

## Chimica Analitica e Ambiente

Corso di Laurea Magistrale in Chimica  
Corso di Laurea Magistrale in Chimica Industriale  
Università degli Studi di Padova

# Strumenti per la misura del particolato atmosferico in tempo reale

a cura di Dr. Chiara Giorio



UNIVERSITY OF  
CAMBRIDGE



**Andrea Tapparo**

Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Scienze Chimiche

Via Marzolo 1, 35131 Padova; [andrea.tapparo@unipd.it](mailto:andrea.tapparo@unipd.it)



Anno accademico 2023-24

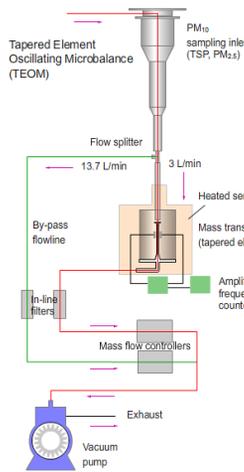
1

## La dimensione delle particelle

- $d_a$  “**diametro aerodinamico**”: diametro di una particella sferica di densità unitaria che cade alla stessa velocità della particella considerata
- $d_{va}$  “**diametro aerodinamico nel vuoto**”: diametro di una particella sferica di densità unitaria che cade, nel vuoto, alla stessa velocità della particella considerata
- $d_m$  “**diametro di mobilità**”: diametro di una particella sferica che ha la stessa velocità di migrazione in un campo elettrico costante della particella considerata
- $d_{ve}$  “**diametro volumetrico equivalente**”: diametro di una particella sferica che ha lo stesso volume (spazi vuoti interni compresi) della particella considerata
- $d_o$  “**diametro ottico**”: diametro di una particella sferica con lo stesso indice di rifrazione della particella considerata (che diffonde la stessa quantità di luce nell'angolo solido misurato da un OPC)

2

## Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)



Il particolato campionato viene depositato su di un filtro montato su di una estremità di un tubo di vetro oscillante. Il tubo di vetro è fissato alla base, mentre la punta è libera (filtro) di vibrare alla sua frequenza di vibrazione naturale.

Il particolato che si deposita sul filtro fa variare la frequenza di oscillazione, che viene misurata tramite un circuito elettrico.

I cambi di frequenza di oscillazione, dovuti all'incremento della massa di particolato depositato sul filtro, vengono convertiti in concentrazione in massa.

Il flusso di aspirazione e la temperatura sono rigorosamente controllati (termostatazione a 50°C).

Vantaggi:

- Concentrazione in massa del PM in tempo reale
- Diversi selettori dimensionali

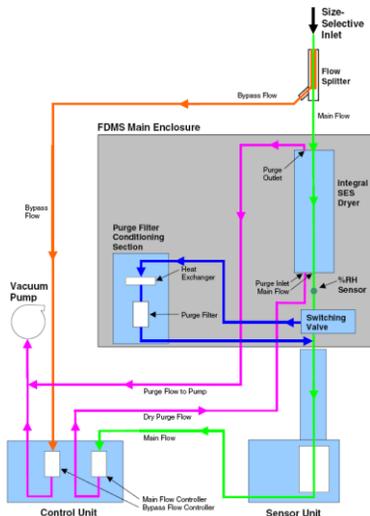
Svantaggi:

- Perdita di composti semi-volatili
- Il dato di concentrazione deve essere corretto (equivalente gravimetrico)



3

## Filter Dynamics Measurement System (FDMS)



Funziona con lo stesso principio del TEOM

Termostato a 30°C

Il flusso di campionamento passa attraverso un essiccatore per eliminare l'umidità

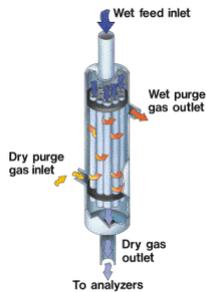
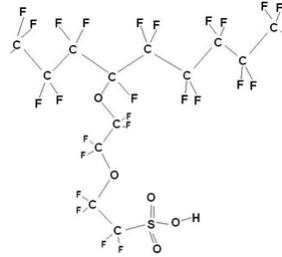
2 cicli di 6 minuti ciascuno:

- Campionamento
- Passaggio di aria filtrata

La perdita di massa di PM durante il secondo ciclo viene aggiunta al dato di concentrazione per tenere conto della perdita di composti volatili.

4

## Essiccatori al Nafion



Il Nafion è un polimero simile al Teflon ma contenente dei gruppi solfonici.

I gruppi solfonici hanno un'elevata affinità per l'acqua, che permea attraverso la membrana di Nafion e viene eliminata da un flusso d'aria (o altro gas) secca in contro corrente.

La permeabilità attraverso la membrana dipende dall'affinità delle sostanze verso i gruppi solfonici del Nafion (es. sostanze basiche).

5

## Applicazione TEOM/FDMS

- Determinazione in tempo reale della concentrazione in massa di particolato PTS, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> (in alcune versioni anche 2 in contemporanea)
- Campionamenti ambientali nelle centraline della rete di monitoraggio della qualità dell'aria
- Misure di igiene industriale
- Valutazione delle emissioni di particolato da attività industriale

Range di concentrazione: 0-5 g/m<sup>3</sup>

Intervallo di misura: 12 minuti

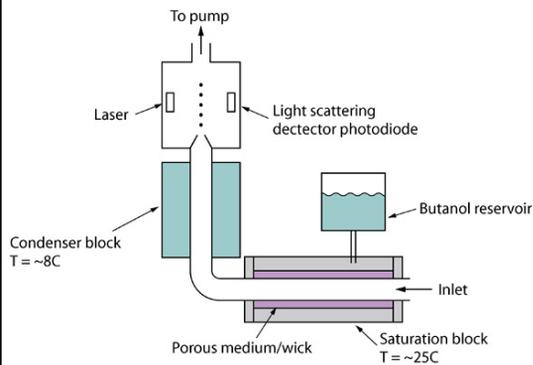
Limite di rivelabilità (1 h): 0.06 µg/m<sup>3</sup> (10 ng di campione)

Precisione (1 h): 2.5 µg/m<sup>3</sup>

Range di temperatura: aria campionata (-30°C -> 50°C), intero sistema (8°C -> 25°C)

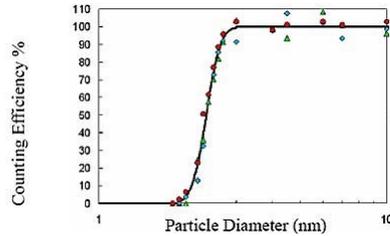
6

## Condensation Particle Counter (CPC)



Coincidence Levels	
Concentration (particles/cm <sup>3</sup> )	Calculated Coincidence (%)
10	>.01
100	.07
1000	.67
5000	3.5
10000	7.4

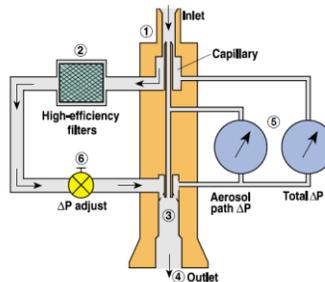
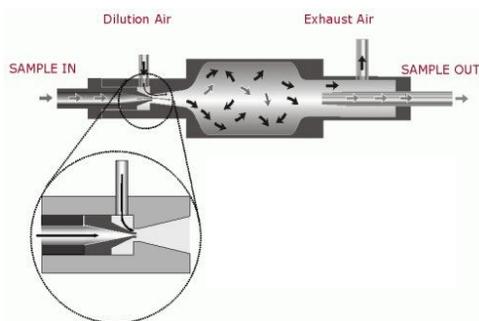
### Efficiencia di campionamento:



- Determinazione del numero di particelle
- Conteggio particelle singolarmente
- Diametro minimo 3 nm
- Massima concentrazione 10 000 particelle/cm<sup>3</sup>
- Può essere utilizzato a concentrazioni maggiori tramite l'utilizzo di un diluente
- Utilizzato anche come rivelatore per altre strumentazioni

7

## Diluitore

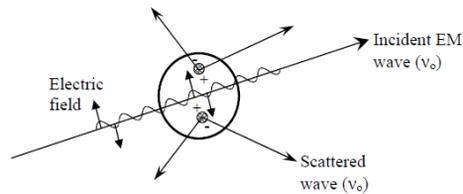


Il diluitore si applica in tutti i casi in cui la concentrazione di particolato nell'aria da campionare supera il range di misura dello strumento

8

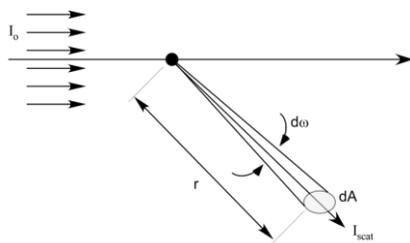
## Light Scattering

Quando una particella viene colpita da un fascio di luce incidente, gli orbitali delle molecole presenti vengono perturbati inducendo un moto oscillatorio della nuvola elettronica e la generazione di un momento di dipolo. Il momento di dipolo indotto è responsabile della ri-emissione di energia in tutte le direzioni (scattering o diffusione) alla stessa lunghezza d'onda della radiazione incidente (scattering elastico).



9

## Light Scattering



L'intensità della radiazione diffusa è proporzionale all'intensità della radiazione incidente ( $I_0$ )

$$I = \frac{\sigma_{scat}}{r^2} \cdot I_0$$

Dove  $\sigma_{scat}$  è la sezione d'urto (in  $m^2$ ) di scattering della singola particella, e  $r$  è la distanza tra il detector e la particella

L'efficienza di scattering di una particella può essere definita come:

$$Q_{scat} = \frac{\sigma_{scat}}{\sigma_{geom}} = \frac{\sigma_{scat}}{\pi a^2}$$

il rapporto tra la sezione d'urto di scattering e la sezione d'urto geometrica della particella

10

## Light Scattering

- I parametri principali che governano lo scattering e l'assorbimento della luce da parte di una particella sono:
  - La  $\lambda$  della radiazione incidente
  - Il diametro della particella ( $D_p$ )
  - Le sue proprietà ottiche (indice di rifrazione  $m$ , normalizzato per l'indice di rifrazione del mezzo)
- Solitamente i primi 2 parametri vengono espressi come grandezza adimensionale  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda}$$

11

## Light Scattering

A seconda del valore di  $\alpha$ , il fenomeno dello scattering può essere suddiviso in 3 domini:

- $\alpha \ll 1$  Rayleigh scattering
- $\alpha \approx 1$  Mie scattering
- $\alpha \gg 1$  scattering geometrico

12

## Teoria di Mie

- Vale per qualsiasi valore di  $\alpha$ , per particelle sferiche (anche quando il diametro della particella è simile alla  $\lambda$  della radiazione incidente)
- Teoria rigorosa e complessa che converge nell'ottica geometrica per particelle grandi ( $\alpha \gg 1$ ) e nella teoria di Rayleigh per particelle piccole ( $\alpha \ll 1$ ).

$$Q_{scat}(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \left[ |a_k|^2 + |b_k|^2 \right]$$

$$a_k = \frac{\alpha \Psi'_k(y) \Psi_k(\alpha) - y \Psi'_k(\alpha) \Psi_k(y)}{\alpha \Psi'_k(y) \xi_k(\alpha) - y \xi'_k(\alpha) \Psi_k(y)}$$

$$b_k = \frac{y \Psi'_k(y) \Psi_k(\alpha) - \alpha \Psi'_k(\alpha) \Psi_k(y)}{y \Psi'_k(y) \xi_k(\alpha) - \alpha \xi'_k(\alpha) \Psi_k(y)}$$



$\Psi$  e  $\xi$  sono funzioni di Riccati-Bessel

13

## Il regime di scattering di Rayleigh

- Quando una particella ha un diametro molto minore rispetto alla  $\lambda$  della radiazione incidente
- nel caso di radiazioni nel visibile, una particella di  $0.1 \mu\text{m}$  ricade nel regime di Rayleigh
- In questo regime, l'intensità della luce scatterata è simmetrica in avanti e all'indietro rispetto al fascio incidente ed è indipendente dalla forma della particella

14

## Il regime di scattering di Rayleigh

- L'efficienza di scattering può essere approssimata:

$$Q_{scat}(m, \alpha) = \frac{8}{3} \alpha^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

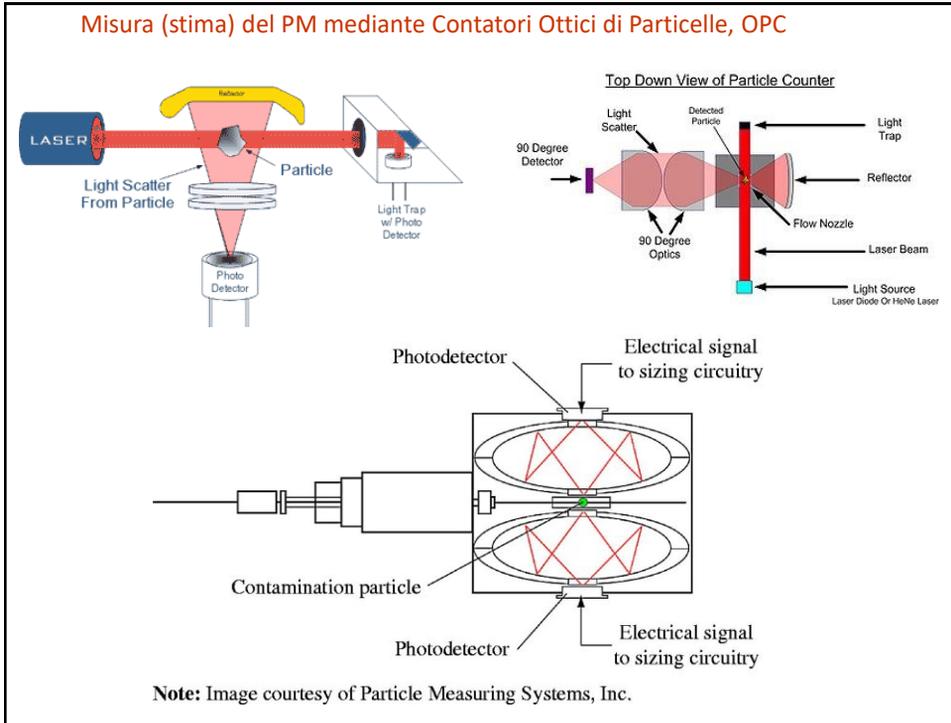
- di conseguenza l'intensità della luce scatterata è proporzionale a  $\lambda^{-4}$
- all'aumentare della  $\lambda$  della radiazione incidente, l'intensità della luce scatterata decade con la quarta potenza della  $\lambda$

15

## Regime geometrico

- quando le particelle hanno un diametro molto maggiore rispetto alla  $\lambda$  della radiazione incidente
- lo scattering può essere calcolato sulla base dell'ottica geometrica di riflessione, rifrazione e diffrazione
- Lo scattering è fortemente dipendente dalla forma e dall'orientazione della particella

16



17

## Optical Particle Counter (OPC)

- Funziona sul principio del light scattering
- Classifica le particelle in funzione del loro diametro ottico
- Range di misura: 0.12-40  $\mu\text{m}$
- Range di concentrazione: fino a 2 000 000 particelle/L ( $\sim 0.1 \text{ g/m}^3$ )
- Range di temperatura: 0-40°C
- Laser o lampada alogena
- Angolo di scattering a 90°
- Il photodetector effettua un conteggio dei segnali (concentrazione in numero di particelle) e dalla misura dell'intensità del segnale classifica le particelle per dimensione

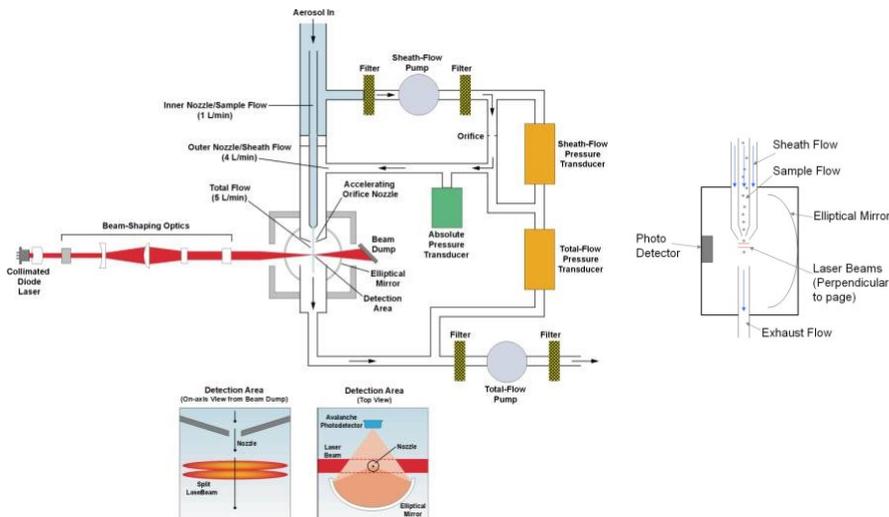
18

## Aerodynamic Particle Sizer

- È uno spettrometro a tempo di volo che determina la concentrazione in numero di particelle
- Classifica le particelle in funzione del loro diametro aerodinamico
- Range di misura: 0.2-20  $\mu\text{m}$  in 52 classi dimensionali
- Il particolato viene introdotto attraverso un ugello conico in flusso accelerato
- Il fascio di particelle viene focalizzato attraverso un sistema composto da 2 lenti aerodinamiche

19

## Aerodynamic Particle Sizer



20

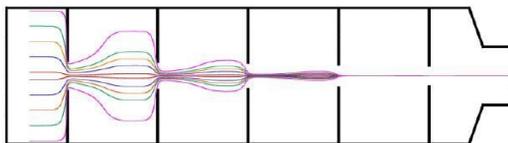
## Aerodynamic Particle Sizer

- Le particelle accelerate dal flusso d'aria in aspirazione, viaggiano all'interno della camera di misura ad una velocità che dipende dal loro diametro aerodinamico (particelle più grosse possiedono un'inerzia maggiore e viaggiano più lentamente)
- Nella camera di misura, le particelle incontrano 2 laser ad onda continua separati da una certa distanza.
- I laser, grazie ad un photodetector sono in grado di rivelare il passaggio della particella, effettuando così una misura in conteggio, e determinano il tempo di volo della particella tra i due laser
- Tramite opportuna calibrazione, il tempo di volo della particella può essere messo in relazione con il suo diametro aerodinamico
- I casi di coincidenza di 2 o più particelle sono molto più rari rispetto a CPC e OPC

21

## Lenti Aerodinamiche

- Sono costituite da una serie di dischi circolari (separati da una distanza di qualche cm) che presentano un foro centrale. Il diametro dei fori varia da  $D_0$  (diametro dell'inlet) a  $D_1$  (diametro dell'outlet),  $\sim 2-4$  mm

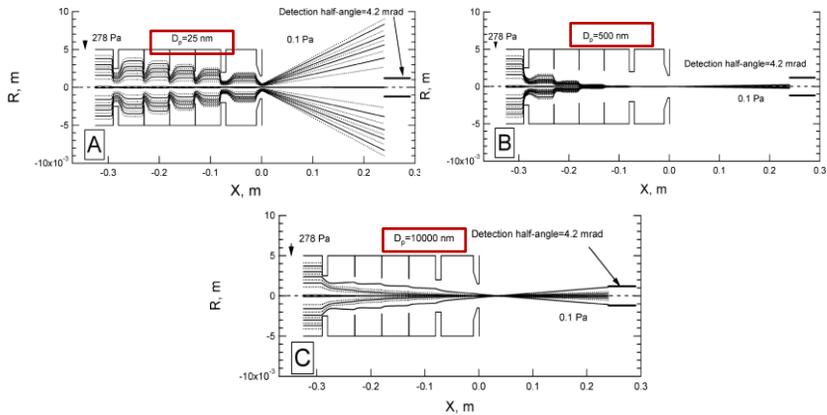


- Le particelle e il gas di trasporto subiscono delle espansioni e rifocalizzazioni in serie. I gas divergono di più e vengono allontanati, le particelle divergono di meno e vengono via via focalizzate
- L'ultima lente, genera un'espansione supersonica del gas che produce un'accelerazione delle particelle
- Le particelle acquisiscono una distribuzione di velocità dipendente dal loro diametro aerodinamico. Particelle più piccole vengono accelerate di più mentre le particelle più grandi, a causa della maggiore inerzia, acquisiscono una velocità minore.

22

## Lenti Aerodinamiche

- L'efficienza della focalizzazione dipende dal diametro aerodinamico delle particelle



23

## Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)



- Misura particelle con diametro compreso fra 3 e 800 nm
- Determina la concentrazione in numero di particelle
- Separa le particelle in base alla loro mobilità all'interno di un campo elettrico



24

## Caricamento particelle

Le particelle vengono caricate per collisione con un gas ionizzato. A seconda che il gas presenti ioni unipolari o bipolari si parla di:

- Caricamento unipolare
- Caricamento bipolare

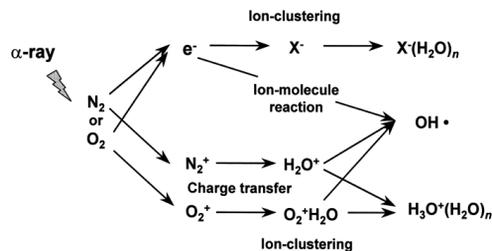
Il caricatore deve avere le seguenti caratteristiche:

- Concentrazione degli ioni alta e stabile
- Non danneggiare l'aerosol
- Bassa perdita di particelle
- Evitare contaminazioni
- Essere applicabile alle nanoparticelle
- Capacità di lavorare a basse pressioni e con gas differenti

25

## Caricatori/neutralizzatori bipolari

Emettitori  $\alpha$  o  $\beta$  (es.  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{210}\text{Po}$ )



Quando il particolato attraversa un gas ionizzato, per effetto del moto browniano possono avvenire delle collisioni tra ioni (gas) e le particelle, accompagnate dal trasferimento di una carica elementare dalla molecola del gas alla particella. Viene raggiunta una situazione di equilibrio. Efficienza di carica  $\sim 4\%$  per gli ioni mono-positivi e  $\sim 7\%$  per gli ioni mono-negativi.

26

## Caricatori/neutralizzatori bipolari Diffusion Charging Theory

Le collisioni tra le molecole del gas e le particelle possono avvenire in 3 regimi, che dipendono dal numero di Knudsen  $Kn=\lambda/a$ , con  $a$ =raggio particella e  $\lambda$ =cammino libero medio degli ioni.

- $Kn \ll 1$ , regime diffusivo (equazione macroscopica della diffusione);
- $Kn \gg 1$ , regime cinetico (teoria cinetica dei gas);
- $Kn \approx 1$ , regime di transizione.

$$\frac{dN_{p,0}}{dt} = -\beta N_{p,0} N_i$$

$$\frac{dN_{p,1}}{dt} = \beta_0 N_{p,0} N_i - \beta_1 N_{p,1} N_i$$

$$\frac{dN_{p,n}}{dt} = \beta_{n-1} N_{p,n-1} N_i - \beta_n N_{p,n} N_i$$



**Teoria di Fuchs**

27

## Teoria di Fuchs o “Limiting-sphere theory”

- La “limiting-sphere” è una sfera, che include la particella, che ha raggio  $\delta \approx a + \lambda$ , con  $a$  = raggio della particella e  $\lambda$  = cammino libero medio degli ioni.
- All’interno della sfera, la particella si comporta come una molecola libera nel vuoto.
- All’esterno della sfera, il moto browniano degli ioni può essere descritto dalla teoria macroscopica della diffusione nel mezzo.
- Sulla superficie della sfera, la probabilità di collisione calcolata attraverso la teoria cinetica dei gas e la teoria macroscopica della diffusione si equivalgono.

28

## Unipolar charging

- Scarica corona
- Sorgenti radioattive (emettitori  $\alpha$  o  $\beta$ )
- Effetto fotoelettrico (raggi UV) o fotoionizzazione (raggi X)

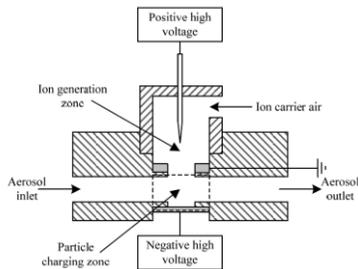
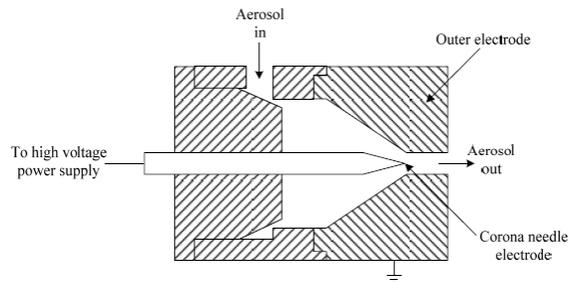
In questo caso non si raggiunge una condizione di equilibrio.  
L'efficienza di carica dipende dalla dimensione delle particelle, dalla concentrazione degli ioni e dal tempo di residenza delle particelle all'interno del caricatore.

Le particelle ambientali presentano già delle cariche, per questo motivo, alcuni strumenti fanno precedere uno step di neutralizzazione a quello di caricamento.

29

## Scarica Corona

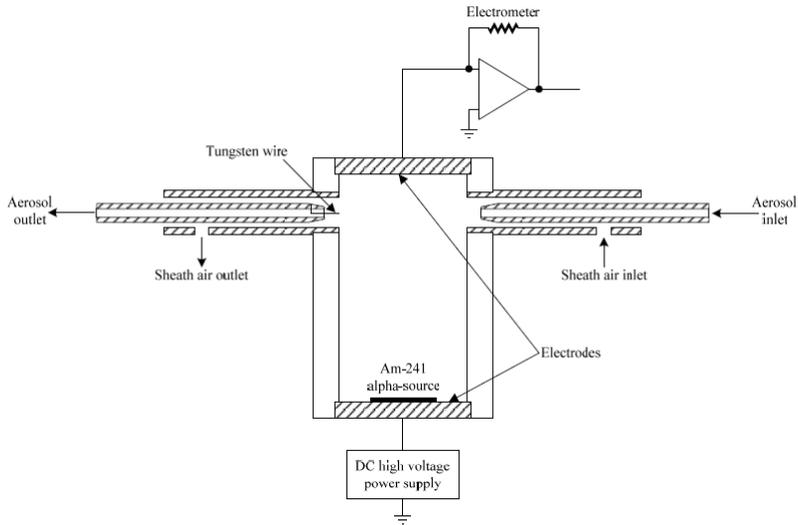
Caricatore a scarica a corona (Alonso et al. 2006)



Caricatore indiretto a scarica a corona (Choi and Kim 2007)

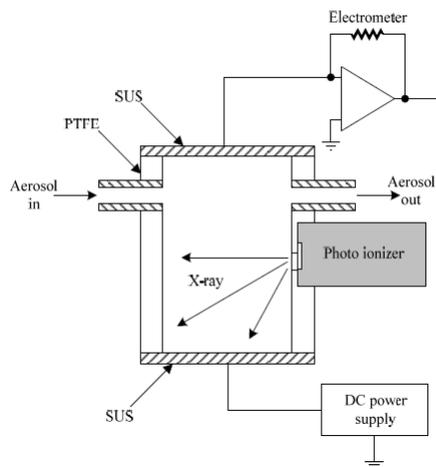
30

## Sorgenti radioattive



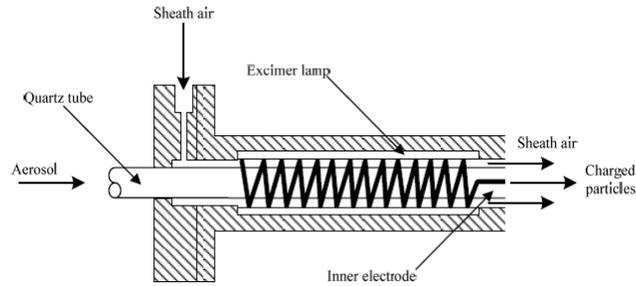
31

## Fotoionizzazione a raggi X



32

## Effetto fotoelettrico



33

## Distribuzione di carica in funzione del diametro

**Table B-1**  
Midpoint Mobilities, Midpoint Particle Diameters, and Fraction of Total Particle Concentration that Carries +1, +2, +3, +4, +5, and +6 Elementary Charges as a Function of Mobility

Mobility Midpoint cm <sup>2</sup> /Vs	Particle Diameter Midpoint, μm	Fraction of Total Particle Concentration That Carries This Number (1-d) of Positive Charges					
		+1	+2	+3	+4	+5	+6
4.522E-1	0.0022	0.0082	0	0	0	0	0
3.243E-1	0.0025	0.0094	0	0	0	0	0
2.434E-1	0.0029	0.0108	0	0	0	0	0
1.872E-1	0.0034	0.0125	0	0	0	0	0
1.371E-1	0.0039	0.0146	0	0	0	0	0
1.030E-1	0.0045	0.0170	0	0	0	0	0
7.733E-2	0.0052	0.0199	0	0	0	0	0
5.808E-2	0.0060	0.0234	0	0	0	0	0
4.384E-2	0.0070	0.0275	0	0	0	0	0
3.280E-2	0.0081	0.0323	0	0	0	0	0
2.469E-2	0.0093	0.0380	0	0	0	0	0
1.855E-2	0.0107	0.0445	0	0	0	0	0
1.396E-2	0.0124	0.0520	0	0	0	0	0
1.051E-2	0.0143	0.0606	0	0	0	0	0
7.919E-3	0.0165	0.0703	0	0	0	0	0
5.972E-3	0.0191	0.0810	0	0	0	0	0
4.547E-3	0.0221	0.0928	0.0002	0	0	0	0
3.405E-3	0.0255	0.1054	0.0004	0	0	0	0
2.577E-3	0.0294	0.1188	0.0009	0	0	0	0
1.953E-3	0.0340	0.1327	0.0017	0	0	0	0
1.483E-3	0.0392	0.1467	0.0029	0	0	0	0
1.128E-3	0.0453	0.1605	0.0048	0	0	0	0
8.607E-4	0.0523	0.1737	0.0075	0	0	0	0
6.585E-4	0.0604	0.1857	0.0111	0	0	0	0
5.055E-4	0.0698	0.1963	0.0157	0	0	0	0
3.896E-4	0.0806	0.2050	0.0213	0.0006	0	0	0
3.016E-4	0.0931	0.2115	0.0280	0.0012	0	0	0
2.347E-4	0.1075	0.2155	0.0356	0.0024	0.0001	0	0
1.837E-4	0.1241	0.2169	0.0439	0.0041	0.0001	0	0
1.440E-4	0.1433	0.2158	0.0525	0.0067	0.0004	0	0
1.147E-4	0.1655	0.2122	0.0612	0.0100	0.0008	0	0
9.153E-5	0.1911	0.2065	0.0694	0.0140	0.0015	0.0001	0
7.380E-5	0.2207	0.1988	0.0768	0.0187	0.0027	0.0002	0
5.961E-5	0.2548	0.1898	0.0829	0.0236	0.0044	0.0005	0
4.862E-5	0.2943	0.1797	0.0873	0.0286	0.0065	0.0010	0.0001
3.993E-5	0.3398	0.1690	0.0901	0.0335	0.0091	0.0018	0.0002
3.299E-5	0.3924	0.1581	0.0910	0.0380	0.0121	0.0029	0.0005
2.742E-5	0.4532	0.1474	0.0903	0.0418	0.0153	0.0043	0.0010
2.290E-5	0.5233	0.1372	0.0883	0.0450	0.0185	0.0061	0.0016
1.921E-5	0.6043	0.1278	0.0854	0.0475	0.0215	0.0081	0.0025
1.618E-5	0.6978	0.1194	0.0821	0.0491	0.0243	0.0102	0.0037
1.367E-5	0.8058	0.1121	0.0789	0.0500	0.0267	0.0124	0.0050
1.159E-5	0.9306	0.1063	0.0763	0.0501	0.0286	0.0145	0.0065

- Distribuzione di carica, all'equilibrio, delle particelle all'interno di un caricatore/neutralizzatore bipolare Kr-85

34

## Classificazione dimensionale Differential Mobility Analyzer (DMA)

- Classifica le particelle in funzione della loro mobilità in campo elettrico:

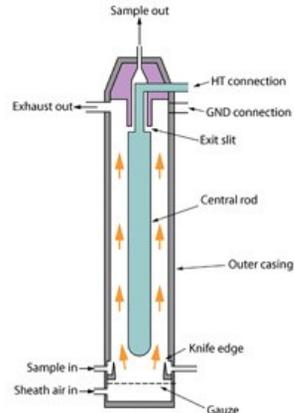
$$Z = \frac{neC(D_p, P)}{3\pi\mu D_p}$$

Z dipende da:

- Proprietà del gas ( $\mu$ =viscosità)
- Carica della particella ( $n, e$ )
- Dimensione della particella ( $D_p$ )

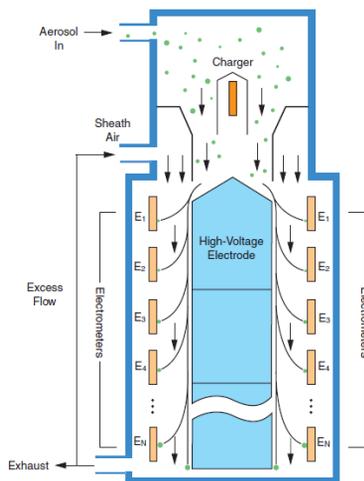
$C$  = Slip (Cunningham) correction factor

È un fattore di correzione per tenere conto che la particella sta in una situazione borderline tra regime continuo e il regime libero diffusivo

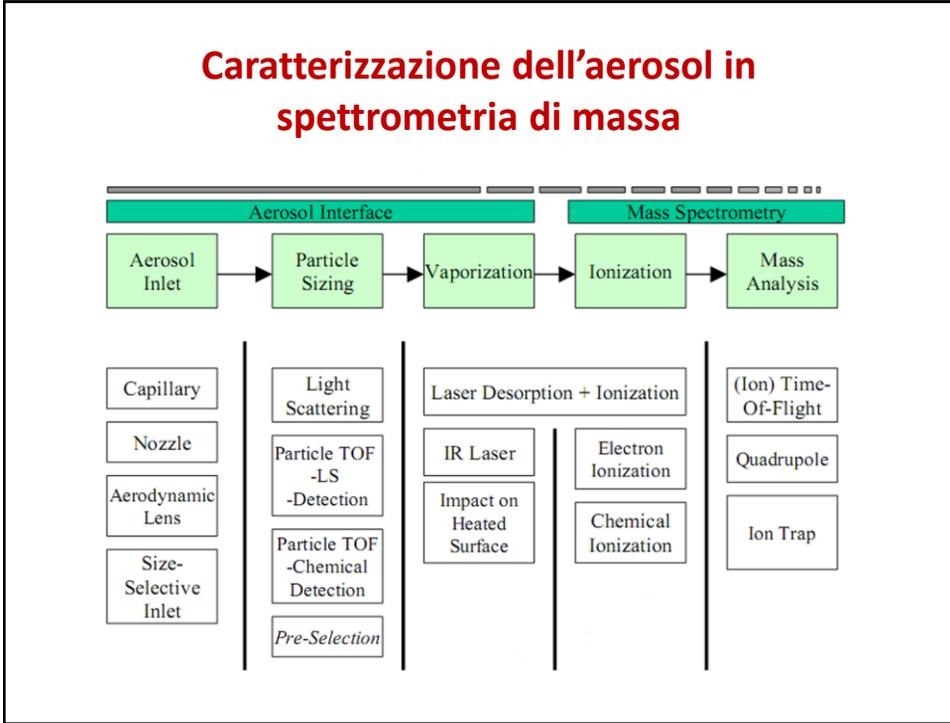


35

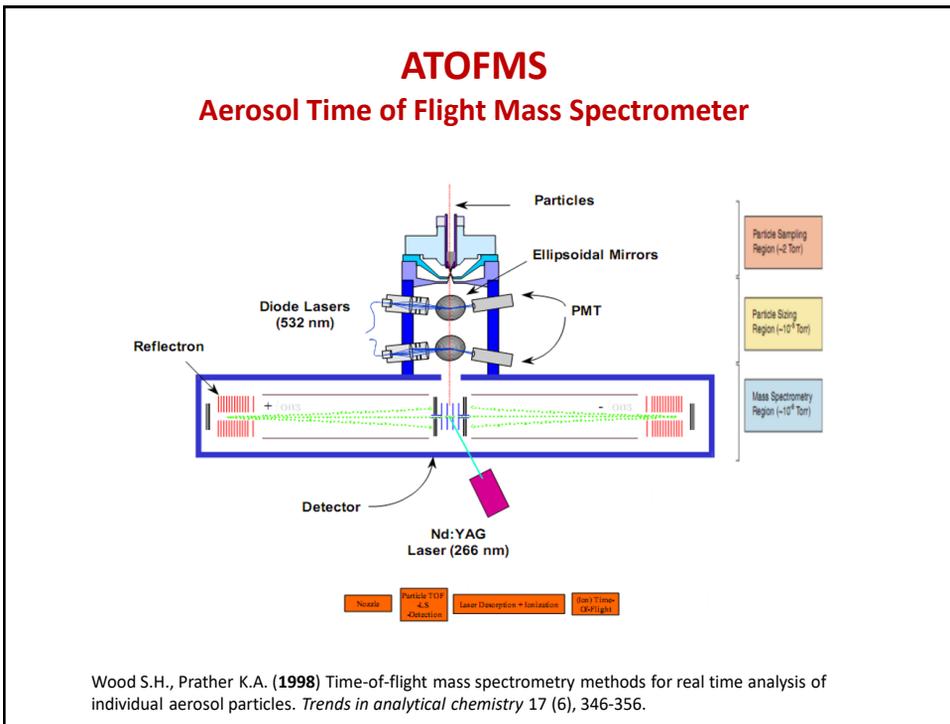
## Fast Mobility Particle Sizer (FMPS)



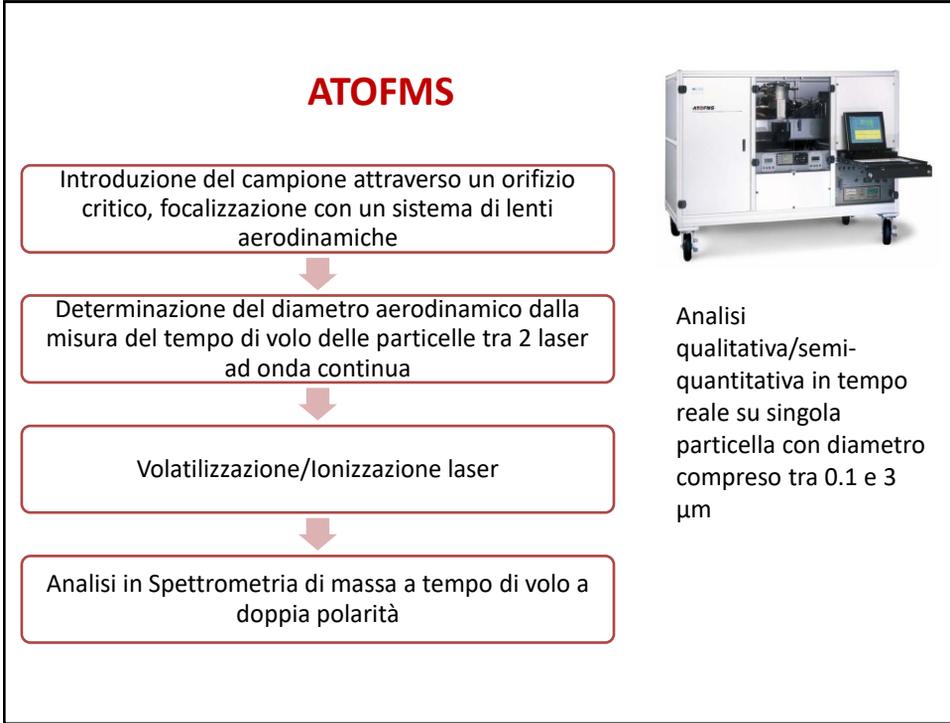
36



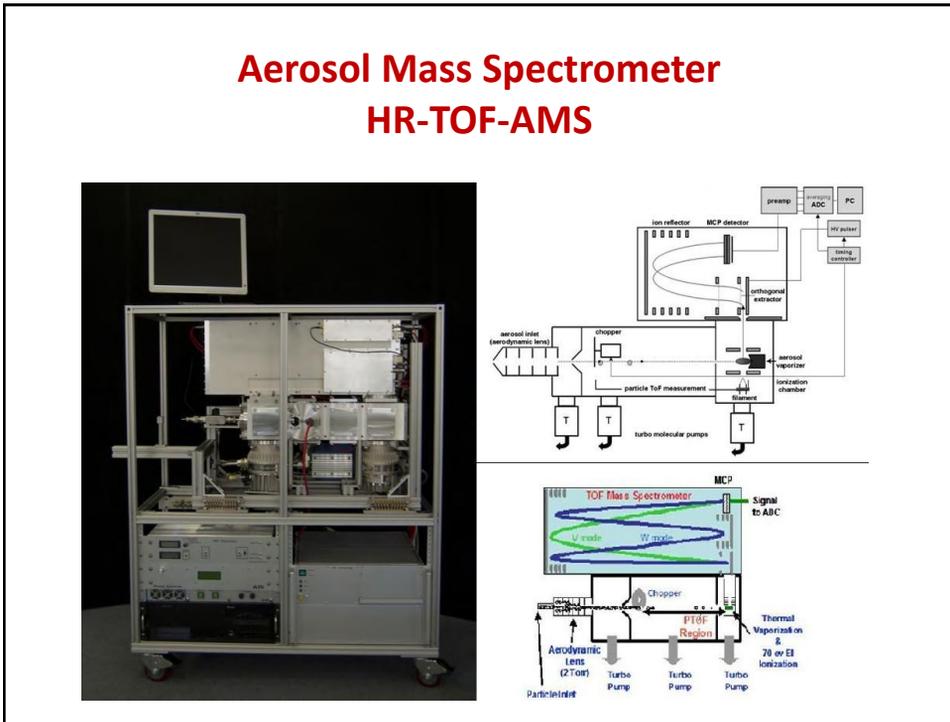
37



38



39



40

## AMS (Aerosol Mass Spectrometer)

Introduzione del campione attraverso un ugello conico, focalizzazione con un sistema di lenti aerodinamiche

Modulazione del fascio di particelle attraverso un chopper meccanico

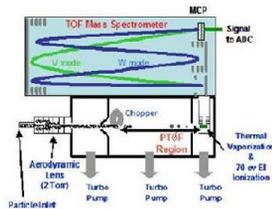
Volatilizzazione per impatto su di una superficie calda (600°C) di tungsteno sotto-vuoto e ionizzazione per impatto elettronico (EI)

Analisi in Spettrometria di massa a tempo di volo a singola polarità (+)

41

## Modalità di misura

- Modalità "MS" (spettro di massa)
  - Analisi quantitativa in tempo reale sul NR-PM<sub>1</sub> (non-refrattario)
  - Sottrazione del segnale ottenuto con chopper aperto (gas+particolato) e chopper chiuso (gas)
- Modalità "PToF" (Particle Time of Flight)
  - Misura il tempo di percorrenza delle particelle tra il chopper (chopped 1-4%) e il rivelatore
- Bassa risoluzione (V-Mode) e alta risoluzione (W-Mode)



42

## Calibrazione AMS

- Calibrazione PToF con particelle di lattice di dimensione nota
- Calibrazione MS con particelle di nitrato d'ammonio

$$C_s = \frac{10^{12} MW_s}{IE_s Q N_A} \sum_{all\_i} I_{s,i}$$

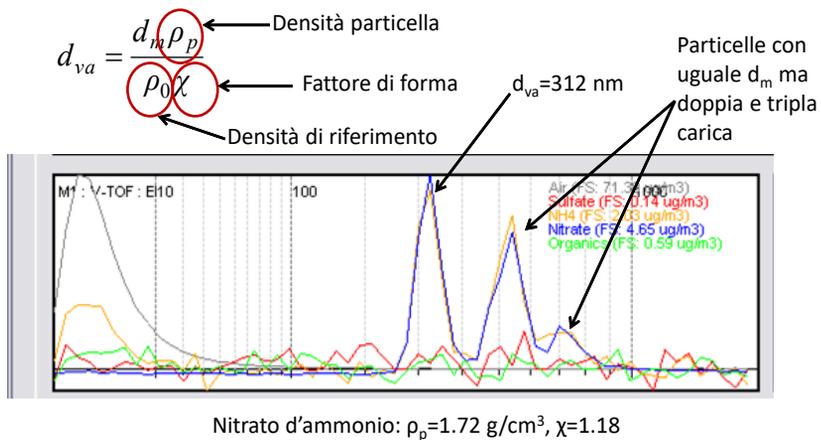
$$\frac{IE_s}{MW_s} = R IE_s \frac{IE_{NO_3}}{MW_{NO_3}}$$

- $C_s$  = concentrazione specie "s" ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $MW_s$  = massa molecolare specie "s" (g/mol)
- $Q$  = flusso di campionamento ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
- $N_A$  = numero di Avogadro
- $IE$  = efficienza di ionizzazione
- $I$  = segnale (ioni/s)

43

## Calibrazione AMS

- Calibrazione con particelle di nitrato d'ammonio di  $d_m=214$  nm selezionate attraverso un DMA



44

## ATOFMS/AMS pro e contro

ATOFSMS	AMS
Analisi qualitativa/semi-quantitativa	Analisi quantitativa
$d_p=0.1-3 \mu\text{m}$	$d_p=0.1-1 \mu\text{m}$
Componente Inorganica/Organica (anche sostanze termolabili e a bassa volatilità)	Solo componente non refrattaria
Analisi di singole particelle	PM <sub>1</sub> , distribuzione dimensionale
frammentazione modulabile	frammentazione elevata

- Analisi in tempo reale su un ampio spettro di sostanze
- Costi e consumi elevati
- Strumentazioni voluminose
- Enorme quantità di dati raccolti in pochi giorni di campagna di campionamento
- Trattazione/elaborazione dati lunga e complessa (tecniche di analisi statistica multivariata)

45

## Riferimenti/Materiale d'approfondimento

McMurry P.H. (2000) A review of atmospheric aerosol measurements. Atmospheric Environment 34, 1959-1999.

Seinfeld J.H., Pandis S.N., Atmospheric Chemistry and Physics, Ed. Wiley

Van de Hulst H.C., Light scattering by small particles, Ed. Dover Publications

Hahn D.W. Light Scattering Theory. Disponibile on-line:

<http://plaza.ufl.edu/dwhahn/Rayleigh%20and%20Mie%20Light%20Scattering.pdf>

Zhang X. et al. (2004) A numerical characterization of particle beam collimation by an aerodynamic lens-nozzle system: Part II integrated aerodynamic lens-nozzle system, Aerosol Science and technology 38, 619-638.

Intra P., Tippayawong N. (2011) An overview of unipolar charger developments for nanoparticle charging. Aerosol and Air Quality Research 11, 187-209.

Manuali strumenti: TEOM/ FDMS (Thermo), CPC (Grimm/TSI), OPC (Grimm), APS (TSI), SMPS/FDMS (Grimm/TSI), ATOFMS (TSI), AMS (Aerodyne), Aerosol Diluter (TSI), Nafion dryer (Perma Pure)

46