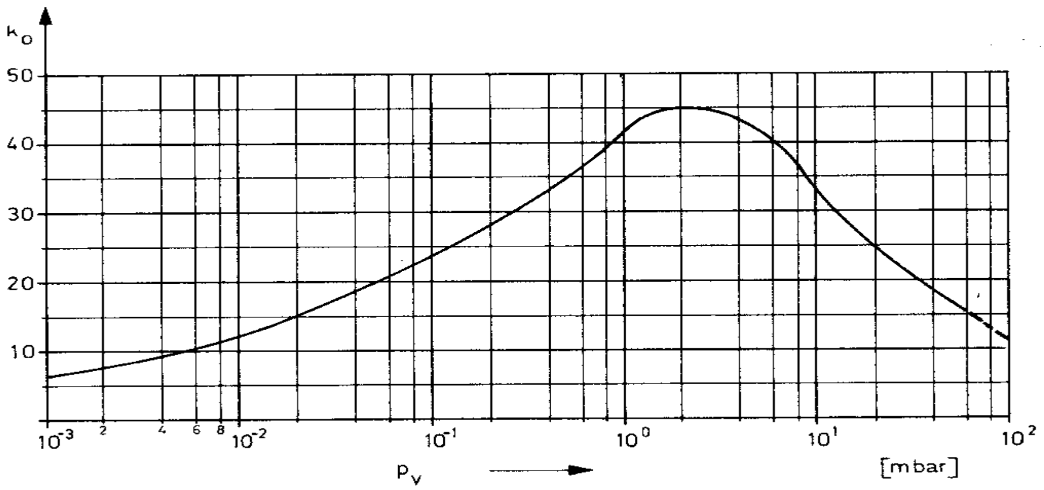

Fig. A.1.2.2: Tipico grafico del massimo rapporto di compressione di una pompa *roots*, in funzione della pressione alla bocca di uscita.

Varra' pertanto la relazione, di carattere generale,

$$\eta = 1 - \frac{k}{k_0}. \tag{A.1.2.10}$$

Nella maggior parte dei casi (e in particolare nel sistema di pompaggio della Jet Target), a causa del basso rapporto di compressione, una pompa *rootr* viene impiegata congiuntamente ad uno stadio di pompaggio a monte, con velocita' di pompaggio nominale S_V, costituito generalmente da una o piu' pompe rotative in serie. In questi casi, l'equazione di continuita' per il flusso di gas si scrive

$$S_V p_V = S_{eff} p_a = \eta S_{th} p_a, \tag{A.1.2.11}$$

avendo introdotto una velocita' di pompaggio effettiva S_{eff} per la *roots*, tale che

$$Q_{eff} = p_a \cdot S_{eff}. \tag{A.1.2.12}$$

Pertanto,

$$k = \frac{p_V}{p_a} = \eta\frac{S_{th}}{S_V}. \tag{A.1.2.13}$$

Se indichiamo con k_{th} il rapporto di compressione per una *roots* ideale (in cui η=1), si avra'

$$k_{th} = \frac{S_{th}}{S_V} \qquad \text{(A.1.2.14)}$$

e la A.1.2.13 si scrivera'

$$k = \eta k_{th}. \qquad \text{(A.1.2.15)}$$

Cio' significa che, poiche' l'efficenza volumetrica η e' sempre minore di 1, il rapporto di compressione di una *roots*, combinata con uno stadio di pompaggio a monte, e' sempre minore di k_{th}.

Sostituendo la A.1.2.10 nella A.1.2.15, si ottienela relazione fondamentale

$$\eta = \frac{k_0}{k_0 + k_{th}}, \qquad \text{(A.1.2.16)}$$

in cui l'efficenza volumetrica e' espressa solo tramite quantita' caratteristiche della *roots* (come k_0 e S_{th})e del sistema di pompaggio a monte (come S_V).

§ A.2: Le pompe turbomolecolari.

Il principio di funzionamento della pompa turbomolecolare (ben conosciuto gia' dal 1913) consiste nel fare in modo che le particelle di gas da pompare ricevano un impulso nella direzione opportuna, per impatto con le superfici di un rotore in movimento rapido. Le superfici del rotore, generalmente a forma di disco, formano, con le superfici di uno statore fisso, degli spazi interstiziali attraverso cui il gas viene trasportato fino alla bocca di uscita della pompa. Nel progetto originale di Gaede e nelle sue successive modificazioni, gli spazi interstiziali (detti anche canali di trasporto) risultavano essere molto vicini, il che rappresenta grosse difficolta' di realizzazione e una alta sensibilita' alle contaminazioni meccaniche.

Solo mediante l'impiego di un rotore lamellato a forma di turbina e' stato possibile, per la prima volta, considerare costruibile una pompa turbomolecolare. Lo spazio tra lo statore e il disco rotore diventa dell'ordine di qualche millimetro, in maniera tale che possano essere consentite maggiori tolleranze e, pertanto, condizioni di lavoro piu' sicure. La figura A.2.1 mostra il disegno in sezione di una tipica pompa turbomolecolare.

La pompa e' un compressore assiale di flusso, il cui dispositivo di pompaggio e' la coppia statore (1)/rotore (2). Si puo' pensare che questi siano formati da diversi stadi, montati in serie, composti da righe circolari di lamelle a turbina. Il gas da pompare, attraverso l'apertura della flangia di entrata (3), arriva direttamente al dispositivo di pompaggio nella zona delle lamelle superiori: lo "stadio da vuoto". Queste hanno una forma particolarmente allungata (4) per formare una grossa apertura anulare di entrata. Il gas viene convogliato dallo stadio da vuoto verso gli stadi inferiori di compressione, le cui lamelle sono molto piu' corte (5). Qui, il gas viene compresso alla pressione

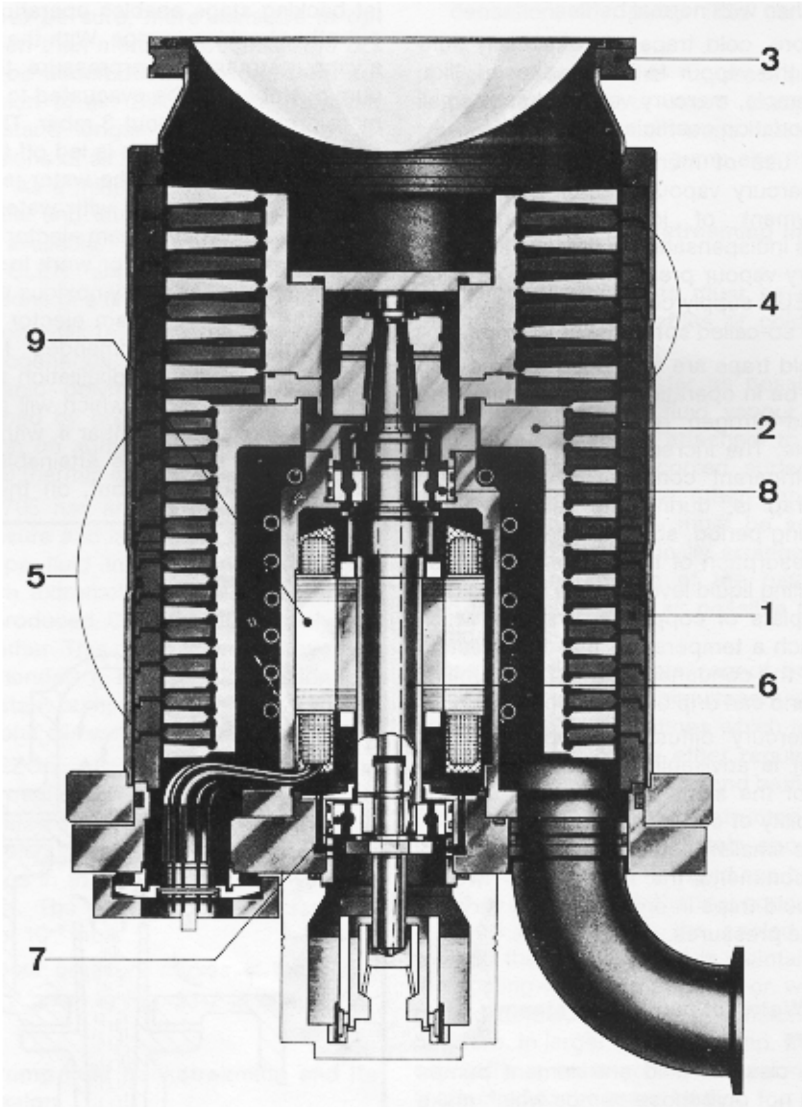

Fig. A.2.1: Sezione di una pompa turbomolecolare. 1 Lamelle dello statore; 2 Corpo del rotore; 3 Flangia di entrata; 4 Lamelle dello stadio da vuoto; 5 Lamelle dello stadio di compressione; 6 Albero motore; 7 & 8 cuscinetti a sfera; 9 Motore ad alta frequenza.

raggiunta dallo stadio di pompaggio a monte della turbopompa e, poi, espulso. Il rotore a turbina e' montato sull'albero motore e sostenuto da due cuscinetti a sfera di precisione (7 e 8), sistemati nel vano motore (in versioni piu' sofisticate, il sostenimento e' magnetico). L'albero e' direttamente pilotato da un motore (9) a media frequenza (24˙000 ÷ 30˙000 giri al minuto) collocato nella regione del basso vuoto, in maniera tale da rendere non necessario un controllo esterno, a pressione atmosferica. Questo motore e' alimentato e controllato automaticamente da un convertitore di frequenza, generalmente a stato solido per assicurare un basso livello di rumore.

L'andamento della velocita' di pompaggio di una pompa turbomolecolare e' mostrato in figura A.2.2. Questa rimane costante per tutto l'intervallo di lavoro e incomincia a decrescere per pressioni alla bocca di entrata maggiori di 10^{-2} *mbar*. Questo valore di soglia indica la transizione dal regime di flusso molecolare al regime di flusso laminare viscoso. La figura mostra anche come la velocita' di pompaggio dipenda dal tipo di gas.

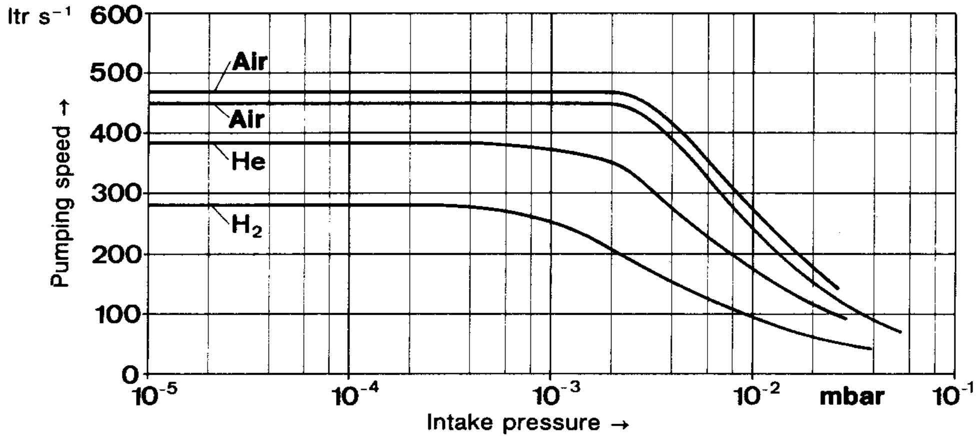

Fig. A.2.2: Andamento della velocita' di pompaggio di una pompa turbomolecolare in funzione della pressione alla bocca di entrata.

Il rapporto di compressione delle pompe turbomolecolari (si veda figura A.2.3) e' molto alto per gas pesanti, per ragioni legate alle dimensioni delle molecole. Pertanto, nel caso in cui la pressione parziale per idrogeno (il gas piu' "leggero") sia tenuta molto bassa dagli stadi di pompaggio a monte, una pompa turbomolecolare puo' raggiungere, in condizioni ottimali, un range di pressioni intorno ai 10^{-11} *mbar*.

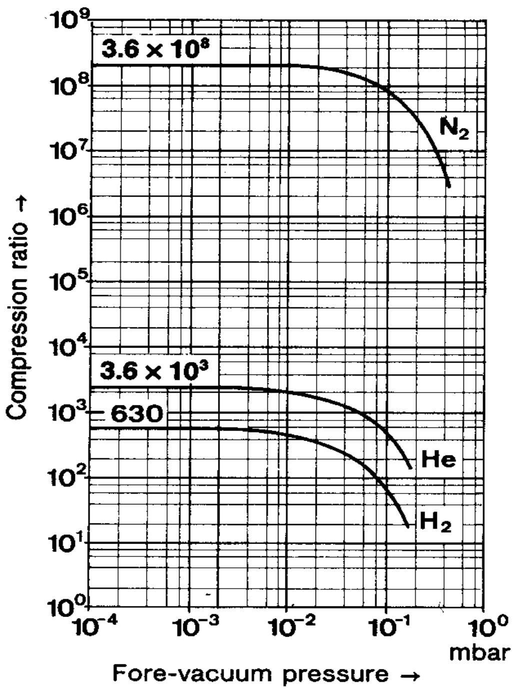

Fig.A.2.3: Tipico andamento del rapporto di compressione di una pompa turbomolecolare in funzione della pressione alla bocca di uscita. Come si puo' vedere, il rapporto di compressione piu' basso si ha per idrogeno (gas piu' leggero).

Analisi spettrografiche condotte sulla Jet Target, in condizioni di alto vuoto, hanno rivelato la presenza dominante di gas di idrogeno (si veda figura A.2.4), rilasciato dalla pareti metalliche che lo avevano assorbito durante le misure con il bersaglio attivato.

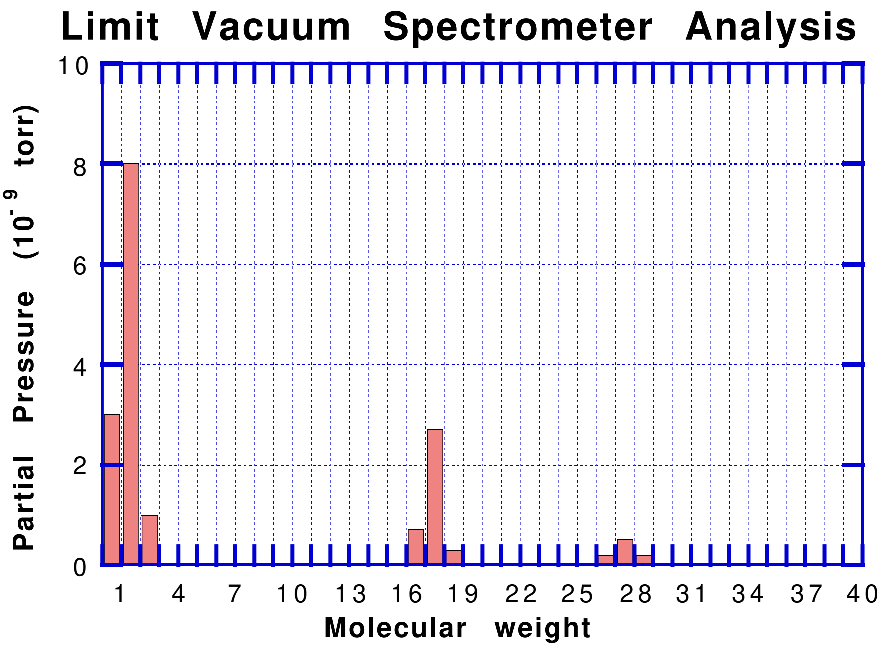

Fig. A.2.4: Lo spettro del gas residuo. La frazione di molecole pesanti e' molto bassa, in particolare, non sono state registrate molecole la cui massa fosse superiore a 28.