
La tecnologia del vuoto

Gabriele Chiodini

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sezione di Lecce

Negli ultimi decenni l'avanzamento della tecnologia del vuoto è stato enorme ed ha comportato l'utilizzo di tecnologie e materiali avanzati sviluppati inizialmente nell'ambito della ricerca pura. Ormai il raggiungimento di condizioni di vuoto sempre più spinto ed in impianti di dimensioni sempre più grandi è diventato indispensabile per moltissimi settori industriali, tecnologici e scientifici.

La rivoluzione scientifica moderna è stata possibile anche grazie all'avanzamento della tecnologia del vuoto che ha permesso di osservare nuovi fenomeni (ad esempio l'effetto fotoelettrico), sviluppare tecniche di analisi rivoluzionarie (ad esempio la spettroscopia di massa) e costruire macchinari d'indagine senza precedenti (ad esempio gli acceleratori di particelle¹).

Gli obiettivi scientifici più ambiziosi richiedono un costante miglioramento delle tecniche di vuoto e ciò ha portato a grandiose realizzazioni, impensabili sino a qualche anno fa.

¹Nel 1923 Wideröe progettò il betatrone scoprendo la famosa regola 2:1 tra campo accelerante e campo guida che garantisce un incremento di energia con orbita costante per un fascio di elettroni iniettato in una ciambella priva di aria. Wideröe non riuscì a costruire un betatrone funzionante per problemi di vuoto e solo nel 1940 Kerst reinventandolo ne realizzò uno accelerando elettroni fino a 2.2 milioni di elettronvolt. Il betatrone sebbene sviluppato per l'indagine di fenomeni nucleari è attualmente impiegato in medicina e nell'industria soprattutto come sorgente portatile di raggi X per eseguire radiografie.

Oggi, si raggiungono pressioni di 10^{-9} mbar (1 Atmosfera $\approx 10^3$ mbar) su grandi volumi ($> 100 \text{ m}^3$), come nelle macchine acceleratrici moderne [1]. Condizioni estreme di pressione, fino a circa 10^{-12} mbar, confrontabili con quelle presenti nello spazio siderale, sono riprodotte su piccoli volumi ($< 0.1 \text{ m}^3$) nella ricerca sui materiali. In Fig. 1 sono riportati i range di pressione impiegati nei vari ambiti di ricerca e nella parte alta la classificazione dei vari regimi di vuoto.

La forte spinta migliorativa nasce non solo da esigenze puramente scientifiche, ma anche da precise richieste di alcuni settori della tecnologia. La tecnica di produzione del vuoto si applica infatti ad un grande numero di impianti con scopi e necessità di livello di vuoto anche molto diversi come si vede nella Fig. 2.

Le ragioni per cui si desidera produrre il vuoto sono legate alla natura dell'applicazione considerata e quindi possono essere molteplici:

- impedire processi chimici e fisici causati dall'azione dei gas atmosferici, come combustione e scariche elettriche in filamenti caldi,
- rallentare i processi di decomposizione organica dovuti ad agenti aerobici (imballaggio sotto vuoto),
- aumentare il libero cammino medio di elettroni, ioni, atomi e molecole per permettere loro di raggiungere superfici o bersagli opportuni, senza urti con molecole estranee, ad esempio nella metallizzazione sotto vuoto e nelle macchine acceleratrici di particelle,

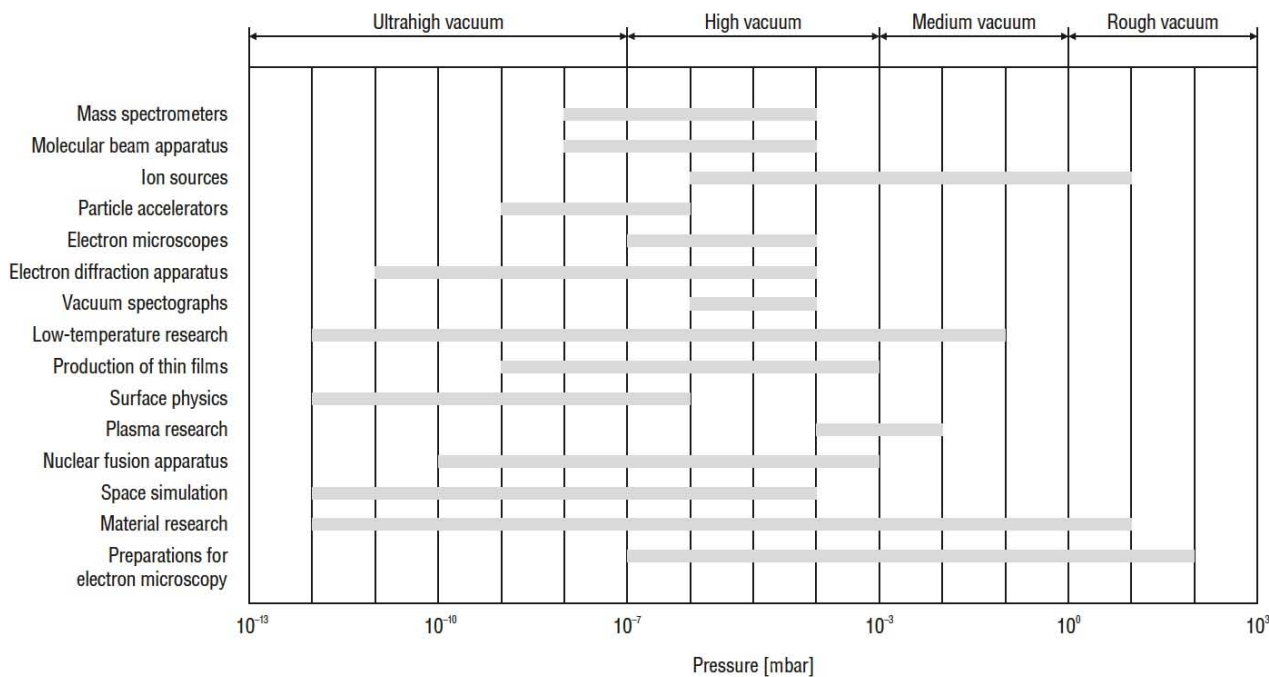


Figura 1: Range di pressione nei metodi di indagine ed analisi fisici e chimici. Credit: Leybold.

- ridurre la frequenza di collisione di molecole e atomi che compongono il gas con le superfici per allungare i tempi di contaminazione delle superfici stesse (studi di struttura e composizione di superfici solide; preparazione di film sottili),
- aumentare l'isolamento termico, ad esempio nei dewar e nei dispositivi a bassissima temperatura,
- eliminare i gas e vapori contenuti in un materiale, per esempio degasaggio di oli e liofilizzazione di materiali organici,
- simulare particolari situazioni fisiche come quelle incontrate dai satelliti e navicelle nello spazio.

L'ultra-alto-vuoto

Nel linguaggio comune si parla di vuoto quando c'è una depressione rispetto alla pressione atmosferica. Invece nella tecnologia del vuoto ci si riferisce a condizioni di alto vuoto (HV) e/o di ultra-alto-vuoto (UHV), quando il gas si trova in regime molecolare, cioè quando esso è così rarefatto che le collisioni di una molecola con le altre, sono molto meno frequenti delle collisioni con le pareti della camera che contiene il gas (vedi Fig. 3).

I livelli pratici di alto vuoto raggiungono valori di pressione di circa 10^{-6} mbar mentre i livelli di ultra-alto-vuoto sono caratterizzati da pressioni inferiori a 10^{-9} mbar. Infatti nei laboratori di ricerca spesso si lavora con livelli di vuoto fino a circa 10^{-5} mbar che si possono raggiungere con una pompa meccanica primaria seguita da una turbomolecolare secondaria.

Per pompare la camera a livelli di ultra-alto-vuoto oltre alla pompa turbomolecolare si usano una o più dei seguenti tipi di pompe: turbomolecolare, ionica, a sublimazione di titanio, getter non evaporativo e criopompa. Le pressioni UHV vengono misurate mediante misuratori di ioni, ad esempio un filamento caldo o di tipo magnetronico invertito.

Il raggiungimento del regime di ultra-alto-vuoto richiede diversi accorgimenti, l'impiego di materiali speciali e tecniche di processamento specifiche, come il preriscaldamento (*bake-out*) dell'intero sistema per diverse ore prima dell'uso che permette di rimuovere tracce residue di acqua e altri gas che sono adsorbite nelle superfici della camera.

Bake-out

La camera a vuoto è racchiusa in un materiale resistente al calore e riscaldato ad una temperatura di circa $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante dei forni. Dopo 24 ore di cottura, i forni vengono rimossi e la

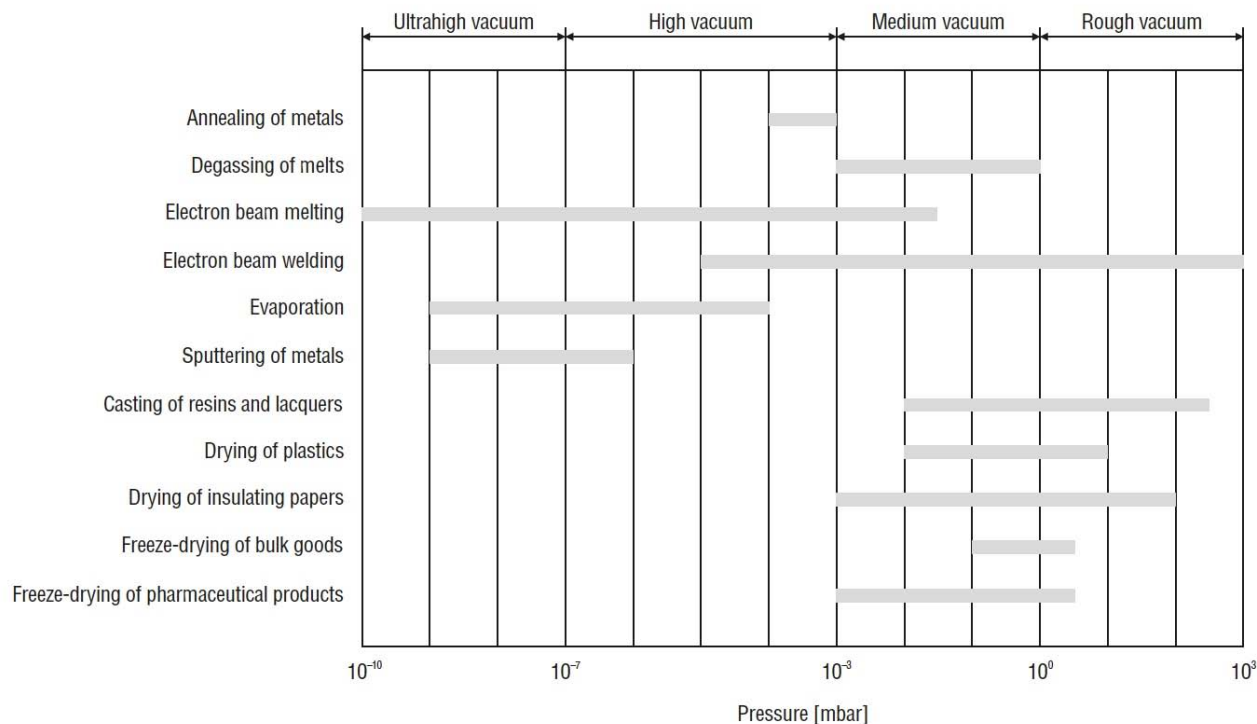


Figura 2: Range di pressione nei processi in vuoto industriali. Credit: Leybold.

camera si raffredda. Una volta a temperatura ambiente, la camera può raggiungere una pressione nella regione UHV.

Il processo di riscaldamento elimina gli atomi di gas dalle superfici delle pareti della camera (se la camera non fosse sottoposta a questo procedimento si impiegherebbero mesi per raggiungere le condizioni di UHV).

Materiali per UHV

Le guarnizioni utilizzate tra i componenti in un sistema UHV devono impedire qualsiasi minima perdita. Le guarnizioni interamente metalliche sono le uniche in grado di mantenere l'integrità del UHV. Queste guarnizioni hanno dei bordi a lama di coltello su entrambe le facce ritagliate da un metallo morbido, tipicamente rame.

Le camere a vuoto fabbricate in acciaio inox sono ampiamente utilizzate sia in regime di alto vuoto che di ultra-alto-vuoto. Tuttavia, ci sono altri materiali da costruzione che possono avere dei vantaggi: alluminio, titanio, rame e metalli specializzati. Ad esempio, l'alluminio rilascia meno idrogeno, vapore acqueo e vapori di idrocarburi nell'ambiente di vuoto consentendo cicli più rapidi e con meno pompaggio. Le camere da vuoto in rame o in leghe di rame vengono utilizzate per applicazioni non magnetiche, radiofrequenze (RF) e ad alta conducibilità termica. Le camere da vuoto in titanio, con i loro bassi livelli di permeazione all'idrogeno, offrono proprietà di gettering (vedi pompa getter). Spesso ciascun componente dell'impianto è trattato a parte prima dell'assemblaggio per renderlo idoneo all'ambiente di ultra-alto-vuoto.

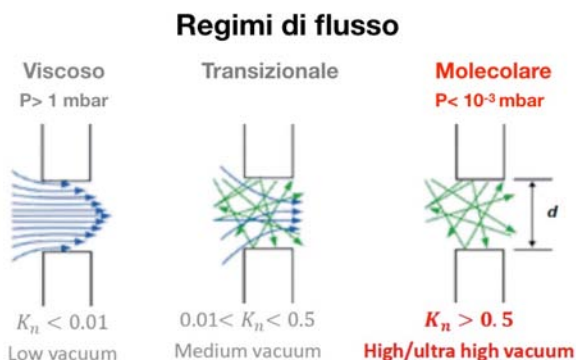


Figura 3: I regimi di vuoto sono distinti dal numero di Knudsen $K_n = \lambda/d$ definito dal rapporto tra libero cammino medio delle molecole λ e le dimensioni lineari del recipiente d .

Perdite in un impianto a vuoto

La fuoriuscita in generale di sostanze gassose (da superfici interne o da materiali di costruzione) è un problema significativo per i sistemi UHV. La perdita di gas da materiali utilizzati all'interno di una camera da vuoto viene ridotta al minimo grazie a un'attenta selezione di quelli con basse pressioni di vapore (ad esempio vetro, acciaio inossidabile, ceramica). Le plastiche e le colle sono spesso sorgenti di gas e devono aver subito un processamento di degasaggio prima di essere usate in ambiente UHV.

La fuoriuscita dalle superfici della camera è un problema più sottile. A pressioni estremamente basse, cresce la probabilità che molecole di gas siano adsorbite dalle pareti della camera, quindi la superficie totale interna di una camera diventa un parametro più critico del volume della stessa.

Il vapore acqueo è una fonte significativa di gas residuo, particolarmente quando la camera viene aperta in aria poiché qualsiasi vapore acqueo presente assorbe altre contaminazioni ed evapora dalle superfici troppo lentamente per essere rimosso completamente da un pompaggio a temperatura ambiente, ma abbastanza velocemente da indurre un livello continuo di contaminazione di fondo. La rimozione dell'acqua e dei gas simili richiede generalmente il riscaldamento da 180 °C a 400 °C mentre le pompe a vuoto sono in funzione.

Durante l'uso, le pareti della camera possono essere raffreddate usando azoto liquido per ridurre ulteriormente il degasaggio. L'idrogeno e il monossido di carbonio sono i gas residui più comuni presenti dopo il riscaldamento perché rilasciati da materiali quali acciai inossidabili.

Precauzioni utili

Accorgimenti importanti per ottenere una pressione di ultra-alto-vuoto sono i seguenti:

- ridurre al minimo le dimensioni della camera ed in particolare la sua superficie interna;
- utilizzare alte velocità di pompaggio mediante più pompe a vuoto collegate in serie e/o in parallelo;
- impiegare un tubo ad alta conducibilità (grande diametro, circuito con ostruzioni minime, valvole, ecc.);

- utilizzare materiali a basso rilascio di gas dalle superfici (acciaio inossidabile, alluminio, titanio, ecc.);
- evitare di creare pozzi di gas intrappolati dietro bulloni, saldature di vuoti, ecc.;
- elettrolucidare tutte le parti metalliche interne dopo la lavorazione o la saldatura;
- usare materiali a bassa pressione di vapore (ceramica, vetro, metalli, teflon se non scalfito);
- scaldare il sistema per rimuovere acqua o idrocarburi adsorbiti alle pareti;
- raffreddare le pareti della camera da vuoto a temperature criogeniche durante l'uso;
- usare guanti per evitare tutte le tracce di idrocarburi presenti sulle mani.

I fondamenti del vuoto

La comprensione del regime di ultra-alto-vuoto nelle applicazioni reali richiede nozioni specifiche [2, 3, 4]. A queste basse pressioni il percorso libero medio di una molecola di gas è di decine di km, quindi le molecole del gas residuo si scontrano con le pareti della camera più frequentemente di quanto si scontrino tra loro. Conseguentemente, quasi tutte le interazioni del gas si svolgono sulle superfici della camera.

In queste condizioni il regime di flusso del gas è molecolare (opposto al flusso laminare dei fluidi) e gli effetti di superficie sono fondamentali nel determinare il vuoto limite.

La legge di Ohm del vuoto

Nei sistemi in cui si pratica l'alto vuoto si instaura una condizione di regime dinamico tra la continua immissione di gas (dovuta alla permeazione, ad eventuali microperdite ed al rilascio di molecole dalle pareti, detto *fenomeno di degasaggio*) e l'evacuazione continua da parte delle pompe da vuoto connesse alla camera.

Questo stato stazionario è descritto utilizzando due quantità:

- il flusso di gas S , misurato in m^3s^{-1} , detto anche velocità di pompaggio $S = dV/dt$ dove dV è volume di materia elementare che attraversa la superficie nel condotto nell'intervallo di tempo elementare dt ,

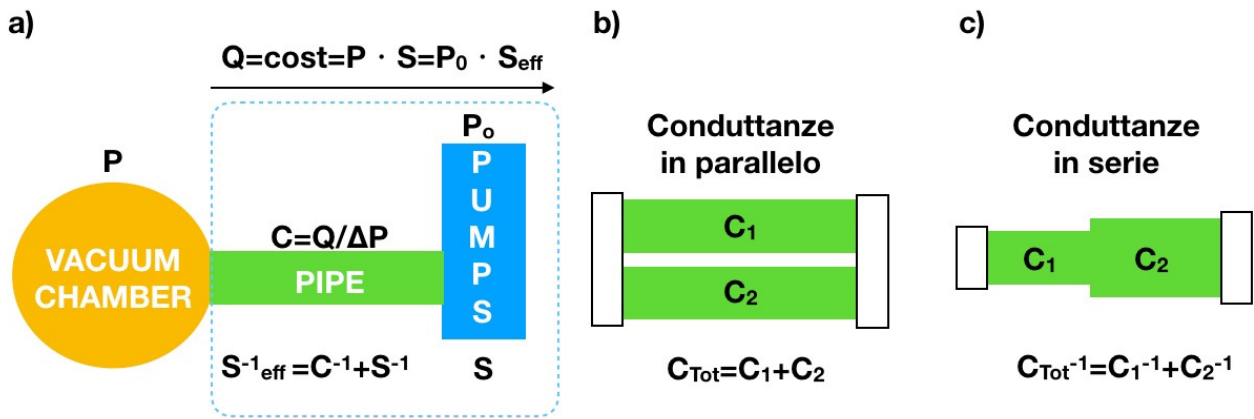


Figura 4: a) Definizione di conduttanza e di velocità di pompaggio efficace. b) e c) Conduttanza in serie e parallelo.

- la portata Q (*throughput*) misurata in $\text{m}^3 \cdot \text{mbar} \cdot \text{s}^{-1}$ ed espressa dalla relazione $Q = P \cdot S$ dove P è la pressione del gas. Essa è direttamente connessa con il flusso di materia nel recipiente a pressione P .

Supponiamo di avere un condotto che collega due recipienti alle pressioni P_1 e P_2 , rispettivamente. Knudsen ha dimostrato che in condizioni di regime molecolare, assumendo una distribuzione Maxwelliana di velocità, la portata Q dipende dalla geometria del condotto e dalla differenza di pressione, cioè $Q = C(P_1 - P_2)$ dove il coefficiente C prende il nome di *conduttanza* e ha le stesse dimensioni della velocità di pompaggio S .

Tale legge è nota anche come la legge di Ohm della fluidodinamica per la somiglianza formale con la legge che lega la differenza di potenziale applicata ai capi di una resistenza elettrica e la corrente che vi scorre (Fig. 4).

Risulta molto pratico utilizzare il concetto di velocità di pompaggio efficace S_{eff} che consente di includere nella velocità di pompaggio della pompa anche l'effetto della presenza delle conduttanze dei tubi di connessione alla camera da vuoto.

La relazione $Q = P S_{\text{eff}} = S_{\text{pompa}} P_{\text{pompa}}$ definisce la velocità di pompaggio efficace quella che si ha alla pressione della camera a vuoto P a parità di throughput. Dalla legge di Ohm della fluidodinamica otteniamo $Q = C(P - P_{\text{pompa}})$. Eliminando la pressione della pompa dall'espressione precedente si ottiene $S_{\text{eff}}^{-1} = C^{-1} + S_{\text{pompa}}^{-1}$. Da questa relazione risulta chiaro quanto la conduttanza della connessione riduca l'effettiva portata della pompa.

Effetti di superficie

La quantità di gas rilasciata dalle pareti determina la pressione finale di lavoro a partire da condizioni di vuoto medio (Fig. 5a).

L'evacuazione del gas di volume è un processo relativamente rapido e, superato il vuoto medio, il pompaggio delle camere subisce un rallentamento dettato dalla frequenza con cui le pareti rilasciano molecole di gas e quest'ultimo fenomeno determina la pressione finale ottenibile (Fig. 5b).

In Fig. 6 sono schematizzate le diverse interazioni tra le molecole del gas residuo e le pareti della camera a vuoto che verranno ora discusse.

Tra tutte le molecole che urtano la superficie di una camera da vuoto solo una certa frazione vi aderisce concorrendo a formare un monostato di ricopertura. Diremo allora che le molecole che aderiscono alla superficie sono state soggette al fenomeno di *adsorbimento*. Se poi le molecole del gas si legano debolmente con le molecole della stessa specie già adsorbite, allora concorrono a creare altri strati depositati sulla parete: parleremo in tal caso di fenomeno di *condensazione*. In pratica si ha un cambiamento di fase dallo stato gassoso a quello liquido o solido. In questi processi gioca un ruolo fondamentale la temperatura della superficie.

Infine, se le molecole del gas diffondono all'interno della matrice cristallina della parete o penetrano nelle sue porosità a tal punto da essere trattenute, allora parleremo di fenomeno di *assorbimento* (o più semplicemente *assorbimento*). La quantità di gas che può essere assorbita da una parete dipende dal coefficiente di solubilità e dalla costante di diffusione del gas nel solido. In realtà pochi gas diffondono signifi-

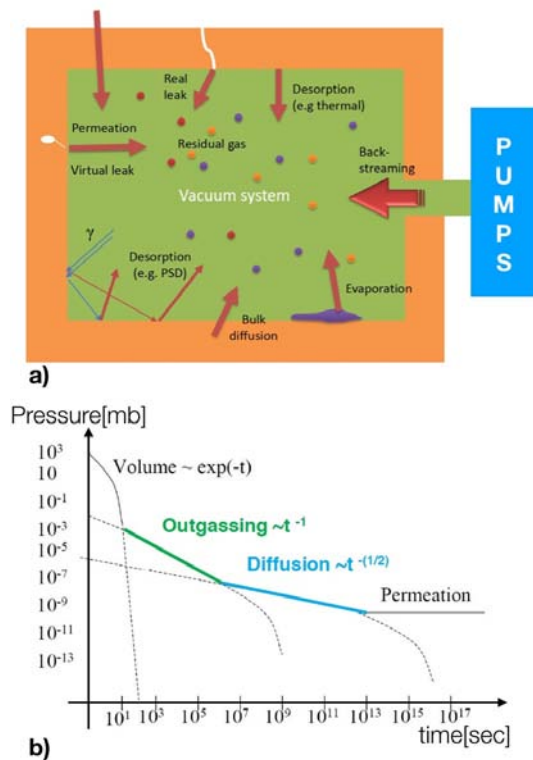


Figura 5: a) Le sorgenti di gas residuo in una camera a vuoto. b) Andamento nel tempo della pressione in una camera a vuoto dall'inizio dell'evacuazione del gas. L'evacuazione del gas di volume è rapida (legge di decadimento esponenziale) mentre l'evacuazione dei gas residui è più lenta e caratterizzata da una legge di potenza specifica della sorgente. La permeazione, sempre presente, ed eventuali microperdite, invece, determinano la pressione asintotica finale del sistema.

cattivamente nei materiali solidi, fatta eccezione per l'idrogeno e l'elio.

La molecola che aderisce alla superficie è catturata da un potenziale attrattivo generato dall'interazione con la parete. Se la buca di potenziale ha dimensioni di 0.1-0.3 nm classifichiamo il processo come adsorbimento chimico (*chemisorzione*), mentre se ha dimensioni dell'ordine di 0.4 nm come adsorbimento fisico (*fisisorzione*).

Nella chemisorzione l'adesione della molecola alla parete implica la messa in comune di elettroni di valenza dei costituenti del gas e della parete. Tale processo è selettivo e dipende fortemente dalla natura del gas e delle pareti con cui interagisce. Inoltre l'adsorbimento chimico è responsabile della formazione di uno strato mono molecolare soltanto, visto che esso può aver luogo sino a che vi siano legami di

valenza disponibili. La chemisorzione è spesso accompagnata da rotture di legami chimici con conseguente dissociazione molecolare: a tale processo è associata un'energia di attivazione E_a .

L'adsorbimento (sia chimico che fisico) comporta una riduzione dei gradi di libertà delle particelle del gas e quindi il processo d'adsorbimento è esotermico. Il fenomeno opposto, cioè il rilascio di molecole dalle pareti, detto *desorbimento* o degasaggio, avviene con assorbimento di calore da parte del gas.

Dalle considerazioni fatte in precedenza è evidente che, per accelerare il rilascio delle molecole adsorbite occorre fornire energia alle pareti. Ciò viene fatto nei modi più disparati, quali il bombardamento della superficie tramite particelle cariche (ad esempio ad LHC) e radiazione elettromagnetica. Tuttavia, come già anticipato, il modo più semplice e di utilizzo comune nei sistemi d'alto vuoto, è il riscaldamento delle pareti dell'impianto.

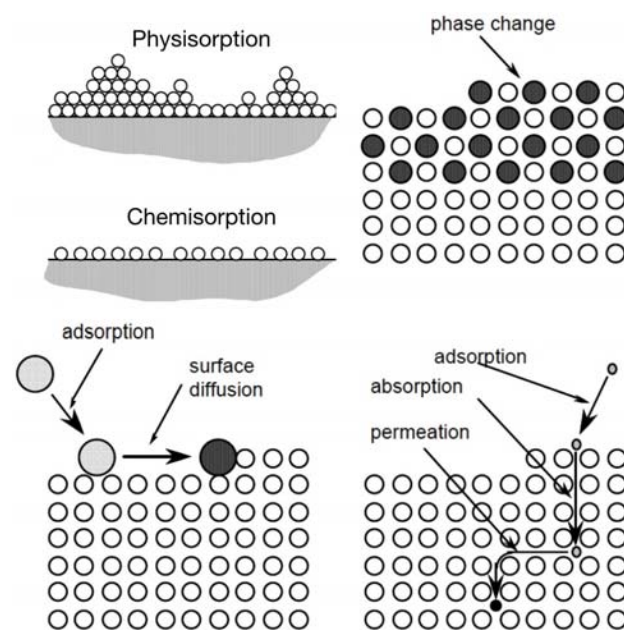


Figura 6: Fenomeni fisici responsabili della cattura sulla superficie della parete di una camera a vuoto delle molecole del gas residuo in condizioni di regime molecolare.

Tuttavia, se da un lato l'adsorbimento costituisce un aspetto negativo per il raggiungimento di un alto vuoto, dall'altro esso è abilmente sfruttato in alcuni casi fondamentali.

L'adsorbimento fisico è alla base delle pompe chiamate comunemente criogeniche (vedi paragrafo successivo). Quando si vuole evitare

l'utilizzo di pompe che possono lasciare negli impianti tracce di idrocarburi dovuti all'olio utilizzato nelle pompe, allora si opta per questi sistemi basati sull'utilizzo di polveri o granuli di materiale che presenta un alto rapporto superficie/volume e che viene raffreddato a bassa temperatura. Ad esempio le Zeoliti sono portate a 77 °K (temperatura d'ebollizione di azoto a pressione atmosferica), mentre le temperature d'esercizio delle pompe a carbone attivo sono tipicamente più basse (da 4 a 20 °K). L'uso delle basse temperature è cruciale perché i legami dovuti alle forze di Van der Waals della fisisorzione sono deboli e quindi l'energia termica delle molecole deve essere ridotta in modo da consentire l'intrappolamento nella buca di potenziale, poco profonda, del sito d'adsorbimento.

L'adsorbimento chimico trova applicazione in diversi tipi di pompe dette getter, la cui utilità è notevole soprattutto se i gas da adsorbire sono attivi. Tali pompe sono costituite da sottilissimi strati di metallo quali Ti, Ba, Zr, Ta o leghe come Zr-Al, Ti-Zr che vengono portate ad una temperatura d'esercizio tra i 20 e i 400 °C. Il titanio è spesso impiegato in sistemi che sono destinati a sopportare numerosi cicli di pressione tra la condizione di vuoto e quella di pressione atmosferica, mentre il bario è spesso depositato all'interno di piccoli sistemi da vuoto, come le valvole elettroniche e i tubi a raggi catodici che, una volta costruiti, restano sotto vuoto tutta la loro vita. Infine ricordiamo che l'adsorbimento chimico è un processo selettivo e questa proprietà è sfruttata nel processo di selezione dei gas rari. Questi ultimi sono tipicamente gas nobili che non reagiscono con i getter che al contrario adsorbono le impurezze presenti nel gas.

Le pompe da vuoto

Poiché il vuoto è indispensabile per molte applicazioni è necessario produrlo in ambienti o recipienti adatti attraverso opportuni dispositivi dette *pompe da vuoto* (Fig. 7).

Esistono diversi tipi di pompe da vuoto che coprono differenti intervalli di pressione. Ogni tipo di pompa è caratterizzato dai valori della velocità di pompaggio e della pressione limite. La velocità di pompaggio dipende dalla pressione all'ingresso della pompa e presenta sempre un andamento decrescente al diminuire della pressione di lavoro. Solo in alcuni casi

si ha una diminuzione della velocità di pompaggio a pressioni elevate. È utile sapere che la pressione finale P_f di un impianto a vuoto non coincide con la pressione limite P_l della pompa. Infatti la conduttanza C dei tubi che connettono il sistema alla pompa a vuoto causa una caduta di pressione inevitabile proporzionale alla portata Q secondo la relazione $Q = C(P_f - P_l)$ necessaria a far fluire il gas dal sistema alla pompa (vedi paragrafo sulla Legge di Ohm della fluidodinamica).

Le pompe rotative

Sono le pompe meccaniche comunemente usate per produrre il vuoto primario (basso e medio vuoto) partendo dalla pressione atmosferica e ne esistono di due tipi: a palette ed a pistone rotante.

La pompa rotativa a palette è costituita da un rotore provvisto di palette mobili che ruota eccentricamente in una cavità cilindrica connessa al condotto di ingresso e di uscita. Le palette vengono tenute a contatto con la superficie interna della cavità cilindrica da una molla ed un velo d'olio garantisce la tenuta. La variazione di volume delle camere crea depressioni (fase di aspirazione) e compressioni dell'aria (fase di scarico). Nella fase di aspirazione il gas viene estratto dalla camera da vuoto tramite il manicotto di aspirazione, successivamente grazie all'eccentricità del rotore la camera continua ad aumentare di volume. Una volta raggiunto il volume massimo il manicotto di aspirazione viene chiuso da una seconda palette mentre la camera della pompa comincia a diminuire di volume consentendo ai gas di essere espulsi dal manicotto di scarico (Figura 8).

In generale, nelle pompe meccaniche, la lubrificazione delle parti in moto e la tenuta da vuoto del sistema sono assicurate da oli speciali a bassa tensione di vapore. La pressione di scarico dei gas compressi deve essere più elevata della pressione atmosferica, per cui sono necessari rapporti di compressione (rapporti tra pressione di uscita e di ingresso) molto grandi (dell'ordine di 10^5) per ottenere una pressione finale di 10^{-2} mbar all'ingresso della pompa. La pressione finale delle pompe rotative ad un singolo stadio ricade tipicamente nell'intervallo che si estende da 10^{-2} mbar (per le pompe di piccola velocità di pompaggio $S < 50 \text{ m}^3/\text{h}$) a 10^{-3} mbar (per le pompe con velocità di pompaggio

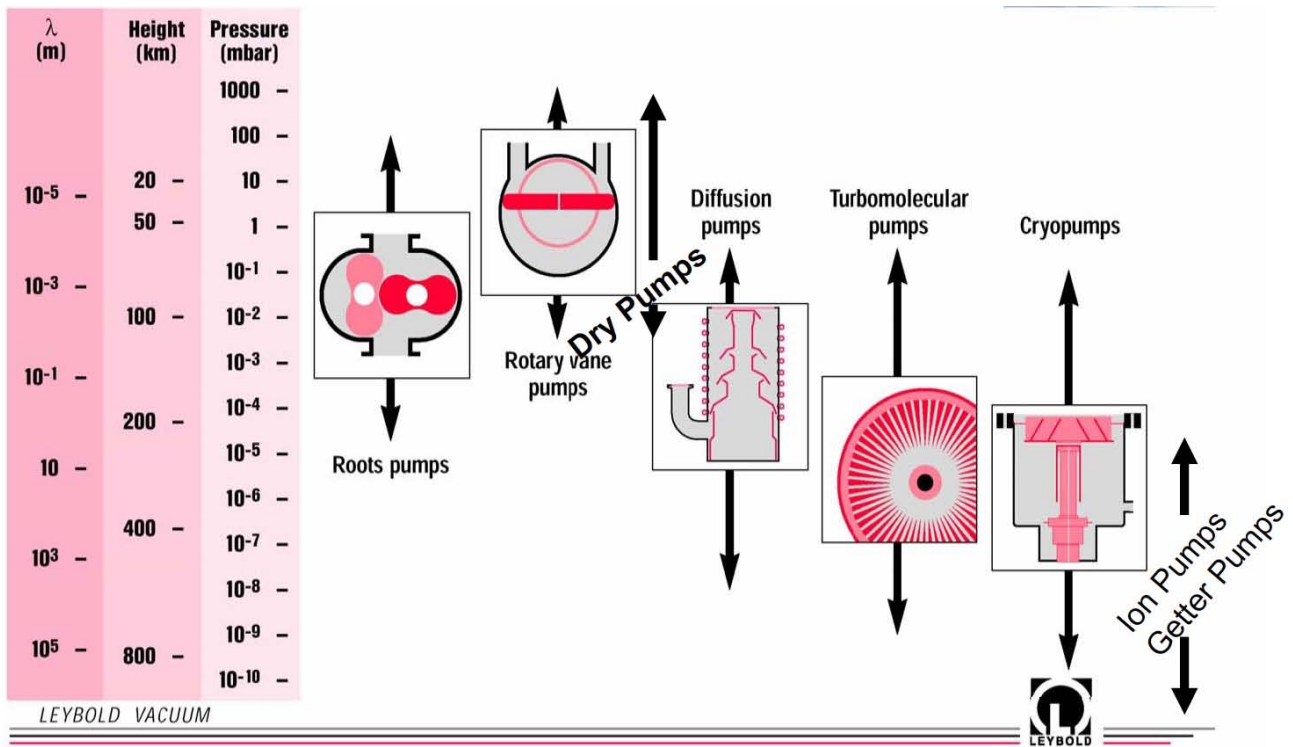


Figura 7: Tecnologie di pompe a vuoto per differenti range di pressione riportati nella terza colonna di sinistra. Nella prima e seconda colonna di sinistra sono riportati i valori del libero cammino medio molecolare e dell'altezza atmosferica corrispondenti a quei range di pressione.

più elevata). Tale limite non è determinato dal meccanismo di pompaggio, ma è imposto dalla solubilità dei gas nell'olio lubrificante. Infatti l'olio espulso attraverso la valvola di scarico è saturo dei gas o vapori che si sono in esso disciolti durante la fase di compressione, ritorna nel serbatoio dell'olio e successivamente è immesso di nuovo nella cavità cilindrica. L'olio rilascia parte dei gas o vapori in esso disciolti ed in questo processo si possono determinare le condizioni per un sensibile peggioramento delle prestazioni della pompa. In particolare, quando i gas aspirati sono in prevalenza vapori che si condensano nella fase di compressione (ad esempio vapori di acqua), per evitare il verificarsi di questa circostanza si ricorre ad un particolare accorgimento: zavorrare la pompa con l'aria dell'ambiente (apertura del *gas ballast*).

Per avere pompe meccaniche con velocità di pompaggio ancora più elevata è stata concepita la pompa rotativa a pistone rotante. In essa l'albero di rotazione del rotore è coassiale rispetto alla cavità cilindrica mentre il corpo del rotore (camma) è eccentrico rispetto all'albero. Un pistone cavo trascinato dalla camma eccentrica pone in comunicazione il recipiente da evacuare con la cavità cilindrica. La camma

nella sua rotazione fa sì che il pistone scorra con moto alternativo nella guida (oscillante nella sua sede) e metta alternativamente la camera di compressione in comunicazione con il recipiente da evacuare oppure la isoli. Il rotore durante il suo moto comprime i gas fino ad espellerli nell'atmosfera attraverso la valvola di scarico. Notiamo infine che le pompe a pistone rotante per le loro caratteristiche costruttive sono più adatte delle pompe a palette per le grandi portate volumetriche (50-500 m³/h).

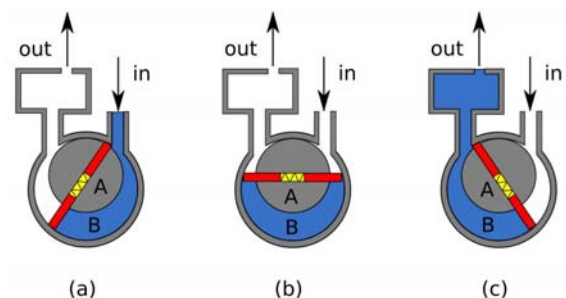


Figura 8: Schema di funzionamento di una pompa rotativa. In azzurro viene indicato il volume di fluido spostato durante un ciclo.

Le pompe a diffusione

Le pompe a diffusione non possono immettere i gas aspirati direttamente nell'atmosfera come nel caso delle pompe rotative, perchè la loro pressione di lavoro si estende da qualche 10^{-3} a 10^{-10} mbar per tutti i gas. Occorre prevedere allora che il recipiente da svuotare sia inizialmente connesso ad una pompa meccanica (pompa primaria) che porti il vuoto a valori tali da cadere nell'intervallo operativo della pompa a diffusione.

Nelle pompe a diffusione si utilizza un getto di molecole ad alta velocità di un vapore che ha la funzione di trasferire per urto quantità di moto alle molecole del gas da evacuare in direzione della bocca di pompaggio. Nelle pompe di prima generazione si utilizzavano vapori di mercurio, nelle pompe attuali si utilizzano oli speciali con tensioni di vapore a temperatura ambiente di $5 \cdot 10^{-9}$ - 10^{-10} mbar.

Le molecole di vapore, provenienti dal liquido in ebollizione localizzato alla base della pompa, passando attraverso una strozzatura anulare a forma di becco, acquistano una velocità di alcune centinaia di m/s diretta verso il basso, dove si trova la bocca di aspirazione connessa alla pompa meccanica che assicura il pre-vuoto, e verso la parete fredda della pompa. Le molecole del gas che arrivano alla bocca della pompa a diffusione vengono trascinate nel getto di vapore ed acquistano una quantità di moto diretta verso il basso. Quando le molecole di vapore del getto incidono sulla parete fredda vengono condensate e ritornano sotto forma di liquido nel bagno che sta alla base della pompa, assicurando la continuità del meccanismo di pompaggio. Il trasferimento di una quantità di moto netta alle molecole dei gas che attraversano il getto si traduce in una differenza di densità molecolare e quindi di pressione tra le due regioni separate dal getto di vapore (Figura 9).

Il peso molecolare degli oli impiegati è notevolmente superiore al peso molecolare dei gas residui (400 - 500 masse atomiche), ed il rapporto di compressione è più piccolo per gas residui di massa molecolare più bassa, quindi questo tipo di pompa è meno efficiente per i gas leggeri come l'idrogeno e l'elio.

Un tipico schema di pompa a diffusione a più stadi consiste di un cilindro con una flangia superiore per il collegamento al recipiente da evacuare e con un fondo contenente una resi-

stenza da fornello elettrico per produrre i vapori del fluido di pompaggio (negli attuali sistemi commerciali più diffusi si tratta di olio minerale particolare). La camicia esterna della pompa è raffreddata per circa due terzi della sua altezza con una serpentina in cui circola acqua.

Una bocca d'uscita posta in prossimità del fondo permette di scaricare i gas a pressione più elevata verso la pompa rotativa. Sulla bocca di connessione al recipiente sul condotto con la pompa meccanica sono poste trappole ben raffreddate (ad acqua o con freon o con azoto liquido) per evitare sia la diffusione del vapore d'olio nel recipiente da evacuare sia la diffusione del fluido nella pompa meccanica. La velocità di pompaggio in una pompa a diffusione varia con il tipo di gas. Notiamo che la pressione finale è determinata principalmente dalla tensione di vapore del fluido di pompaggio e più specificatamente dai prodotti che si formano attraverso il processo di rottura delle molecole del fluido stesso (*cracking*).

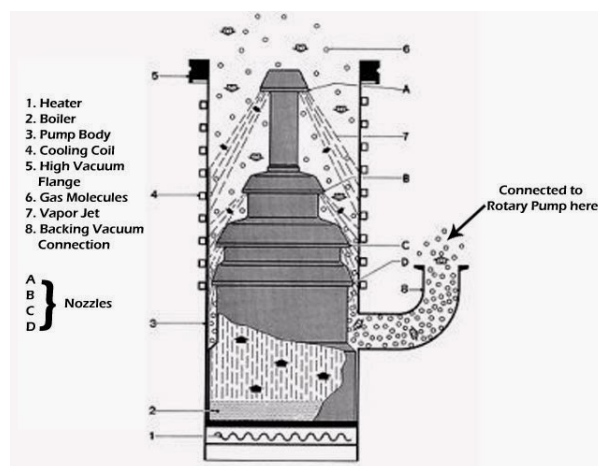


Figura 9: Schema di una pompa a diffusione.

Le pompe turbomolecolari

Le pompe turbomolecolari sono disponibili commercialmente dalla fine degli anni '50. Per il loro funzionamento è necessario disporre di una pompa meccanica primaria che mantenga una pressione di 10^{-3} mbar nella regione a pressione più elevata. Si ottengono così pressioni finali dell'ordine di 10^{-9} mbar e la velocità di pompaggio presenta un andamento praticamente costante in tutto l'intervallo operativo.

In questo tipo di pompe le molecole dei gas sono trascinate verso la bocca di evacuazione

da un sistema di palette opportunamente distanziate ed inclinate e poste in rapidissima rotazione all'interno di una cavità cilindrica. Le molecole che si trovano nelle due regioni del volume della pompa turbomolecolare separate dal sistema di palette in moto, hanno probabilità diverse di diffondere nei due sensi, ciò provoca densità molecolari differenti nelle due regioni e quindi un gradiente di pressione. In pratica le palette in rotazione urtano le molecole d'aria, spingendole verso le palette dello statore successivo che sono ferme, l'urto contro queste, grazie al loro orientamento, fa passare le molecole alle palette del rotore successivo, dove il processo si ripete. Queste palette sono orientate in maniera progressiva in modo da adattarsi alle differenti pressioni presenti all'interno della pompa turbomolecolare stessa (Figura 10).

Per avere un rapporto di pressione elevato ed un flusso netto elevato (requisiti base per una pompa da vuoto) si agisce sull'angolo di inclinazione delle palette e sul rapporto tra la distanza tra due palette successive e la loro larghezza. Nelle pompe turbomolecolari moderne la velocità di rotazione delle palette è di decine di migliaia di giri al minuto e la velocità periferica raggiunge centinaia di metri al secondo. Disponendo più sistemi di palette in cascata si ottengono rapporti di pressione sino a 10^6 . In una pompa turbo occorre assicurare l'assoluta assenza di agenti inquinanti del vuoto. Per questo motivo l'asse di rotazione della pompa è sospeso con cuscinetti magnetici che limitano l'attrito eliminando allo stesso tempo la necessità della lubrificazione.

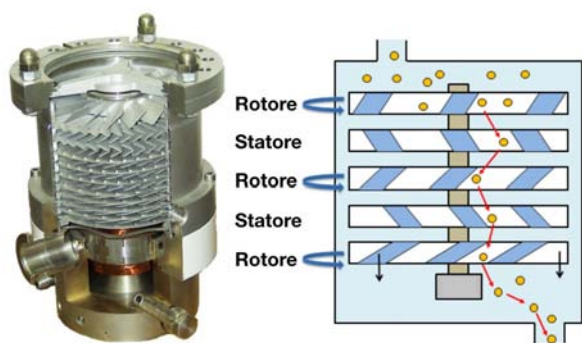


Figura 10: A sinistra la foto di una pompa turbomolecolare reale ed a destra il suo schema di funzionamento.

Le pompe a getter e ioniche

Queste pompe sono state sviluppate e commercializzate agli inizi degli anni '60. Esse sfruttano due processi distinti per evacuare le varie specie di gas presenti in un impianto a vuoto: l'adsorbimento chimico per i gas reattivi (ad esempio H_2 , N_2 , O_2 , H_2O , CO , CO_2) e l'assorbimento per i gas nobili o poco reattivi (He , Ne , Ar , CH_4 , ...).

Noi abbiamo già parlato nei paragrafi precedenti di adsorbimento chimico dei gas reattivi (*gettering*). Qui ricordiamo come alcuni materiali come il titanio, lo zirconio ed il tantalio posseggono notevoli capacità di adsorbimento chimico a temperatura ambiente nei confronti dei gas reattivi presenti nell'atmosfera.

Il titanio è tipicamente preferito per le applicazioni del vuoto a causa della relativamente alta tensione di vapore e della sua reattività chimica a largo spettro. In una pompa ionica la sorgente di titanio è riscaldata sino alla temperatura di sublimazione ($1500\text{ }^\circ\text{C}$) in maniera che produca un deposito (film) di titanio altamente reattivo sulle pareti che circondano la sorgente. Le molecole dei gas attivi che incidono sul film di titanio reagiscono chimicamente formando composti stabili quali ossidi, idruri e nitruri di titanio: si ha così una efficace azione di pompaggio nei confronti di tali gas.

Gli idruri di titanio devono trovarsi a temperatura ambiente o a temperatura inferiore per limitare a valori accettabili le pressioni di equilibrio per il processo di dissociazione. Negli impianti a vuoto il film di titanio è in grado di pompare i gas attivi per un tempo limitato (sino a quando la superficie dei film non è saturata) e quindi si rendono necessarie frequenti deposizioni e, se la portata dei gas è elevata, è richiesta una deposizione continua di titanio. La velocità di pompaggio cresce al diminuire della pressione. Al contrario, a pressioni sufficientemente basse ($P < 10^{-7}$ mbar) la velocità di pompaggio tende ad un valore limite indipendente dalla pressione.

In alcuni tipi di pompe ioniche il pompaggio dei gas nobili e dei gas meno reattivi (ad esempio il metano) è attuato mediante ionizzazione delle molecole con un fascio di elettroni. Gli ioni del gas nobile, prodotti per ionizzazione, sono indirizzati da intensi campi elettrici sul film di titanio dove vengono intrappolati e successivamente ricoperti dal deposito di nuovi strati di titanio. Il fascio di elettroni, prodotto da un

filamento caldo, ha un'efficienza di ionizzazione piuttosto limitata. Per questa ragione, come per i vacuometri a ionizzazione, si è preferito il procedimento di scarica di tipo Penning, cioè in presenza di un campo magnetico (Figura 11).

La pompa ionica in questo caso è costituita da un sistema di celle di Penning adiacenti immerse in un campo magnetico diretto assialmente d'intensità 0.1-0.2 T. Le differenze di potenziale tra la struttura anodica e quella catodica possono variare tra 2 e 10 kV. La scarica si autosostiene attraverso la ionizzazione multipla dei gas residui e attraverso l'estrazione di elettroni dal catodo freddo che viene bombardato dagli ioni prodotti nella scarica stessa. Gli ioni che incidono sul catodo con energie di parecchie decine di eV possono liberare, oltre agli elettroni, anche gli atomi superficiali del materiale (effetto di *sputtering*) e penetrare in profondità rimanendo intrappolati nel reticolo cristallino del catodo. Costruendo il catodo in titanio si ottiene, oltre all'assorbimento dei gas nobili ionizzati, la formazione continua di un film di titanio che provvede all'adsorbimento chimico dei gas reattivi.

Il processo di assorbimento dei gas nobili è in realtà più complesso in quanto, a causa dello sputtering che erode progressivamente il catodo, gli atomi imprigionati nel reticolo possono essere rimessi in circolazione. In pratica si realizzano forme degli elettrodi e del catodo tali da ottimizzare il processo di assorbimento degli ioni.

Anche le pompe ioniche hanno bisogno ovviamente di un sistema di pompe ausiliario che produca un vuoto primario compreso tra 10^{-1} e 10^{-3} mbar, così da consentire alle pompe ioniche di arrivare a vuoti dell'ordine di 10^{-9} mbar.

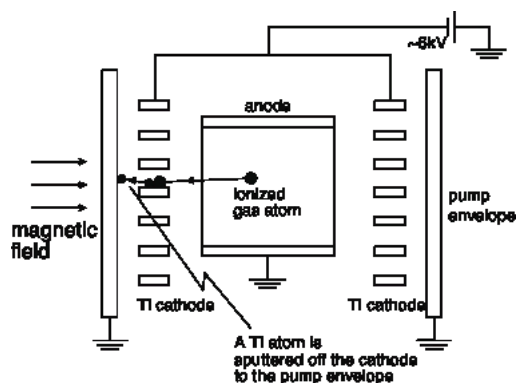
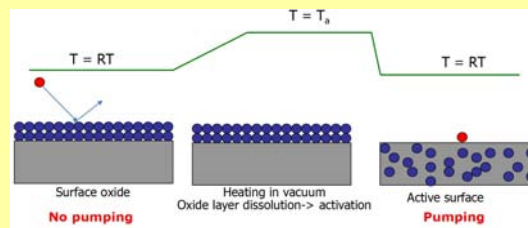


Figura 11: Schema di funzionamento di una pompa ionica.

Il getter non evaporativo (NEG)



Uno dei successi più spettacolari delle pompe a getter è rappresentato dal raggiungimento delle condizioni di vuoto estremo nella ciambella di 27 km di lunghezza della macchina acceleratrice di particelle LEP (acronimo di Large Electron Positron collider) sita presso il CERN di Ginevra. In questo caso sono state usate delle pompe getter denominate NEG (Non Evaporated Getter). Si tratta di strisce di ZrAl (zirconio-alluminio) che formano composti stabili con i prodotti desorbiti dalle pareti d'alluminio della lunga camera da vuoto di LEP. Quando la superficie del getter è saturata, può essere rigenerata scaldando il materiale così da consentire la diffusione del composto stabile all'interno della matrice solida del getter.

Le pompe criogeniche

Una parete fredda esplica un'azione di pompaggio nei confronti di quei vapori o gas che hanno un'elevata temperatura d'ebollizione e presentano quindi una piccola tensione di vapore alla temperatura della parete fredda. Questo è il principio sfruttato dalle pompe criogeniche. È importante osservare che con le pompe criogeniche la pressione ultima di un gas è sempre superiore alla tensione di vapore saturo dei gas alla temperatura della parete fredda.

L'acqua e l'anidride carbonica raggiungono valori inferiori a 10^{-9} mbar a 77 °K, mentre per il metano, l'argon, l'azoto e l'ossido di carbonio occorre arrivare sino a 20 °K per avere simili valori della tensione di vapore e per il neon a circa 7 °K. L'idrogeno e l'elio rappresentano il maggior problema. Infatti l'idrogeno solidifica a temperature inferiori a quella d'ebollizione dell'elio liquido e quindi il suo crio-assorbimento

viene ottenuto abbassando la temperatura della parete fredda sotto 4 °K o sfruttando particolari meccanismi quali l'intrappolamento criogenico (*cryotrapping*) e l'assorbimento criogenico (*cryosorption*). La solidificazione dell'elio non è osservabile regolando semplicemente la temperatura e quindi la percentuale d'elio negli impianti deve essere abbassata utilizzando altri metodi.

In realtà, per valutare la velocità effettiva di pompaggio nel caso di pompe operanti alla temperatura dell'elio liquido, bisogna tener conto della presenza di uno schermo termico. Quest'ultimo è normalmente raffreddato con azoto liquido ed ha la funzione di ridurre la potenza d'irraggiamento termico incidente sulla parete fredda e di ridurre quindi il consumo di elio liquido. Tale schermo riduce la velocità effettiva di pompaggio sia attraverso una diminuzione della conduttanza sia attraverso una riduzione della velocità media delle molecole e quindi del loro flusso.

La quantità di gas che può essere pompata da una parete fredda è limitata dal fatto che lo spessore di solido depositato sulla parete riduce progressivamente l'efficacia di pompaggio. Per comprendere come ciò si produca è sufficiente tener presente che la temperatura della superficie libera del solido si discosta sempre di più da quella della parete fredda al crescere dello spessore della sostanza condensata. Questo è dovuto al fatto che la potenza depositata sulla superficie libera del solido (per irraggiamento da parte delle pareti del recipiente o dello schermo ed energia termica delle molecole catturate) deve essere evacuata attraverso lo strato solido che possiede una conducibilità termica generalmente abbastanza piccola. Per questa ragione la pompa criogenica deve essere attivata soltanto dopo aver effettuato un pre-vuoto nel recipiente (tipicamente 10^{-3} mbar) con un'altra pompa e deve essere periodicamente rigenerata. La rigenerazione consiste nell'isolare la pompa dal recipiente da evacuare e nel portare la superficie fredda a temperatura ambiente in maniera che lo strato solido evapori ed i vapori che ne risultano vengano evacuati da una pompa meccanica.

La pompa criogenica può essere realizzata utilizzando come elemento refrigerante un bagno di liquido (N_2 , H_2 , He) oppure un gas freddo (in genere He) che viene fatto circolare in maniera continua. Lo schema di pompa a bagno che è

più semplice da realizzare e meno costosa ha una parete del recipiente più interno, riempito con elio liquido che serve come superficie di condensazione. Per limitare il consumo di elio liquido il recipiente è circondato da uno schermo raffreddato con azoto liquido che riduce, come si è detto precedentemente, la velocità di pompaggio ma agisce come pompa criogenica dei gas o vapori che hanno una elevata temperatura di ebollizione (ad esempio CO_2). I vantaggi offerti da una pompa criogenica sono rappresentati da elevate velocità di pompaggio (alcune migliaia di l/s) ottenute con dimensioni della pompa abbastanza contenute, dalla possibilità di sagomare la superficie di condensazione secondo le esigenze sperimentali, dall'assenza di vibrazioni (nel caso delle pompe criogeniche a bagno).

Gli svantaggi sono rappresentati dalla ridotta autonomia (necessità di rabboccare i liquidi criogenici evaporati e di rigenerare la superficie fredda in maniera periodica), dalla scarsa efficacia nel pompare l'idrogeno, dall'impossibilità di pompare l'elio. Nelle pompe a flusso continuo di gas, la superficie fredda è uno scambiatore di calore in cui evapora tipicamente dell'elio liquido pompato continuamente in esso. In anni recenti si sono diffuse attualmente criopompe in cui la parete fredda è realizzata sfruttando la potenza refrigerante prodotta da criogeneratori. I criogeneratori hanno bisogno di un robusto compressore di elio che raggiunge pressioni dell'ordine di un centinaio di atmosfere, connesso alla macchina termica tramite conduttanze flessibili di acciaio inox. Per talune applicazioni il limite principale di questa soluzione è rappresentato dalle vibrazioni associate al compressore.

Il vuoto nelle grandi macchine della ricerca

Tra i progetti di ricerca della *big science* ben tre hanno bisogno di creare un ambiente di ultra-alto-vuoto in elevati volumi (migliaia di metri cubi) e con controlli e monitoraggi sofisticatissimi.

Questi esperimenti colossali sono frutto di finanziamenti notevoli e distribuiti su lunghi archi di tempo, a cui lavorano gruppi numerosi e coordinati di scienziati e tecnici, dotati di grandi laboratori e apparecchiature d'avanguardia.

Nei paragrafi seguenti illustreremo le particolarità relative ai sistemi di vuoto di queste grandi macchine da ricerca.

Il più potente acceleratore di particelle: LHC

Il Large Hadron Collider (LHC) è l'acceleratore di particelle più potente al mondo situato presso il CERN di Ginevra [5]. Esso accelera due fasci di protoni fino ad un'energia equivalente a 7.5 mila miliardi di elettronvolt ed è utilizzato per le ricerche sperimentali nel campo della fisica delle particelle. È grazie a LHC che i due esperimenti, denominati ATLAS e CMS, hanno scoperto il bosone di Higgs tra le collisioni dei due fasci di protoni, la particella responsabile della massa di tutte le particelle conosciute.

LHC ha la particolarità di non avere uno solo, ma tre sistemi di vuoto:

1. vuoto per i due fasci di protoni,
2. vuoto di isolamento termico per i magneti superconduttori,
3. vuoto di isolamento termico per la linea di distribuzione dell'elio liquido.

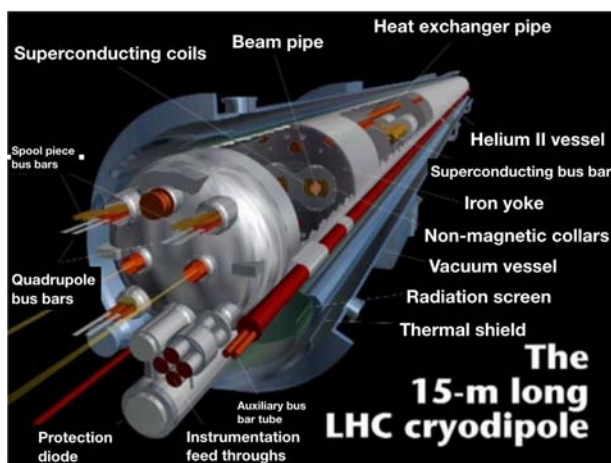


Figura 12: Disegno di uno dei 1010 dipoli superconduttori di LHC lunghi 15 m e con un campo magnetico nominale di 8 T.

LHC è in grado di mantenere in orbita i fasci di protoni a quella energia grazie a migliaia di dipoli e quadrupoli superconduttori (Fig. 12). Questi crio-magneti sono collocati in 16 sezioni d'arco lunghe 48 km e mantenuti a 1.9 K mediante un bagno di elio superfluido. Le sezioni

d'arco sono connesse tra loro con 6 km di sezioni dritte, mantenute a temperatura ambiente, dove si trovano i sistemi di controllo del fascio e le regioni di inserimento per gli esperimenti.

È necessario un ultra-alto-vuoto per i tubi in cui i fasci di particelle si muovono. Negli archi, l'ultra-alto-vuoto è mantenuto dal pompaggio criogenico. Poiché i tubi del fascio sono raffreddati a temperature estremamente basse, essi costituiscono una criopompa quasi perfetta ed i gas si condensano e aderiscono alle pareti molto facilmente. Appena due settimane di pompaggio sono necessarie per portare la pressione a valori inferiori a 10^{-10} mbar.

L'ultra-alto-vuoto nelle sezioni a temperatura ambiente è mantenuto grazie a due tecniche: una d'avanguardia ed una tipica dei sistemi di ultra-alto-vuoto. In primo luogo queste sezioni utilizzano diffusamente un *getter coating non evaporabile* o NEG - sviluppato e industrializzato al CERN - che assorbe le molecole residue quando viene riscaldato. Esse sono rivestite da un *coating* di lega di titanio-zirconio-vanadio depositata all'interno dei tubi del fascio. Funziona come un sistema di pompaggio distribuito, efficace per rimuovere tutti i gas, ad eccezione del metano e dei gas nobili che vengono invece rimossi da 780 pompe ioniche. In secondo luogo, le sezioni a temperatura ambiente consentono di fare il *baking* di tutti i componenti a 300 °C. Questa operazione deve essere eseguita a intervalli regolari per mantenere il vuoto alla pressione bassa desiderata.

Il volume più grande da pompare a LHC è il vuoto di isolamento termico necessario per mantenere le parti criogeniche a 1.9 K e ridurre la quantità di calore che proviene dall'ambiente circostante posto a temperatura ambiente. Il vuoto di isolamento ha una pressione di 10^{-6} mbar per un volume complessivo di circa 9000 m³ per i magneti superconduttori e di 5000 m³ per la linea di distribuzione d'elio liquido. In confronto, il volume del vuoto dei fasci di particelle accelerate è piccolo, infatti esso è costituito da due anelli con un raggio di 3 cm ed una circonferenza di circa 27 km per un volume totale di 150 m³.

In LHC il vuoto arriva a circa 10^{-10} mbar nel tubo del fascio a temperatura criogenica ed a 10^{-11} mbar vicino ai punti di interazione dove si verificano le collisioni che si vogliono studiare. Questi livelli di pressione sono circa cento volte

inferiori a quelli dell'atmosfera lunare; LHC è in effetti lo spazio più vuoto del sistema solare.

Con l'accensione dei fasci nel 2008, il Large Hadron Collider (LHC) è diventato il più grande sistema di vuoto operativo al mondo che utilizza una vasta gamma di tecnologie di vuoto. La costruzione di questo sistema di vuoto ha richiesto più di 250.000 giunti saldati e 18.000 guarnizioni a vuoto. I sistemi di vuoto di LHC sono dotati inoltre di 170 misuratori di ionizzazione Bayard-Alpert e di 1084 strumenti di tipo Pirani e Penning per monitorare la pressione del vuoto.

Gli interferometri per onde gravitazionali: LIGO e VIRGO

L'osservazione delle onde gravitazionali generate dalla fusione di coppie di buchi neri e di stelle di neutroni è sicuramente l'evento scientifico più importante di questi ultimi anni, che apre una nuova finestra d'osservazione sull'universo.

Questo è stato reso possibile grazie ai sofisticati miglioramenti approntati negli ultimi anni ai tre grandi interferometri di Michelson realizzati per rilevare le onde gravitazionali: il primo denominato Advanced Virgo, con bracci lunghi 3 km e situato nel comune di Cascina (Pi) e gli altri due identici denominati Advanced LIGO, con bracci lunghi 4 km situati negli USA [6].

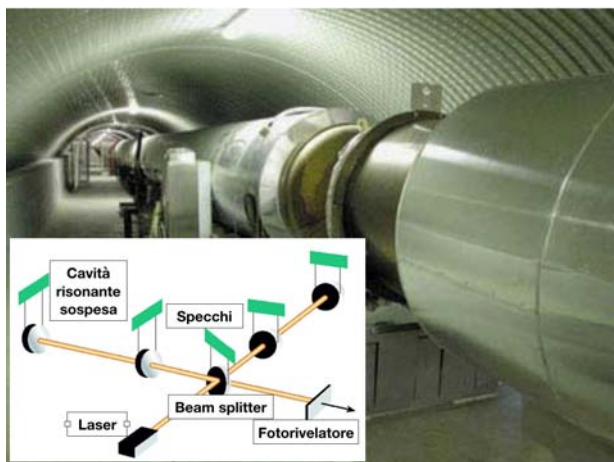


Figura 13: Una parte di uno dei tubi di acciaio di Advanced Virgo in cui si vedono gli anelli di supporto saldati al tubo a spirale per aumentare notevolmente l'integrità strutturale del cilindro. Nel riquadro è mostrato lo schema di interferometro di Michelson.

I componenti ottici di questi enormi interferometri sono collocati in tubi a vuoto dal diametro

superiore al metro e di lunghezza di alcuni chilometri, per un volume di circa una decina di migliaia di metri cubi, e tenuti a pressioni dell'ordine di 10^{-9} mbar (Fig. 13). L'area centrale, il cuore dell'interferometro è un immenso tavolo ottico sotto ultra-alto-vuoto. Ogni elemento ottico è sospeso ad un sistema di isolamento sismico contenuto in una torre da vuoto. Le torri contengono delle cavità Fabry-Perot e sono connesse tra loro da tubi a vuoto.

Creare e mantenere questo vuoto è assolutamente essenziale per il funzionamento di questi apparati. L'ambiente in condizioni di vuoto impedisce alle onde sonore di produrre vibrazioni sugli specchi, poiché il suono non può attraversare il vuoto. Le variazioni di temperatura dell'aria, se presente all'interno dei tubi del fascio, altererebbero la forma dell'ottica ad un livello tale da distruggere la qualità del fascio laser. Inoltre le correnti d'aria all'interno dei tubi potrebbero anche causare il riflesso del laser rendendo impossibile la rilevazione dell'onda gravitazionale. Entrambe queste fonti di rumore possono essere eliminate operando in vuoto.

Ci sono voluti 40 giorni di pompaggio costante per evacuare i colossali tubi fino alla loro pressione operativa. In questo tempo, le pompe turbomolecolari hanno rimosso la maggior parte dell'aria nei tubi mentre i tubi stessi sono stati riscaldati a 150-170 °C per rimuovere i gas residui delle pareti interne. Il mantenimento di questo vuoto richiede il funzionamento costante di pompe ioniche, che estraggono le molecole fuoriuscite dai tubi e dalle altre strutture all'interno dei sistemi di vuoto, e di criopompe a corrente liquida che rimuovono le molecole di acqua. Per raggiungere i bassissimi valori di pressione richiesti sono stati sviluppati processi metallurgici speciali per la fabbricazione dei componenti, come il desorbimento dell'idrogeno a 400 °C.

I tubi a vuoto con un diametro di 1.20 m sono stati costruiti in segmenti di circa 20 m, con acciaio inox 304L di soli 3 mm di spessore, e saldati a spirale continua. Con il suo contenuto di carbonio relativamente basso questo acciaio è resistente alla corrosione, soprattutto nelle zone saldate. La ruggine si è inevitabilmente prodotta all'interno dei tubi a vuoto essendo la loro fabbricazione avvenuta negli anni '90. Quindi prima della installazione, le superfici interne dei tubi sono state meticolosamente lucidate e pulite per rimuovere la ruggine, al fine di evitare

che granelli di ossido cadano sul fascio laser o migrino su superfici ottiche.

I tubi a vuoto sono situati all'interno di tunnel che devono rimanere molto stabili su lunghi periodi di tempo. I tunnel sono fatti di elementi prefabbricati di cemento di circa 20 m di lunghezza sostenuti da un migliaio di pilastri che raggiungono gli strati più stabili del terreno.

Prossimo reattore per la fusione nucleare calda: ITER

The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) è un progetto internazionale che si propone di realizzare un reattore a fusione nucleare di tipo sperimentale in grado di produrre più energia di quanta il processo ne consumi per l'innesco ed il sostentamento della reazione di fusione [7]. Nello specifico, ITER è un reattore deuterio-trizio in cui il confinamento del plasma è ottenuto in un campo magnetico generato da un magnete superconduttore all'interno di una macchina a ciambella denominata Tokamak. ITER sarà il più grande Tokamak del mondo con un plasma di raggio 6.2 m ed un volume di 840 m³ (Fig. 14a).

La ciambella sottovuoto, ed il criostato per il magnete di ITER, sono tra i più grandi sistemi di vuoto mai costruiti con i rispettivi volumi di 1.400 m³ e di 8.500 m³ e pressioni di 10⁻⁸ mbar e < 10⁻⁶ mbar. Saranno necessarie tecniche sofisticate per il monitoraggio e la manutenzione di questi sistemi. Una volta in esercizio, non sarà più possibile accedere alla macchina.

Prima di iniziare la reazione di fusione è necessario eseguire il pompaggio a vuoto per eliminare tutte le sorgenti di molecole organiche che altrimenti sarebbero dissociate nel plasma caldo. Pompe meccaniche e pompe criogeniche potenti devono evacuare l'aria dalla ciambella e dal criostato fino a quando la pressione interna è scesa ai livelli richiesti. Considerando il volume di ITER, questa operazione richiederà 24-48 ore.

I principali sistemi di pompaggio sono le sei pompe di scarico della ciambella, le quattro criopompe per i sistemi di iniezione a fascio neutro, utilizzate nel riscaldamento del plasma, e le due criopompe per il criostato necessario per il raffreddamento dei magneti superconduttori. Le complesse criopompe sono state progettate per le esigenze specifiche di ITER. Sono tutte basate su criopaneli, raffreddati con elio supercriti-

co e ricoperti di carbone attivo come materiale assorbente. La ricerca e lo sviluppo hanno dimostrato che il carbone da gusci di cocco finemente macinato ha la giusta densità e porosità per imprigionare le particelle di elio in ITER.

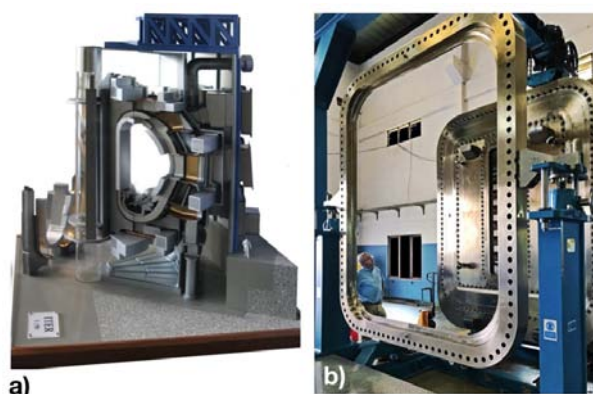


Figura 14: a) Modello artistico di una porzione di ITER. b) La più grande flangia da vuoto con guarnizione al mondo pronta per i test di accettazione dopo la costruzione, ideale per i molteplici accessi nel vuoto di ITER. Notare le dimensioni del toroide e della porta d'accesso paragonandole alle dimensioni degli uomini in figura.

Una cinquantina di porte, nella ciambella di ITER consentono l'accesso a operazioni di movimentazione remota, sistemi di diagnostica, riscaldamento e pompaggio del vuoto. Le porte d'accesso più grandi hanno superfici di 5 m², ma un'area non sigillata della larghezza di un capello umano è sufficiente a distruggere il vuoto e fermare le prestazioni necessaria per la fusione termonucleare.

È stata progettata e prodotta una replica di dimensioni maggiori delle più grandi porte equatoriali per testare la sigillatura a vuoto di quella che sarà la porta più grande mai costruita su un Tokamak: 4.8 × 3.3 × 4.8 m³ (Fig. 14b). Il grande test di tenuta è pronto in una fabbrica di Bangalore, in India. L'impianto di prova è stato appena completato ed è di dimensioni impressionanti (circa 5 metri di altezza e di lunghezza) e dal peso di circa 19 tonnellate. Dopo il test sarà spedito a ITER, dove verrà utilizzato per testare l'assemblaggio e la funzionalità di una serie di grandi guarnizioni a vuoto e convalidare le tecnologie di sigillatura proposte per il primo plasma e le successive fasi operative di ITER. La guarnizione di tenuta non solo consente di testare le più grandi guarnizioni

rettangolari smontabili, ma permette anche di preparare tecniche di installazione che saranno fondamentali per ottenere la qualità del vuoto richiesta. L'impianto può essere riscaldato a 240°C per simulare il baking del serbatoio di ITER ed ha anche la possibilità di applicare carichi alle flange per confermare la solidità della tenuta.

Conclusioni

Nel lavoro di ricerca non sempre c'è bisogno di conoscere i principi fondamentali del vuoto, tuttavia, spesso bisogna sapere come i diversi parametri dell'apparato sperimentale influenzeranno il vuoto.

La progettazione di un sistema di vuoto si basa essenzialmente nel determinare outgassing, pressione, conducibilità e velocità di pompaggio. In particolare, le sorgenti di gas devono essere sotto controllo in tutte le fasi del processo e/o dell'esperimento, al fine di ottenere la pressione necessaria.

La caratteristica dell'ultra-alto-vuoto è determinata in gran parte dai fenomeni superficiali, cioè dall'interfaccia tra vuoto e pareti. Le pompe per ultra-alto-vuoto agiscono mediante l'assorbimento fisico o chimico dei gas, la sepoltura di ioni nelle superfici o la condensazione su criopannelli. Le superfici delle pareti della camera devono essere accuratamente condizionate da un bakeout o da un altro trattamento per avere un desorbimento statico o stimolato del gas sufficientemente basso.

Le tecnologie del vuoto più avanzate sono state sviluppate per la ricerca fondamentale, ciò nonostante esse hanno trovato uso anche nel quotidiano: ad esempio la tecnologia del UHV ha migliorato notevolmente le prestazioni dei pannelli solari termici.

Ringrazio la Prof.ssa Stefania Spagnolo per l'accurata lettura del manoscritto e i suoi suggerimenti che mi hanno permesso di migliorare notevolmente la scrittura e la comprensibilità dell'articolo.



[1] CAS CERN Accelerator School : Vacuum Technology, Iñigo Aro, Spain, Ed.: Daniel A. Brandt CERN - 2007 - 003, 16 - 24 May 2006.

The US Particle Accelerator School, 2017, Vacuum Science and Technology for Accelerator Vacuum Systems Yulin Li and Xianghong Liu.

- [2] M. W. Zemansky, *Calore e Termodinamica*, Zanichelli (1970).
- [3] B. Ferrario, *Introduzione alla Tecnologia del Vuoto*, edizione riveduta da A. Calcatelli, Patron Editore - Bologna (1999).
- [4] Fulvio Ricci, *Dispense di Fisica e Tecnologia del Vuoto*, Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza, Roma, Italia.
- [5] *The Large Hadron Collider. Conceptual Design*. CERN/AC-95-05 (LHC) . 20 October 1995.
- [6] <http://www.ligo.org>, <https://www.ego-gw.it> .
- [7] <https://www.iter.org> .



Gabriele Chiodini: Nato a Bergamo nel 1967. Si è laureato a Milano nel 1995 con una tesi sui rivelatori a pixel al Silicio per ATLAS a LHC e nel 1998 ha conseguito il PhD con uno studio sperimentale sulla turbolenza nei plasmi. Dal 1999 al 2002 è stato ricercatore al Fermi National Accelerator Laboratory di Chicago dove si è occupato dello studio dei quark pesanti. Dal 2003 è ricercatore presso la sezione INFN di Lecce e si occupa dello studio del Modello Standard e della ricerca di nuova Fisica nell'esperimento ATLAS a LHC. È ideatore e responsabile del bersaglio attivo di diamante con elettrodi grafitati dell'esperimento PADME ai Laboratori Nazionali di Frascati finalizzato principalmente alla ricerca di un ipotetico fotone oscuro.