

Fasci atomici e molecolari

(lez 11; 21' 20")

Quando si parla di atomi e molecole, oltre al caso in cui il campione è posto in una cella, abbiamo il caso in cui il campione è costituito da un fascio.

In altre parole le particelle si muovono in una direzione privilegiata, e in maniera 'collimata'.

Per realizzare il fascio lo schema è semplice.

Si mettono le molecole in una camera nella quale si è prima creato un certo grado di vuoto. In una camera attigua, separata da una parete, si crea un vuoto più spinto della camera precedente. Se nella parete si pratica un foro, le particelle 'diffondono'. Con una terza camera, con vuoto ancora più spinto è possibile collimare il fascio, per mezzo di un secondo foro.

Quello che faremo è studiare questa diffusione delle molecole, e perché e come si crea un fascio (anziché una diffusione caotica).

- **Motivazioni per studiare le particelle in fasci**

Prima di affrontarne lo studio vediamo una carrellata di motivazioni e vantaggi di studiare i fasci atomici e molecolari.

1) possibilità di studiare atomi e molecole in regime libero da collisioni.

La questione è che se abbiamo un gas di atomi o molecole, posto in un recipiente, queste particelle si muovono per agitazione termica, e dunque sono soggette a collisioni casuali, provenienti da tutte le direzioni.

Possiamo vedere queste collisioni come delle perturbazioni, che modificano leggermente gli spettri energetici di questi oggetti.

Un effetto è l'allargamento delle righe di emissione dei diversi livelli (l'allargamento di riga sarà studiato in seguito).

Esiste già un allargamento delle righe di emissione (la radiazione emessa in seguito ad una transizione non è monocromatica, a causa del tempo di vita medio del livello superiore della transizione) dovuto al fatto che vite medie dei livelli sono finite.

Ma accanto a questo allargamento c'è l'allargamento dovuto alle collisioni 'termiche', che sono una perturbazione.

Se studiamo le particelle nel fascio le collisioni non ci sono, almeno in prima approssimazione, e dunque possiamo studiare l'allargamento di riga 'intrinseco' (*allargamento naturale di riga*, dovuto alle vite medie finite) senza quello dovuto alle collisioni.

Infatti, innanzitutto consideriamo che se le particelle si muovono 'in fascio', per

definizione la loro velocità 'trasversale' è (perssoché) nulla, e dunque non collidono tra loro in direzione trasversale al fascio. D'altra parte, nella camera in cui viaggia il fascio abbiamo creato un vuoto, anche abbastanza spinto, e dunque anche la probabilità di una collisione con una particella di gas presente nella camera è trascurabile.

La probabilità di collisioni più rilevante è quella tra le stesse particelle del fascio, nella direzione del fascio.

Il motivo è che le particelle, già dalla prima camera hanno una certa distribuzione in energia (che è essenzialmente energia cinetica), diciamo la distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

Quindi, anche quando poi diffondono, non tutte hanno la stessa velocità, e dunque c'è una certa probabilità che una particella più veloce collida con una particella più lenta che le sta davanti.

Questo è il tipo di collisione più probabile in un fascio, ma è comunque trascurabile.

Dunque il primo motivo per studiare le particelle in fasci è quello di liberarsi dalla perturbazione degli urti.

2) possibilità di introdurre perturbazioni controllate

Il concetto è analogo al precedente : non avendo le collisioni, se si introduce una perturbazione, come un campo elettrico o un campo magnetico, è possibile studiare gli effetti dovuti solo a questa perturbazione (effetto Zeeman, effetto Stark).

Tra l'altro è possibile mandare anche una radiazione elettromagnetica, ad esempio laser.

In questo caso, anticipiamo che il fatto di avere a che fare con un fascio ci elimina (quasi del tutto) l'effetto Doppler.

Infatti, se mandiamo il fascio laser in direzione perpendicolare alla direzione del fascio, poiché quello che conta è il prodotto scalare tra il vettore d'onda della radiazione e la velocità delle particelle, l'effetto è nullo.

In realtà questo è vero solo in prima approssimazione. Infatti qualunque fascio ha sempre una piccola divergenza (fascio non perfettamente collimato), cioè la tendenza ad allargarsi, e questo perché le particelle conservano sempre una seppu piccola componente trasversale della velocità.

Come ordine di grandezza ricordiamo che l'allargamento naturale di riga, dovuto alla vita media finita del livello che emette quella riga è dato da

$$\Delta \nu = \frac{1}{2 \tau}$$

dove τ è la vita media del livello. Poiché l'ordine di grandezza della vita media è di

alcune decine di nanosecondi, l'allargamento naturale è di qualche megahertz.

Invece l'allargamento Doppler, per luce visibile è dell'ordine di alcuni GHz. Dunque ci sono tre ordini di grandezza, e se c'è effetto Doppler la larghezza naturale di riga è completamente nascosta!

Allora ci sono due ordini di vantaggi. Il primo è che se per esempio volessi risalire alla vita media del livello, se elimino l'effetto Doppler lo posso fare, senò no. Un altro vantaggio è la 'capacità risolutiva' : se ho due livelli molto vicini, se ci fosse l'allargamento Doppler non riuscirei a risolvere le due righe, se la loro distanza è più piccola della larghezza Doppler.

Il prof richiama il criterio di Reyleigh, se la separazione è minore della larghezza non posso risolvere due righe.

Se non ci fosse l'allargamento Doppler, ma solo l'*allargamento naturale di riga* (che abbiamo visto essere mille volte più piccolo) la separazione delle due righe sarebbe evidentissima.

Allo stesso modo potremmo studiare effetti quali il Lamb shift, etc.

3) Possibilità di studiare processi elementari nelle reazioni chimiche facendo interagire due fasci.

In chimica-fisica si cerca di studiare la 'reazione elementare' tra singoli atomi. Se si manda un fascio del primo reagente contro un fascio del secondo, si può studiare la sezione d'urto della reazione (probabilità che avvenga).

Altro fatto : capire quali sono i potenziali della reazione : quando due atomi si avvicinano, i due spettri energetici si modificano, creando un potenziale molecolare : se si crea un potenziale 'bounding' la 'molecola istantanea' che si forma è stabile, e dunque 'la reazione avviene'.

4) Ribadiamo che con i fasci si elimina l'allargamento Doppler. Abbiamo accennato al fatto che il fascio non è mai perfettamente collimato, e dunque c'è sempre una piccola componente trasversale della velocità delle particelle che causa un piccolo allargamento Doppler.

In realtà, anche se si avesse un fascio perfettamente collimato si avrebbe un allargamento dovuto all'effetto Doppler del second'ordine.

Il prof approfondisce la questione.

Per studiare l'allargamento Doppler c'è bisogno di un approccio relativistico.

Se si impongono la conservazione dell'energia e dell'impulso si ottiene una 'formula dell'allargamento Doppler'. In questa formula c'è un primo termine che dipende dal prodotto scalare tra il vettore d'onda dell'onda elettromagnetica incidente e la velocità della particella in questione. Abbiamo già detto che se questi due vettori sono perpendicolari, questo primo termine è nullo.

Tuttavia c'è anche un secondo termine, che dipende dal quadrato della velocità delle particelle.

Allora, per eliminare anche questo secondo termine, e ridurre ulteriormente l'allargamento di riga, si possono adottare tecniche di laser cooling, in modo che le particelle abbiano una velocità bassissima.

In definitiva, eliminando l'allargamento possiamo fare della spettroscopia ad altissima risoluzione spettrale.

5) Possibilità di studiare la popolazione molecolare in 'stati particolari' interni.

Se si produce un fascio di molecole, ad una certa temperatura, in generale queste si troveranno nello stato 'elettronico' fondamentale.

Tuttavia lo stato energetico della molecola è caratterizzato, oltre che dallo 'stato elettronico', anche dagli stati vibrazionali, e dagli stati rotazionali, che sono ancora più fitti.

Dunque, in effetti, la popolazione del fascio non sta tutta nello stato di minima energia, ma è comunque distribuita in energia (Maxwell Boltzmann), popolando i vari livelli vibrazionali e rotazionali in base alla temperatura.

Il problema è dunque che se andiamo a studiare una molecola poliatomiche, mandando della radiazione, questa radiazione può essere assorbita non solo dal livello fondamentale, ma da uno qualunque di questi livelli vibrazionali e rotazionali. Dunque lo spettro che si ottiene (per fluorescenza, cioè riemissione) è uno spettro molto ricco di righe.

L'ideale sarebbe che tutte le molecole si trovassero oltre che nello stato elettronico fondamentale, anche nello stato vibrazionale fondamentale ($V=0$) e nello stato rotazionale fondamentale ($J=0$).

In questo caso la molecola sarebbe 'una specie di atomo', e si avrebbero due vantaggi.

Il primo vantaggio sarebbe che risulterebbe più intenso l'assorbimento. In altri termini, avendo tutte le molecole nello stesso stato, che è lo stato che mi interessa, parteciperebbero all'interazione con la radiazione che voglio studiare. Il secondo vantaggio sarebbe che gli spettri sarebbero molto più semplici, essendo coinvolto solo un livello (come livello di partenza).

Illustrati i vantaggi, poniamoci la questione di come realizzare queste condizioni.

Un prima idea sarebbe quella di abbassare la temperatura, ma questa via ha problemi: le temperature richieste sarebbero bassissime, e le molecole liquefarebbero o solidificherebbero.

Quindi ecco che viene in aiuto lo studio delle molecole sotto forma di fascio. L'idea è di far 'espandere' il fascio delle molecole che vogliamo studiare in una camera in cui sia presente del gas nobile, o comunque inerte.

Attraverso complicati processi termodinamici (espansione supersonica) l'energia degli stati 'interni' delle molecole del fascio (che in questo contesto si definiscono molecole 'seed') si trasferisce in energia cinetica delle molecole del gas circostante.

il risultato è che "si raffreddano le temperature vibrazionali e rotazionali" delle molecole.

Il prof mostra dei grafici (vedi figura a pag 177) degli spettri (di fluorescenza?) della molecola di biossido di azoto.

Un primo grafico mostra lo spettro a temperatura ambiente, caratterizzato da un gran numero di picchi molto fitti.

Il secondo e il terzo grafico sono relativi ad una piccola porzione dello spettro della stessa molecola, la quale però è stata portata a basse temperature rotazionali, con la tecnica sopra descritta dell'espansione supersonica in fasci.

Per chiarire, è possibile definire 'temperature distinte' legate ai distinti gradi di libertà di un sistema. Ad esempio si parla di temperatura vibrazionale, o temperatura rotazionale.

Operativamente queste temperature si determinano studiando la popolazione dei livelli. Ad esempio, rileviamo (con un istogramma) la popolazione dei livelli rotazionali. Questo istogramma dovrebbe avere un andamento esponenziale, seguendo la legge di Boltzmann. Facendo un fit della distribuzione si può determinare la 'temperatura rotazionale'.

Avendo semplificato lo spettro lo si può studiare molto meglio.

Il prof fa un breve dettaglio dei modi vibrazionali di una molecola triatomica come l' NO_2 .

6) Studio di superfici

Mandando un fascio di atomi su una superficie, emergono tanti fasci riflessi. Studiando questi fasci riflessi si possono avere informazioni sulla superficie.

Il concetto è molto simile alla diffrazione con fasci di radiazione elettromagnetica (diffrazione ottica). Anzi, dal punto di vista storico i fasci atomici sono stati realizzati per la prima volta proprio per questo tipo di applicazione.

Il pioniere fu Stern (quello dell'esperienza di Stern e Gerlach, che non a caso fu fatta con un fascio di atomi di argento).

Quello che si osserva è un fenomeno simile alla diffrazione ottica, che obbedisce ad una legge simile alla legge di Bragg.

Il prof mostra un grafico (vedi figura a pag 176) relativo ad un fascio di elio che

incide su un cristallo di fluoruro di litio.

Nel grafico si vede un picco relativo al 'fascio parente', cioè il fascio della 'riflessione speculare', ma anche due fasci secondari, proprio come si ha nella diffrazione.

Osservazione (fatta oltre nella lezione, a 1h 22' 20")

Qui è utile considerare il dualismo onda-particella : le particelle sono descritte da un pacchetto d'onda, e nell'interazione col fascio la loro lunghezza d'onda è la lunghezza d'onda di De Broglie.

Ricordiamo che la lunghezza d'onda di de Broglie è pari al rapporto tra la costante di Plank e il momento cinetico della particella.

Allora, se realizziamo un fascio con velocità molto bassa, la lunghezza d'onda di de Broglie diventa enorme, e dunque l'interazione cambia molto. Quello che succede è che 'un atomo freddo' 'vede' molti atomi del reticolo, ossia una porzione del reticolo molto maggiore di quella che vede un 'atomo termico'.

Questo ha aperto nuove strade di indagine dei materiali.

7) studio di stati metastabili

Abbiamo già parlato degli stati metastabili. Essendo la vita media di questi stati abbastanza lunga, possiamo produrre un fascio per tutta la lunghezza del quale ($20 \div 30$ cm) gli atomi che lo compongono si trovano in un tale stato.

8) studio di molecole in stati non permessi in celle

Consideriamo ad esempio la molecola di sodio. Lo stato legato è uno stato di singoletto.

Questo significa che gli spin degli atomi devono essere antiparalleli.

Se prendiamo due atomi di sodio con gli spin paralleli si crea uno stato 'repulsivo' (unbounding o 'antilegante'), che sarebbe dunque uno 'stato' di tripletto, che però non si può chiamare stato perché la molecola non si forma.

Tuttavia in questo stato antilegante è presente un debolissimo 'avvallamento'.

Ma questo avvallamento è talmente poco profondo che se la molecola si viene a formare in tale stato, bastano le collisioni termiche per dissociarla.

Come abbiamo visto, in un fascio si riducono quasi a zero le collisioni termiche, e dunque un siffatto stato 'poco legato' può 'sopravvivere'.

9) Produzione di cluster

Cosa è un cluster?

Se consideriamo una certa quantità di gas di una certa molecola, c'è una distribuzione di 'molecole'.

Ad esempio, se prendiamo un fascio di sodio, lo ionizziamo, e lo analizziamo con uno spettrometro di massa, scopriamo che non ci sono ioni sodio, ma tutta una serie di

‘aggregati’.

Ad esempio, se abbiamo dei vapori di sodio, si è visto che su mille atomi di sodio, si trova una molecola di sodio biatomico; poi c'è il ‘sodio 3’, il ‘sodio 4’, etc. tuttavia questi aggregati non hanno tutti la stessa probabilità di formarsi. Esistono veri e propri ‘numeri magici’ per cui aggregati (macromolecole) di n atomi risultano particolarmente stabili.

Ad esempio c'è il *fullerene* (carbonio 60) che assomiglia ad un pallone da calcio. Se uno prende un fascio di atomi di carbonio e li va ad analizzare con uno spettrometro di massa, sicuramente in corrispondenza della massa di 60 atomi troverà un picco considerevole : questo aggregato è particolarmente stabile rispetto ad altri aggregati di carbonio.

Un cluster è una sorta di via di mezzo tra lo stato gassoso e lo stato solido. Possiamo dire che è un ‘piccolo reticolo’, del quale si sono osservate anche eccitazioni fononiche.

10) laser cooling : raffreddamento degli atomi mediante luce laser

Storicamente il laser cooling si è cominciato a fare ‘in fasci’. Attualmente si fa anche in celle, ottenendo le cosiddette ‘melasse’.

Qui si parla proprio di ‘raffreddare l’energia cinetica’.

Questa tecnica si riesce a realizzare per gli atomi, ma non ancora per le molecole.

- **Apparati per la produzione di fasci molecolari**

Il prof illustra il disegno

il nozzle

lo skimmer

viti micrometriche per il ‘tilting’ di nozzle e skimmer, per l’allineamento.

il chopper (per modulare il fascio, serve per la rivelazione in fase con amplificatore lock-in)

L’electron multiplier lo si può traslare, in vari punti del fascio, per studiarne la divergenza.

Si fa una ‘spazzata’ dalla periferia al centro all’altra periferia del fascio, per stimarne la larghezza e il ‘profilo’, e lo si ripete a varie distanze dal nozzle.

Invece, per stimare la velocità del fascio, si può usare un fascio impulsato (ad esempio si può usare un solenoide che apre l’ammissione del fascio) e stimando il tempo di volo si risale alla velocità.

Ovviamente si avrà una certa distribuzione in velocità, con gli atomi più veloci che arrivano prima, e quelli più lenti che seguono.

Dallo sparpagliamento degli arrivi si può ricostruire la distribuzione in velocità.

- studio quantitativo

(vedi pag 185 dei lucidi, lucido 11.8)

(lez 11, 1h 8' 39")

Fin qui abbiamo descritto qualitativamente i fasci di particelle.

Affrontiamo adesso il discorso un pò più quantitativamente.

(vedi lucido pag 185)

Due parametri molto importanti da prendere in considerazione sono

λ libero cammino medio
 d diametro del nozzle

Il libero cammino medio è la distanza che in media intercorre tra due collisioni successive, ed è inversamente proporzionale alla pressione.

I fasci di particelle si suddividono in due grandi categorie in base al rapporto tra questi due parametri.

Nel primo caso il libero cammino medio è molto maggiore del diametro del nozzle :

$$\frac{\lambda}{d} \gg 1.$$

In questo caso nel passaggio attraverso il nozzle sostanzialmente le particelle non subiscono urti tra loro.

In questo caso il fascio si chiama subsonico o effusivo.

In questo caso la distribuzione delle velocità delle particelle del fascio è essenzialmente uguale a quella che le particelle avevano 'nella sorgente' (nella camera iniziale da cui partono).

Dunque la distribuzione delle velocità del fascio è legata alla pressione della camera 'sorgente'.

Nel secondo caso il libero cammino medio (a causa della pressione elevata) è molto minore del diametro del nozzle :

$$\frac{\lambda}{d} \ll 1.$$

In questo caso nel passaggio attraverso il nozzle le particelle subiscono molti urti

reciproci.

A causa di queste collisioni la termodinamica delle particelle cambia completamente.

In questo secondo caso il fascio si chiama supersonico o idrodinamico.

Questa definizione di 'flusso idrodinamico' è dovuta al fatto che in questo caso le particelle del fascio non hanno più una dinamica regolata dalla teoria cinetica dei gas del caso precedente, ma si comporta più come un fluido.

Osserviamo che oltre al diametro del nozzle, ha un effetto anche la lunghezza del nozzle, cioè la lunghezza del 'canale' con diametro d che le particelle attraversano.

Si parla di fasci a canale lungo o fasci a canale corto. Comunque è un aspetto più 'sostanzioso' della questione, e noi non lo considereremo.

Il motivo delle definizioni 'subsonico' e 'supersonico' è che nel secondo caso (molte collisioni) le particelle escono dal nozzle ad una velocità maggiore di quella del suono.

La caratterizzazione del fascio si può fare o in termini di intensità, o in termini di densità

Affrontiamo adesso lo studio dei due tipi di fasci.

- fasci effusivi

(lez 11; 1h 14' 28")

Supponiamo che il gas di particelle si trova inizialmente nella 'camera sorgente' ad una pressione p_0 . Se questa pressione non è elevatissima possiamo usare l'approssimazione di gas perfetto, e scrivere :

$$p_0 = n_0 R T$$

dove n_0 è la densità di atomi (numero di moli fratto volume?).

Vogliamo esprimere il numero di particelle che hanno velocità compresa tra v e $v+dv$, e che escono da un 'foro sottile' (canale corto) di area dA , durante il tempo dt , e nell'angolo solido $d\Omega$ e dirette lungo una direzione che forma un angolo θ con la normale alla superficie del foro.

Questo numero è espresso da :

$$dN = n_0 f(v) \frac{d\Omega}{4\pi} v \cos\theta dA dt dv$$

La funzione $f(v)$ che compare è la distribuzione di Maxwell - Boltzmann, scritta in funzione della velocità (che tanto è proporzionale all'energia, che qui è 'solo

cinetica') :

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^2}{v_p^3} e^{-\frac{v^2}{v_p^2}} \quad (\text{vedi grafico di Mathematica})$$

dove

$$v_p = \sqrt{\frac{2 K T}{M}}$$

è la velocità più probabile.

Sostituendo questa espressione nell'espressione di dN si ha :

$$dN = n_0 \frac{d\Omega}{4\pi} \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^3}{v_p^2} e^{-\frac{v^2}{v_p^2}} \cos\theta \, dA \, dt \, dv$$

$$dN = n_0 \frac{d\Omega}{\pi^{3/2}} v_p x^3 e^{-x^2} \cos\theta \, dA \, dt \, dx$$

dove abbiamo posto

$$x \equiv \frac{v}{v_p}$$

Possiamo quindi definire la 'distribuzione di velocità del flusso' (legata al fatto che le particelle si muovono in una certa direzione) :

$$f_{\Omega}(x) = 2 x^3 e^{-x^2}.$$

Consideriamo non il numero di particelle, ma il flusso di particelle, cioè dividiamo per l'intervallo infinitesimo di tempo dt :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{n_0}{\pi^{3/2}} v_p f_{\Omega}(x) \, dA \, \cos\theta \, dx \, d\Omega$$

da cui possiamo anche definire una intensità (particelle che passano nell'unità di tempo per l'unità di superficie) in funzione dell'angolo θ e della 'velocità' x :

$$I(\theta, x) = \frac{n_0}{\Omega^{3/2}} v_p f_\Omega(x) dA \cos \theta dx$$

Abbiamo tre variabili : la superficie del foro dA , la 'velocità' x , e l'angolo θ .
Cominciamo ad integrare rispetto alla velocità, ottenendo l'intensità del fascio considerando tutte le particelle, 'con qualunque velocità' :

$$I(\theta) = \int I(\theta, x) dx = \Omega_0 \cos \theta dA \frac{d\Omega}{\Omega}$$

dove

$$\Omega_0 = \frac{n_0 \bar{v}}{4}$$

è una grandezza legata alla densità delle particelle 'nella camera sorgente', e dove la velocità media è legata alla velocità più probabile da :

$$\bar{v} = \frac{2 v_p}{\sqrt{\Omega}}$$

Questo è valido per una superficie infinitesima del foro dA .
Per un foro di superficie finita A si ha dunque :

$$I(\theta) = \Omega_0 A \frac{d\Omega}{\Omega} \cos \theta$$

che viene definita '**legge di emissione del coseno**'.

Questa legge ci dice che da in foro esce un fascio la cui intensità decresce con il coseno dell'angolo da cui andiamo ad osservarlo.

L'intensità totale, cioè il numero totale di particelle, lungo l'asse di propagazione del fascio (diciamo l'asse z), quindi per $\theta = 0$ è :

$$I(\theta = 0) = \frac{\Omega_0 A}{\Omega}$$

e, esplicitando Ω_0 :

$$I(0) = \frac{1}{2 \Omega^{3/2}} n_0 v_p A \left[\text{mol s}^{-1} \text{ ster}^{-1} \right].$$

Questo risultato è simile ad un 'risultato approssimato' che si poteva scrivere subito 'intuitivamente' :

nell'unità di tempo, le particelle che viaggiano con velocità v_p (velocità più probabile) percorrono un tratto pari proprio a v_p

dunque nell'unità di tempo dal foro di superficie A esce un volume di particelle (cilindro) pari a $A v_p$

la densità di particelle nella camera sorgente è n_0 , e supponiamo che sia anche la densità delle particelle nel fascio (almeno subito dopo l'uscita dal foro)

Allora l'intensità, cioè il numero di particelle che escono dal foro nell'unità di tempo, è :

$$I = n_0 A v_p.$$

Questo 'risultato intuitivo' è simile a quello più accurato ottenuto considerando la distribuzione di Maxwell Boltzmann.

Vediamo un esempio numerico, per avere un'idea degli ordini di grandezza.

Innanzitutto, per comodità, possiamo usare la seguente formula dell'intensità, scritta usando i parametri 'più comodi' del fascio :

$$I(\theta = 0) = 1.125 \cdot 10^{22} \cdot \frac{P_0}{\sqrt{M T}} A$$

dove :

p_0 è la pressione della sorgente, ed è misurata in torr

A è la superficie del foro, ed è misurata in cm^2

M è il peso molecolare delle particelle

T è la temperatura assoluta.

Con questa formula, se consideriamo un fascio di elio (peso molecolare 4) che esce da un foro di superficie $A = 1 \text{ mm}^2 = 10^{-2} \text{ cm}^2$ e alla pressione di 1 torr si ha un'intensità di

$$I(\theta = 0) = 3.2 \cdot 10^{18} \frac{\text{mol}}{\text{s ster}}.$$

Osserviamo che possiamo paragonare questa grandezza alla [brillanza](#) di un fascio ottico : il numero di particelle (energia) emessa nell'unità di tempo e nell'unità di

angolo solido (credo che il prof si sia sbagliato, e che il paragone corretto sia con l'intensità radiante, in quanto la brillantezza è anche 'per unità di superficie della sorgente').

Quanto più il fascio è collimato, tanto più è brillante.

Un'altro modo per caratterizzare un fascio, oltre all'intensità che abbiamo visto, è quello di studiarne la densità.

In genere le densità dei fasci sono abbastanza piccole, dell'ordine di $10^{13} \div 10^{14}$ particelle/cm².

In termini di pressioni equivalenti in una camera sono pressioni minori di 1 torr.

Proprio perché la densità è così piccola, possiamo trascurare le collisioni 'longitudinali', tra particelle con velocità diversa.

- collimazione

Abbiamo visto che da un foro esce un 'lobo' con la legge del coseno.

Per avere un fascio collimato, la cosa più semplice è mettere uno schermo con un secondo foro, ad una certa distanza dal primo foro.

Con delle regole simili a quelle dell'ottica geometrica si può capire come diverge il fascio.

- **velocità di pompaggio richiesta nei fasci effusivi**

(1h 29' ≈)

Abbiamo visto che il modo più semplice per realizzare un fascio effusivo è di realizzare due camere, separate da un foro, e a pressioni diverse.

In questa situazione, la seconda camera viene 'riempita' dalle particelle del fascio che si crea, e dunque per mantenere la differenza di pressione ci vuole una pompa che continuamente rimuova queste particelle.

Bisogna far sì che la portata della pompa sia uguale alla portata del fascio che entra nella camera.

L'intensità totale del fascio, è

$$I = \rho_0 A w$$

dove ρ_0 è il parametro che abbiamo definito prima, legato alla densità delle particelle nella sorgente e alla velocità media :

$$\square_0 = \frac{n_0 \bar{v}}{4},$$

mentre A è la superficie del foro, e w è un 'parametro correttivo', ed è la 'probabilità di trasmissione del foro', che è legata alla 'lunghezza del canale', cioè ad una sorta di 'probabilità di trasmissione' del foro (in genere vale circa 1).

Per una pompa ci sono due parametri da considerare. Il primo si chiama 'velocità di pompaggio' s , ed è il volume di fluido che riesce a spostare nell'unità di tempo. Il secondo parametro rilevante è la pressione p a cui lavora la pompa.

La portata della pompa Q , cioè la quantità di materia che è in grado di spostare nell'unità di tempo, è data dal prodotto della pressione per la velocità di pompaggio

$$Q = p s.$$

Affinché la 'seconda camera' sia a pressione costante, la portata della pompa deve uguagliare l'intensità del fascio.

- selettori di velocità

Il trucchetto dei due dischi ruotanti con i due forellini 'sfasati', non lo scrivo perché mi sembra fesso... vedi figure a pag 196 e 197

(lezione 12)

(per i primi 14' 30" il prof illustra i dettagli costruttivi di alcuni apparati per la produzione di fasci molecolari)

- **fasci supersonici**

(lez 12; 14' 30")

Se la pressione nella camera sorgente è molto elevata, il libero cammino medio delle particelle è piccola. Questo fa sì che quando le particelle escono nella 'seconda camera' si comportano 'come un fluido' (si parla di regime idrodinamico). La prima caratteristica importante di questo tipo di fascio è che la sua intensità è molto elevata.

L'espansione idrodinamica di un fascio supersonico è una cosa piuttosto complicata, ci sono delle considerazioni sull'entropia, sull'energia libera... per l'eccessiva complicatezza il prof tralascerà questo argomento.

Le cose rilevanti da capire sono :

L'intensità di questo tipo di fascio è elevata. A causa della grande pressione nella 'camera sorgente' le particelle che escono dal foro non sono semplicemente quelle che nella camera sorgente avevano la traiettoria rettilinea diretta verso il foro,

ma a causa di questa 'complicata espansione' si crea un vero e proprio fluido che riempie tutto il foro e esce dall'altra parte.

Un altro fatto rilevante è che le particelle diventano 'monocromatiche in energia cinetica'. A causa dei complicati fenomeni termodinamici le particelle più lente vengono accelerate e le particelle più veloci vengono frenate, fino a che la distribuzione delle velocità delle particelle diventa quasi monocromatica, cioè molto piccata attorno ad un certo valore.

Questo valore dipende dalle condizioni sperimentali, in particolare dalla pressione e dalle dimensioni del nozzle.

Ricapitolando i fasci supersonici sono :

- (abbastanza) monocromatici in velocità
- molto intensi.

Il 'prezzo da pagare' per questi vantaggi è il fatto che occorre una pompa di svuotamento molto potente (tanto per avere un'idea, la pressione della 'camera sorgente' è dell'ordine di 10 atm).

La velocità di questo 'fluido di particelle' è più alta della velocità con cui si propagherebbe il suono al suo interno.

A causa dei problemi che comportano quello che si fa è accontentarsi di avere dei fasci supersonici 'pulsati'.

In altre parole ci si accontenta di avere queste caratteristiche solo per brevi impulsi.

Il nozzle si apre per un centinaio di microsecondi, con una certa frequenza.

Questo permette di utilizzare pompe di potenza più basse.

Il prof racconta di una pompa per un fascio supersonico in continua, che era grande come una stanza.

- Tecniche per il vuoto

(lez. 12; 21' 35")

Cominciamo con una classificazione dei 'livelli di vuoto'.

La pressione atmosferica è pari a 1 atm, cioè a 760 torr.

Il primo intervallo, dalla pressione atmosferica a 1 millitorr, viene definito vuoto primario, raw vacuum (sono circa tre ordini di grandezza).

1 atm ÷ 10^{-3} torr rough vacuum

10^{-3} ÷ 10^{-6} torr high vacuum

10^{-6} ÷ 10^{-9} torr very high vacuum

10^{-9} ÷ 10^{-12} torr ultra high vacuum

Il prof mostra dei raccordi per i vari vuoti.

Raccordi con o-ring

Quando si scende al di sotto di un certo vuoto : problemi con le impurità adsorbite nel materiale delle pareti interne (sublimazione, degassamento). Le superfici interne

si fa arrivare la temperatura a 300 - 400 gradi, per qualche settimana.

Le superfici interne sono abbastanza estese (pensare anche ai condotti vari) e dunque sono delle 'sorgenti' rilevanti.

Se si deve riscaldare la gomma non va bene, e dunque si usano delle 'guarnizioni metalliche' (metallo 'morbido' : rame).

All'incirca questi 'accorgimenti più accurati' si devono mettere in atto per vuoti da 10^{-6} in poi

(30' 37")

Per avere un'idea della relazione tra pressione e densità di particelle, si ha : 1 torr - $> 10^{17}$ particelle/cm³.

Per esperimenti sul condensato di Bose Einstein sono richiesti vuoti dell'ordine di 10^{-11} ÷ 10^{-12} particelle, perché la fonte più importante di 'distruzione del condensato' è 'il gas di fondo', che ha un'energia cinetica 'termica' molto più elevata del condensato.

Un altro campo in cui è molto importante il vuoto è lo studio di superfici, o la 'costruzione' per crescita epitassiale di superfici.

Divagazione : nello spazio, anche per una particella in orbita attorno alla terra, c'è un vuoto molto alto, di circa 1 particella per cm³ (ma il prof 'va a braccio').

- **libero cammino medio**

(38' 00")

Ricaviamo il libero cammino medio per particelle in una camera (teoria cinetica dei gas).

(pag 204 lucidi)

Per definizione il libero cammino medio è legato al 'rate di collisioni' delle particelle messe in un certo ambiente.

Sia λ il 'raggio di interazione'.

(quello che segue sul raggio di interazione non lo ha detto il prof a lezione)

Il raggio di interazione è una cosa non definita precisamente. Grosso modo è la distanza massima alla quale si sentono gli effetti di un certo tipo di interazione. Per esempio a rigore il raggio di interazione elettromagnetica sarebbe infinito, ma se ne può definire uno 'operativo'.

Riguardo al nostro caso, poiché l'interazione è per urto, il raggio di interazione, cioè la distanza massima tra le due posizioni di due particelle che interagiscono per urto (posizione riferita al centro della particella) è pari a due raggi.

Se r è il raggio di interazione della particella, la particella urta se c'è un'altra particella in un cilindro di sezione $2r$, cioè di sezione $4r^2$.

Questa superficie si definisce 'sezione d'urto'.

Il rate di collisioni (numero di collisioni per unità di tempo) è dunque dato dal prodotto della densità di particelle per il volume che una particella 'spazza' nell'unità di tempo :

$$z = 4r^2 \bar{v} n \sqrt{2}$$

dove n è la densità di particelle, e il fattore $\sqrt{2}$ tiene conto della velocità relativa delle particelle.

Ricordiamo che la velocità media dipende dalla temperatura (teoria cinetica, termodinamica).

L'intervallo di tempo tra due collisioni è l'inverso di questa grandezza :

$$\tau_c = \frac{1}{z}$$

Allora, in definitiva, il libero cammino medio, cioè lo spazio percorso in media tra un urto e l'altro, è dato da questo tempo caratteristico moltiplicato per la velocità media :

$$\lambda = \tau_c \bar{v}$$

$$\lambda = \bar{v} \frac{1}{z}$$

$$\lambda = \frac{\bar{v}}{4r^2 \bar{v} n \sqrt{2}}$$

$$\lambda = \frac{1}{4r^2 n \sqrt{2}} \quad (\text{libero cammino medio}).$$

La sezione d'urto in realtà non è così semplice da ricavare come abbiamo fatto noi, semplicemente prendendo il raggio delle particelle.

In realtà questa dipende dal tipo di potenziale con cui 'si vedono' le particelle, come le forze di van De Waals.

Valori tipici del libero cammino medio, ad una pressione di 10^{-3} torr e ad una temperatura di 15°C sono :

partic.	λ (cm)
H ₂	8.97
He	14.1
N ₂	4.77
O ₂	5.15
H ₂ O	3.18

Inoltre è utile la seguente formula per calcolare il libero cammino medio espresso in centimetri per le particelle di aria (ossigeno e azoto) ad una temperatura di 20°C , in cui tutti i parametri sono stati calcolati e espressi in un unico valore numerico e bisogna solo inserire la pressione (espressa in millitorr) :

$$\lambda_{\text{aria}} = \frac{5}{p \text{ (mTorr)}} \text{ cm.}$$

Avendo a disposizione il libero cammino medio, possiamo subito capire se il regime di un fascio di particelle è un regime viscoso o un regime molecolare, paragonando il libero cammino medio con la sezione del foro per cui passano le molecole.

- **pompe da vuoto**

1) Il parametro più importante di una pompa è la velocità di pompaggio, cioè il volume spostato nell'unità di tempo :

$$S = \frac{dV}{dt}$$

Un'altra cosa di cui tenere conto è la presenza dei condotti di raccordo.

Spesso la pompa si trova ad un'altezza più bassa rispetto alla camera da cui sta aspirando.

Questo significa che all'ingresso della pompa e all'uscita dalla camera ci sono due pressioni diverse.

2) Altro parametro importante è la portata (massa spostata nell'unità di tempo), che è data dal prodotto della velocità di pompaggio per la pressione :

$$Q = p S.$$

La portata del flusso di gas deve essere uguale all'entrata e all'uscita del condotto (conservazione della materia (conservazione della massa)).

Allora se cambia la pressione vuol dire che cambia anche la 'velocità di pompaggio' prima e dopo il condotto.

3) Infine si può definire la impedenza idraulica (inverso della conduttanza idraulica) di un condotto (in analogia con l'impedenza elettrica) il rapporto tra la differenza di pressione e la portata :

$$Z = \frac{1}{C} = \frac{p_c - p_p}{Q}$$

(aggiunta mia : si può dire che l'impedenza idraulica è la costante di proporzionalità tra la caduta di pressione e la portata, in analogia con l'impedenza elettrica che è la costante di proporzionalità tra la caduta di potenziale e la corrente)

da cui l'espressione della portata è

$$Q = (p_c - p_p) C$$

(notare l'ordine delle pressioni : la pressione all'uscita della camera meno la pressione all'ingresso della pompa).

L'impedenza è da valutare quando si realizza un condotto.

Se usiamo condotti di sezione diversa, le loro impedenze si sommano con le stesse regole delle impedenze elettriche : per i condotti in serie si sommano le impedenze e per i condotti in parallelo si sommano le conduttanze (vedi figure a pag 208).

dunque se si mettono dei condotti in serie dominerà l'impedenza più elevata, mentre se si mettono dei condotti in parallelo dominerà la conduttanza più elevata.

Un intero sistema da vuoto può essere schematizzato con un circuito equivalente, fatto con un solo condotto equivalente, di fissata conduttanza.

Quello che ci interessa è come dipende l'effettiva velocità di pompaggio che c'è all'uscita della camera, dalla velocità di pompaggio della pompa.

Poiché

$$Q = (p_c \square p_p) C$$

$$Q = p_c C \square p_p C$$

$$Q = \frac{Q}{S_c} C \square \frac{Q}{S_p} C$$

$$1 = \frac{1}{S_c} C \square \frac{1}{S_p} C$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{S_c} \square \frac{1}{S_p}$$

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

Occorre dunque (come è ovvio) che la conduttanza sia elevata affinché l'effettiva velocità di pompaggio che si ha all'uscita della camera sia il più possibile uguale (ma sempre minore) della velocità di pompaggio della pompa.

Se la conduttanza è bassa si dice che 'si strozza la pompa', cioè non si sfrutta a pieno la sua velocità di pompaggio.

Tuttavia non si può eccedere nel diametro dei condotti, perché questo aumenta i volumi da dover tenere 'a vuoto'.

- stima della conduttanza

Ci sono delle formule (empiriche?) per definire la conduttanza di un condotto.

La conduttanza di un condotto cilindrico di diametro D e lunghezza L è data da :

$$C = \frac{\square}{128} \frac{D^4}{\square L} P_{\text{media}}$$

Dunque la conduttanza va con la quarta potenza del diametro.

Attenzione che questa formula vale solo se il tipo di vuoto è 'basso', e dunque le particelle sono in 'regime viscoso'.

Se il vuoto è più spinto, e siamo dunque in 'regime molecolare', bisogna usare quest'altra formula :

$$C = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2 \pi K T}{M}} \frac{D^3}{L}$$

dove quindi la dipendenza dal diametro è cubica.

Concludendo, le conduttanze dipendono ‘fortemente’ (non linearmente) dal diametro.

Facciamo degli esempi numerici.

Consideriamo un condotto cilindrico di diametro $D = 2.5$ cm e lunghezza $L = 10$ cm (dunque di conduttanza $C \approx 19$ l/s) che collega una pompa con velocità di pompaggio $S_p = 100$ l/s.

Essendo

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

la velocità di pompaggio che si ha alla camera è :

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{100} + \frac{1}{19}$$

$$S_c = 16 \text{ l/s.}$$

Dunque, siamo in pieno in una situazione di strangolamento della pompa : la sua velocità di pompaggio è 100 l/s, ma alla camera arriva solo una velocità di pompaggio di 16 l/s.

Un altro aspetto da considerare è la ‘caduta di pressione’.

Infatti, poiché per la conservazione della massa la portata deve essere uguale ai capi del condotto, si ha :

$$S_c p_c = S_p p_p$$

$$\frac{p_c}{p_p} = \frac{S_p}{S_c} = 6.25$$

e dunque la pressione alla camera è 6 volte più grande della pressione alla pompa.

Allora, se per farci un’idea della situazione misurassimo la pressione, dobbiamo tenere presente di questo ‘gradiente’ per non prendere cantonate!

Rischiamo di introdurre un errore sistematico.

- tempo di pompaggio

Un altro parametro importante è il tempo di pompaggio. Questo ovviamente dipende dalla velocità di pompaggio S , dal volume della camera V , e dalla differenza di pressione che si vuole realizzare :

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \log \frac{P_{in}}{P_{out}}.$$

- **tipi di pompe**

Esistono pompe diverse per ottenere i diversi tipi di vuoto che abbiamo visto prima.

pompe meccaniche
pompe a diffusione
pompe turbomolecolari

pompe ioniche
criopompe

I primi tre tipi sono molto diffusi, gli ultimi due sono più 'esotici'.

* pompe meccaniche

Il primo tipo di pompa meccanica è una 'banale' pompa a cilindro, con due valvole.

I limiti di questo tipo di pompe sono :

1) la pressione a cui il pistone deve portare il gas 'per portarlo fuori' deve essere maggiore della pressione atmosferica, e quindi, man mano che la pressione della camera diminuisce [...].

Per ovviare a questo problema si possono ridurre le dimensioni del cilindro, ma anche questo ha dei limiti.

2) la pressione minima è quella a cui l'olio, che si usa per lubrificare il pistone, evapora.

Tutti i sistemi meccanici hanno bisogno di olio per essere lubrificati, e dunque la pressione di evaporazione di questo olio è un limite minimo di queste pompe meccaniche.

Il limite minimo di pressione di queste pompe è qualche millitorr.

Concludiamo dicendo che in genere le pompe meccaniche non sono 'a pistoni', ma hanno 'sistemi rotanti'.

Un sistema rotante è fatto con un cilindro eccentrico, con un setto lungo il diametro, tenuto a pressione con una molla. (vedi figura a pag 212).

Le pompe meccaniche sono usate per il 'vuoto primario', sia come scopo finale, sia come stadio intermedio per ottenere un vuoto più spinto con un'altra pompa. Le pompe per vuoti spinti in genere non possono partire dalla pressione atmosferica.

* pompe a diffusione

Sono pompe che possono creare vuoti da 10^{-3} a 10^{-6} torr.

Grosso modo si tratta di un cilindro.

Sul fondo c'è una resistenza, e dell'olio. La resistenza fa evaporare l'olio, e una sorta di 'camino' (pensa alla macchinetta per il caffè).

L'olio vaporizzato viene spinto verso il basso dalla forma dell'ugello (sombbrero), e andando verso il basso porta con se le particelle di gas dalla camera.

C'è poi bisogno di un sistema per recuperare l'olio. In genere questo sistema di drenaggio è basato su un circuito di raffreddamento che fa ricadere l'olio.

Gli aspetti positivi di questo tipo di pompe sono legati al fatto che non ci sono parti meccaniche in movimento.

Gli aspetti negativi sono legati alla presenza di questo olio vaporizzato, che può entrare nella camera e 'sporcare' l'esperimento.

Un accorgimento per rendere un pò più pulite le pompe a diffusione è quello di interporre tra la pompa e la camera una 'trappola ad azoto liquido', cioè un cilindro attorno a cui c'è una camicia in cui si mette dell'azoto liquido. Eventuali olii che risalgono verso la camera vengono 'giacciati' sulle pareti.

Queste pompe, che sono per vuoti 'più alti' possono venir usate in combinazione con pompe meccaniche (rotative) che sono usate per 'drenare' il gas aspirato, dal fondo della pompa a diffusione.

* pompe turbomolecolari

sono basate su di una turbina, con le palette opportunamente sagomate. Le velocità di rotazione sono dell'ordine di $20'000 \div 50'000$ giri/min.

Le palette girando imprimono alle particelle una spinta, e le velocità delle particelle sono paragonabili alle velocità di rotazione delle palette.

Il principio di funzionamento è simile a quello delle pompe a diffusione : spingere via le particelle di gas dalla camera.

Il grande vantaggio di questo tipo di pompe è però quello di eliminare i problemi legati all'olio.

In effetti un pò di olio ci vuole, per lubrificare (si tratta pur sempre di una pompa 'meccanica', cioè con parti meccaniche in movimento).

Tuttavia i tipi più recenti di pompe turbomolecolari sono completamente esenti da olio, in quanto la turbina è sospesa in levitazione magnetica, e dunque priva di attrito meccanico!

* pompe a zeoliti

Gli zeoliti sono delle pietruzze che hanno un'elevatissima porosità, e dunque una superficie molto estesa.

Allora possono adsorbire molte molecole, e ridurre la pressione.

Le superfici che raggiungono sono $10^3 \text{ m}^2/\text{g}$: un grammo di zeoliti ha una superficie di 10^3 m^2 .

L'uso di questi zeoliti è più come filtro che come pompa vera e propria.

Il difetto è che 'si saturano', e dopo un certo numero di ore di uso si devono 'rigenerare', portandoli ad alta temperatura per un certo periodo, per fare rimettere i materiali adsorbiti.

* criopompe e pompe ioniche

Sono pompe più sofisticate, per realizzare vuoti da 10^{-9} a 10^{-12} torr.

Le criopompe sono essenzialmente delle macchine frigorifere, che ottengono il vuoto facendo condensare su di una superficie le molecole di gas.

Le pompe ioniche invece hanno degli elettrodi che provocano una scarica. La scarica ionizza le particelle di gas. C'è poi un campo elettrico che spinge via le particelle ionizzate.

Le criopompe hanno il difetto di introdurre delle vibrazioni per il ciclo di compressione del