



UNIVERSITÀ DEL PIEMONTE ORIENTALE

# Traiettorie nella troposfera e caratterizzazione di meteoriti tramite spettroscopia micro-Raman e SEM/EDS

Paolo Trivero, Caterina Rinaudo, Alessandro Croce

Dipartimento di scienze e Innovazione Tecnologica - Università del Piemonte Orientale, Alessandria

PRISMA Day 2017

16 maggio 2017, Firenze - Università degli Studi, Museo di Storia Naturale

## Ricerca delle meteoriti: circoscrizione dell'area

La traiettoria luminosa vista da più telecamere (o da sistema radio) permette di valutare la traccia delle meteore in atmosfera.

Per stimare l'area di caduta delle meteore è necessario sviluppare un modello che tenga conto delle condizioni atmosferiche.



Vanno tenuti in conto molti parametri

## Caratterizzazione delle meteoriti

Tra i vari tipi di caratterizzazioni consideriamo:

❖ La spettroscopia micro-Raman, tecnica non distruttiva, che permette una caratterizzazione delle fasi minerali che compongono le meteoriti.

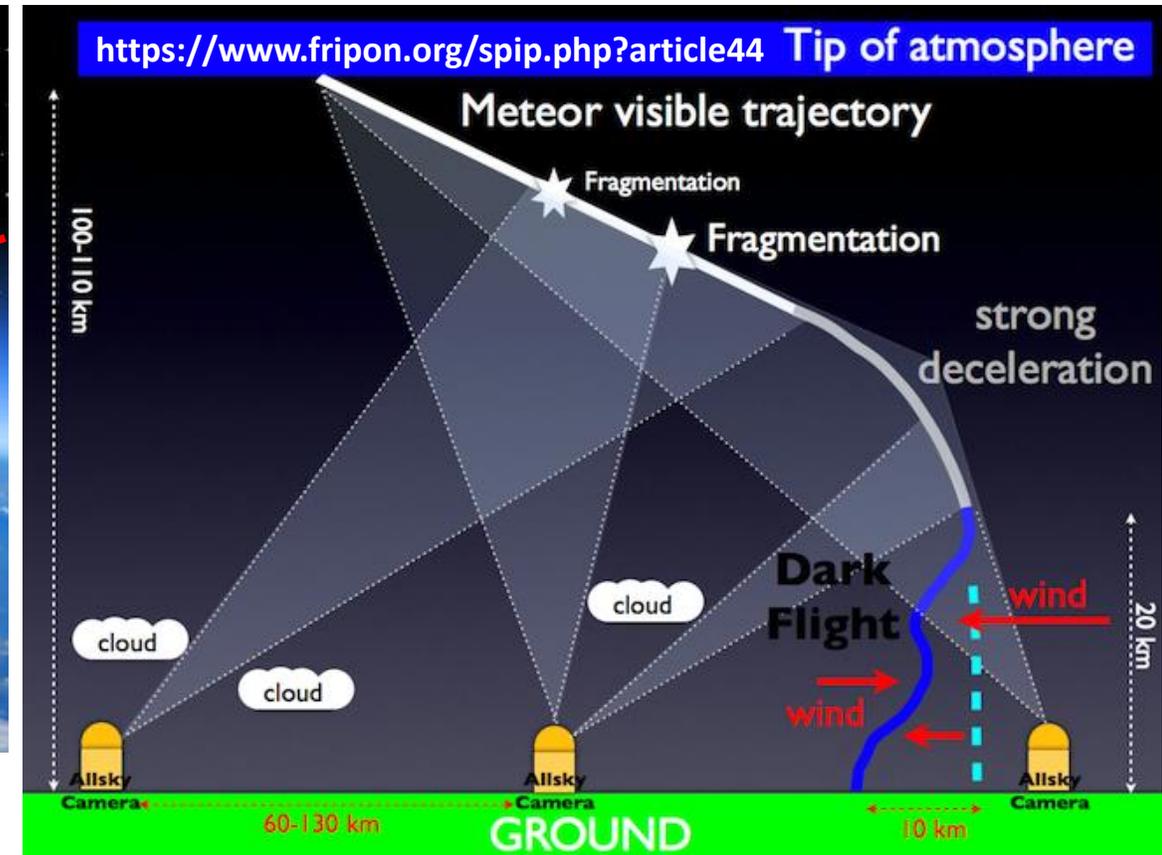
❖ La Microscopia Elettronica a Scansione con annessa microsonda in dispersione di energia (SEM/EDS), che fornisce informazioni circa la morfologia e la composizione chimica dei minerali.

# Traiettoria delle meteore



La traiettoria nella troposfera può dipendere da:

- **Angolo di ingresso;**
  - **Velocità di ingresso;**
  - **Gravità;**
  - **Massa;**
  - **Forma;**
  - **Composizione chimica;**
  - **Attrito: coefficiente di resistenza;**
  - **Numero di Reynolds;**
  - **Effetto Magnus;**
  - **Effetto Coanda.**
- **Condizioni meteorologiche:**
    - **Vento;**
    - **Temperatura;**
    - **Densità;**
    - **Umidità;**
    - **Pioggia.**



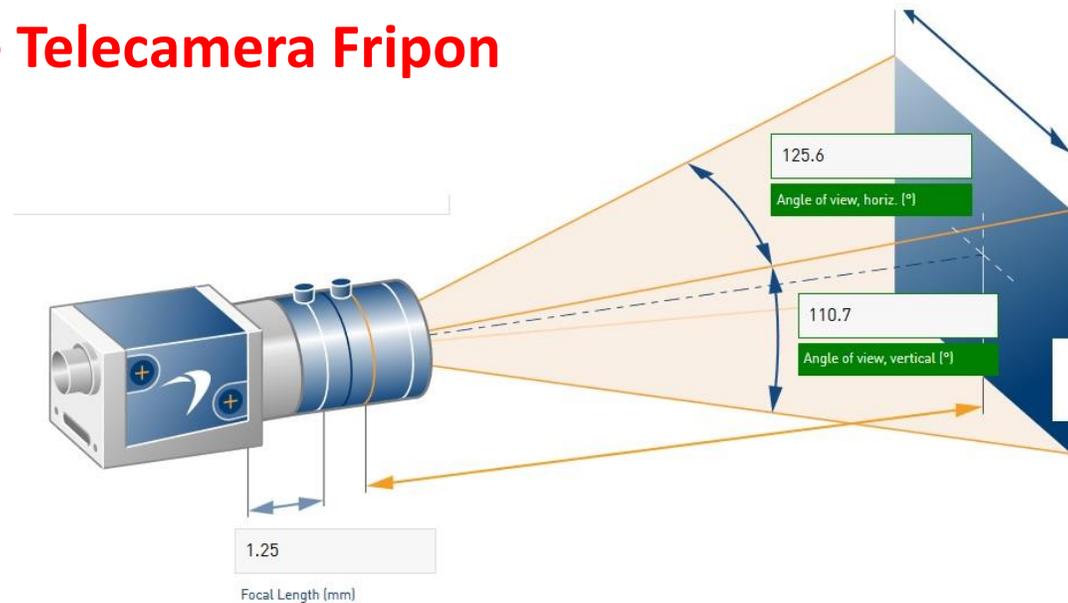
The computation of the 3D trajectory of a meteor from images requires the use of at least two images from two different stations. The algorithms are well known for a long time now. The origin of meteoroid causing the meteor (and meteorite) can be determined by calculating the heliocentric orbit, derived from the beginning of the trajectory in the atmosphere. It requires some corrections such as the Earth's gravitational attraction. Similarly, the calculation of the strewn field request taking into account wind and local topography. Since summer 2013, IMCCE is able to perform these calculations through the work of Mr. Mouget (internship Magisterium d'Orsay - Paris-Sud University). The figure below shows schematically the path of a meteoroid into the atmosphere until its fall (it becomes a meteorite).

## Risoluzione Telecamera Fripon

Field of view = 125.6° (h) x 110.7° (v)

Sensor: 1296 px (h) x 966 px(v)

Pixel size: 3.75μm x 3.75μm



Spatial resolutions at height of 100 km:

$$\sigma_h(100 \text{ km}) = \frac{[125.6^\circ \cdot (\pi/180^\circ) \cdot 100 \text{ km}]}{1296} = 0.169 \text{ km}$$

$$\sigma_v(100 \text{ km}) = \frac{[110.7^\circ \cdot (\pi/180^\circ) \cdot 100 \text{ km}]}{966} = 0.200 \text{ km}$$

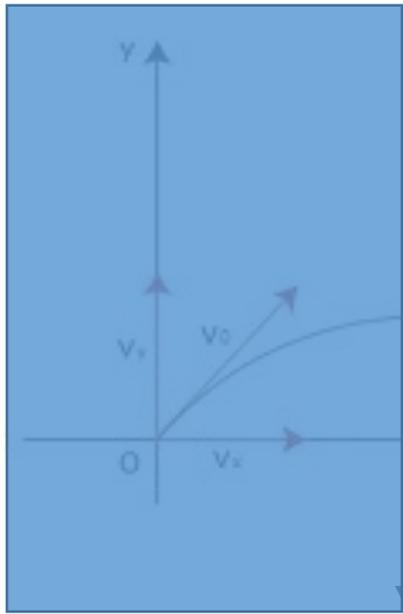
Spatial resolutions at height of 50 km:

$$\sigma_h(50 \text{ km}) = \frac{[125.6^\circ \cdot (\pi/180^\circ) \cdot 50 \text{ km}]}{1296} = 0.085 \text{ km}$$

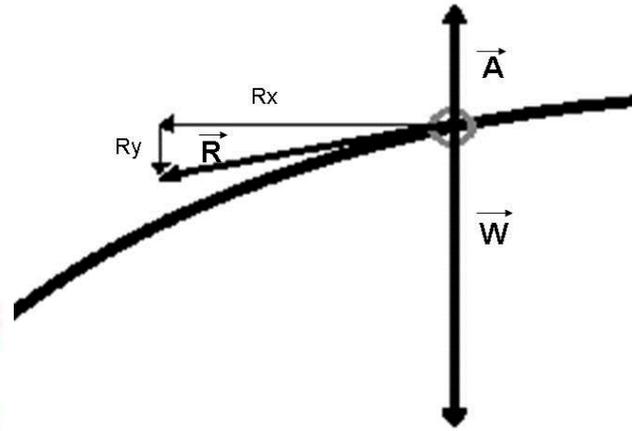
$$\sigma_v(50 \text{ km}) = \frac{[110.7^\circ \cdot (\pi/180^\circ) \cdot 50 \text{ km}]}{966} = 0.100 \text{ km}$$

## Andamento parabolico

nel caso delle meteore solo discesa



nel vuoto



in presenza di viscosità

La forza totale che agisce su un oggetto vale:

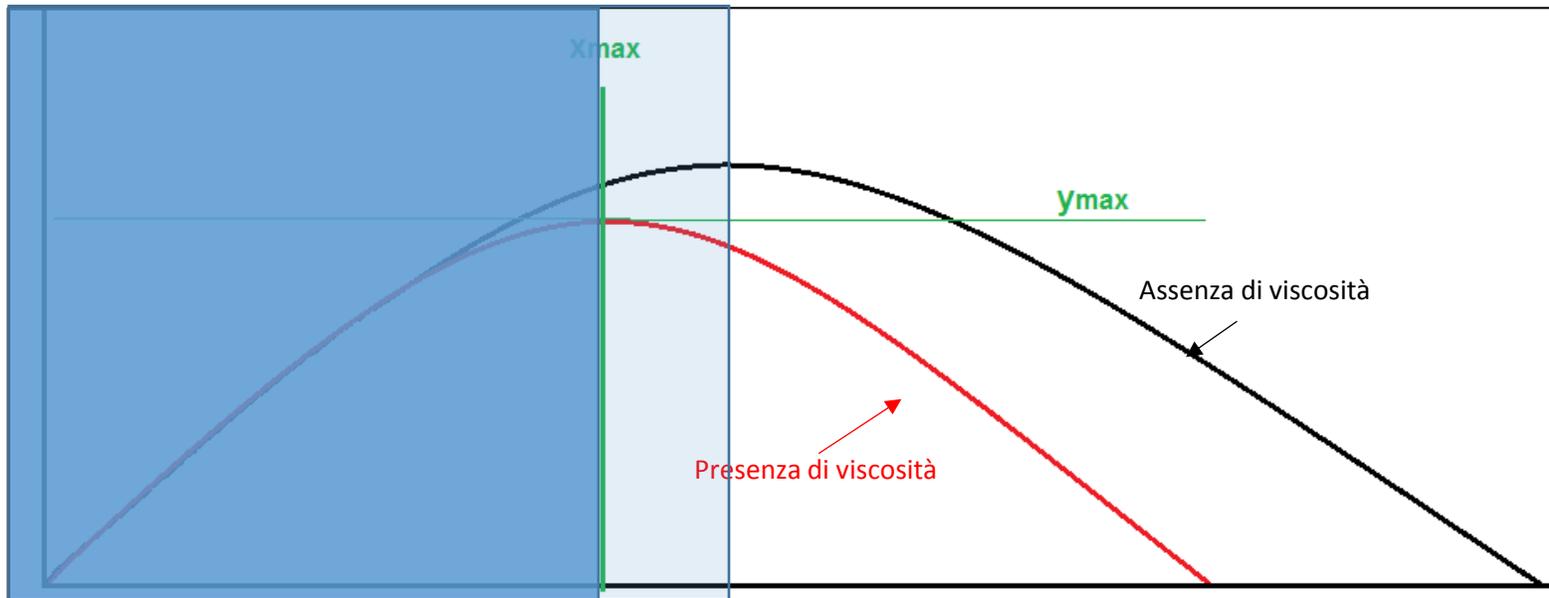
$$\vec{F} = \vec{W} + \vec{A} + \vec{R}$$

dove:

**W** è la forza peso

**A** è la spinta di Archimede

**R** è la resistenza aerodinamica

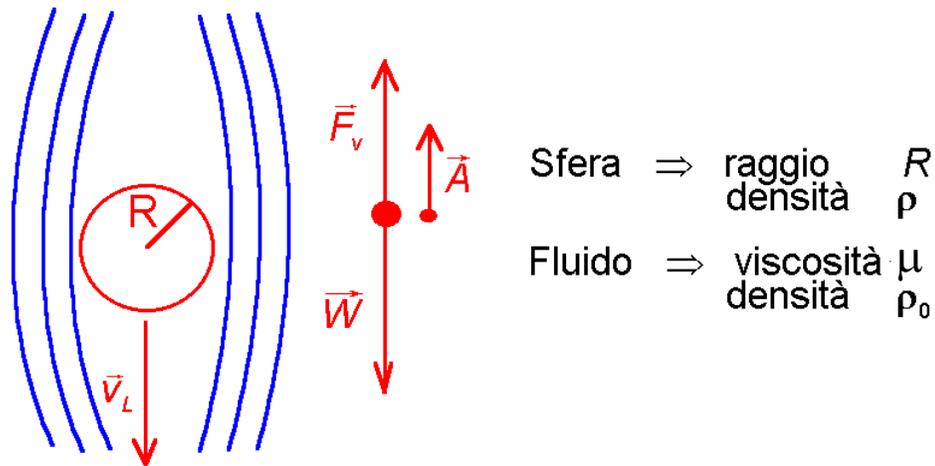


Traiettoria  
in assenza e

in **presenza**  
di viscosità

## VELOCITA' LIMITE DI UNA SFERA CHE CADE IN UN FLUIDO

La densità di una meteorite può variare da 3500 a 8000 kgm<sup>3</sup>, mentre le sue dimensioni possono andare da pochi millesimi di millimetro, nel caso delle micrometeoriti e della polvere cosmica, fino a diversi metri e quintali in peso per certe meteoriti metalliche.



$$\underbrace{6 \pi R v_L \mu}_{F_v} = \underbrace{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g}_{\substack{\text{Vol.} \\ \text{sfera} \\ \text{m} \\ \text{W} \\ \text{peso sfera}}} - \underbrace{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 g}_{\substack{\text{Vol.} \\ \text{sfera} \\ \text{m fluido} \\ \text{A} \\ \text{spinta idrostatica}}}$$

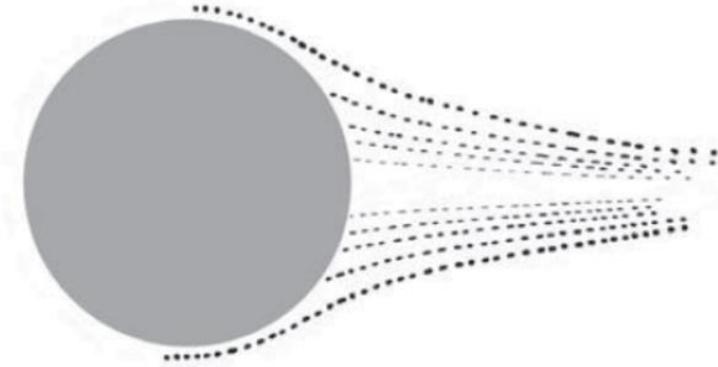
Velocità limite:

$$v_L = \frac{2R^2}{9\mu} (\rho - \rho_0) g$$

Valida per oggetti molto piccoli (particelle di polvere in aria)

Per velocità leggermente più alte  $F_v \propto v^2$

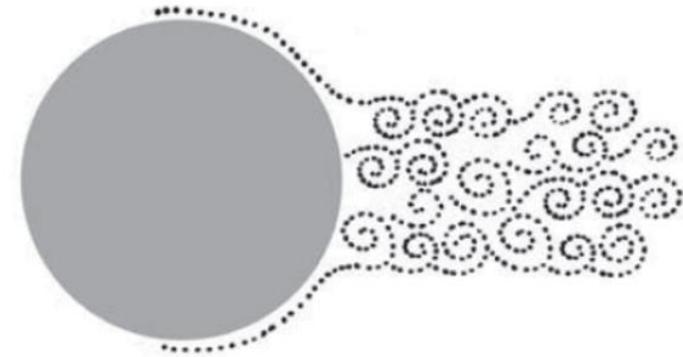
## Resistenza laminare o turbolenta



**Flusso laminare o di Stokes**

Resistenza laminare (per una sfera)  
è espressa da:

$$\vec{R}_S = -6 \pi \mu r \vec{v}$$



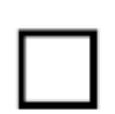
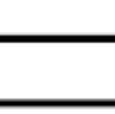
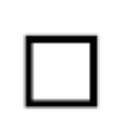
**Flusso turbolento**

La resistenza turbolenta (per una sfera) è espressa da:

$$R_n = C_D \left( \frac{1}{2} \rho_a v^2 \right) (\pi r^2)$$

dove:  $C_D$  è un coefficiente di resistenza aerodinamica (adimensionale) che dipende dalla forma dell'oggetto il cui valore va determinato sperimentalmente.

Il termine entro la prima parentesi è la pressione dinamica dell'aria, il termine entro la seconda parentesi è la sezione d'urto, che per la sfera è l'area del cerchio di raggio  $r$ .

Forma		Coefficiente di resistenza
Sfera	→ 	0.47
Semi-sfera	→ 	0.42
Cono	→ 	0.50
Cubo	→ 	1.05
Cubo inclinato	→ 	0.80
Cilindro lungo	→ 	0.82
Cilindro corto	→ 	1.15
Corpo affusolato	→ 	0.04
Semi-corpo affusolato	→ 	0.09

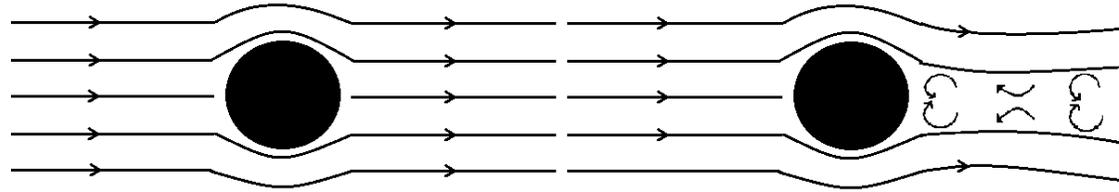
Misure di coefficienti di resistenza

## Meteoriti



Il valore non è costante ma può bruscamente variare quando varia la velocità.

All'aumentare della velocità si ha una crescita di fenomeni vorticosi rispetto a quelli viscosi, con conseguente rottura del flusso laminare. Il regime del fluido diventa così turbolento in cui i filetti di fluido seguono linee intricate e non stazionarie. Il passaggio da regime laminare a regime turbolento dipende dal valore di un parametro adimensionale detto **numero di Reynolds**. Il flusso può transitare da laminare a turbolento attraverso una zona detta regione di transizione. La transizione viene favorita dall'aumentare della velocità (o più correttamente dal **numero di Reynolds**), dalla rugosità superficiale del corpo e dalla forma meno affusolata del corpo.



Flusso attorno a una sfera: a) laminare, b) turbolento

$$\text{Numero di Reynolds} \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

dove: rapporto tra la forza d'inerzia e la forza dovuta all'attrito viscoso

$\rho$  è la [densità](#) del fluido,

$v$  è la [velocità](#) media del flusso,

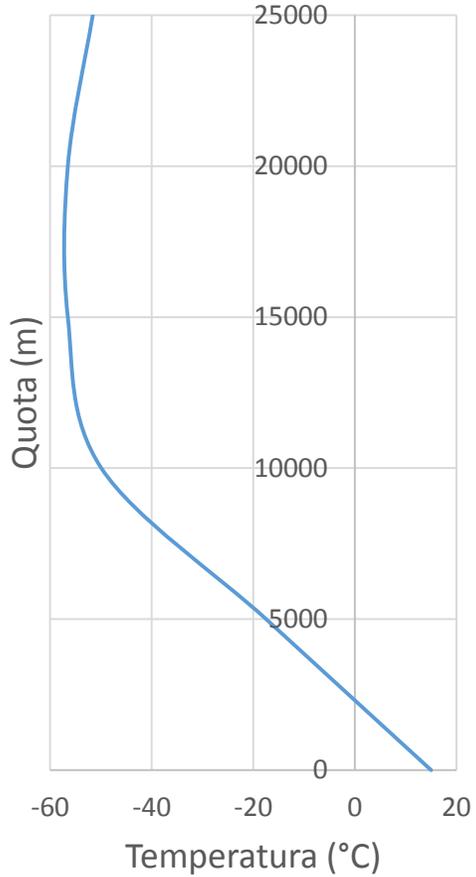
$d$  è una lunghezza convenzionale (es. nel caso di una sfera sarà il diametro),

$\mu$  è la [viscosità dinamica](#),

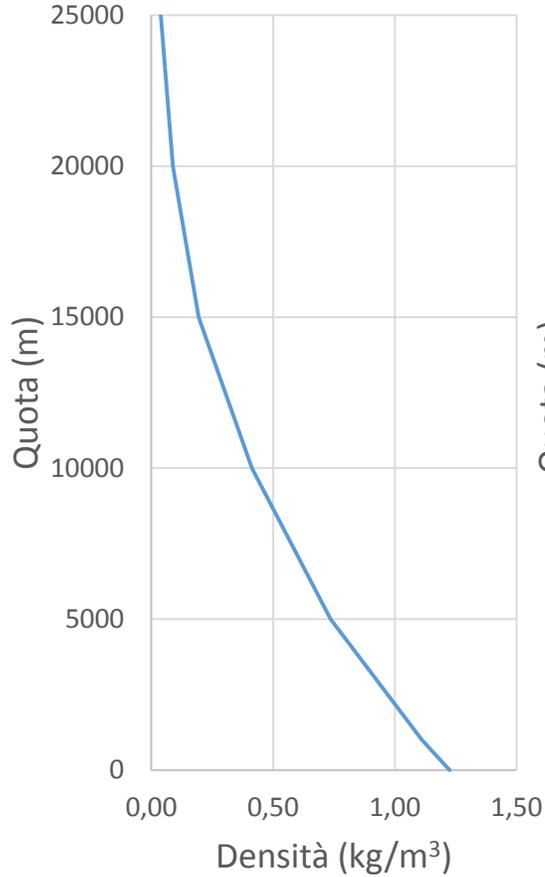
( $\nu$  è la [viscosità cinematica](#))

# Proprietà dell'Atmosfera Standard

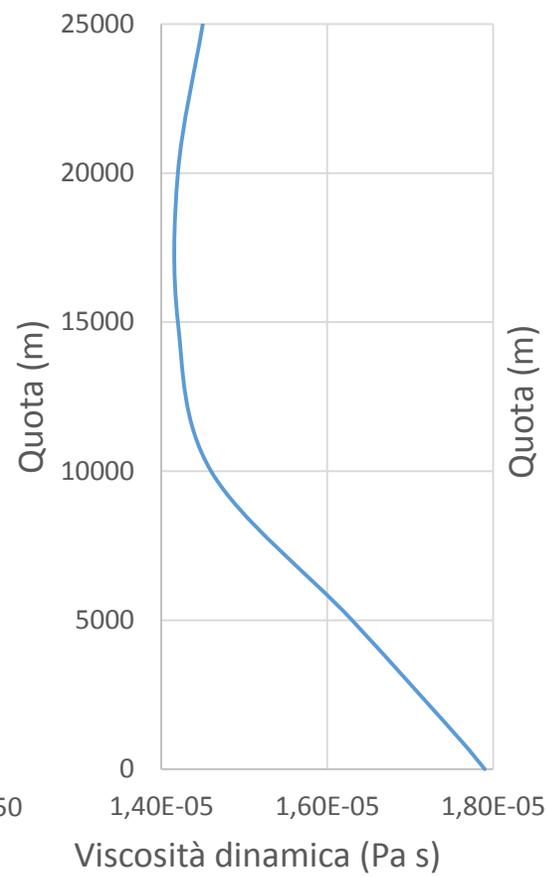
Profilo della temperatura dell'aria



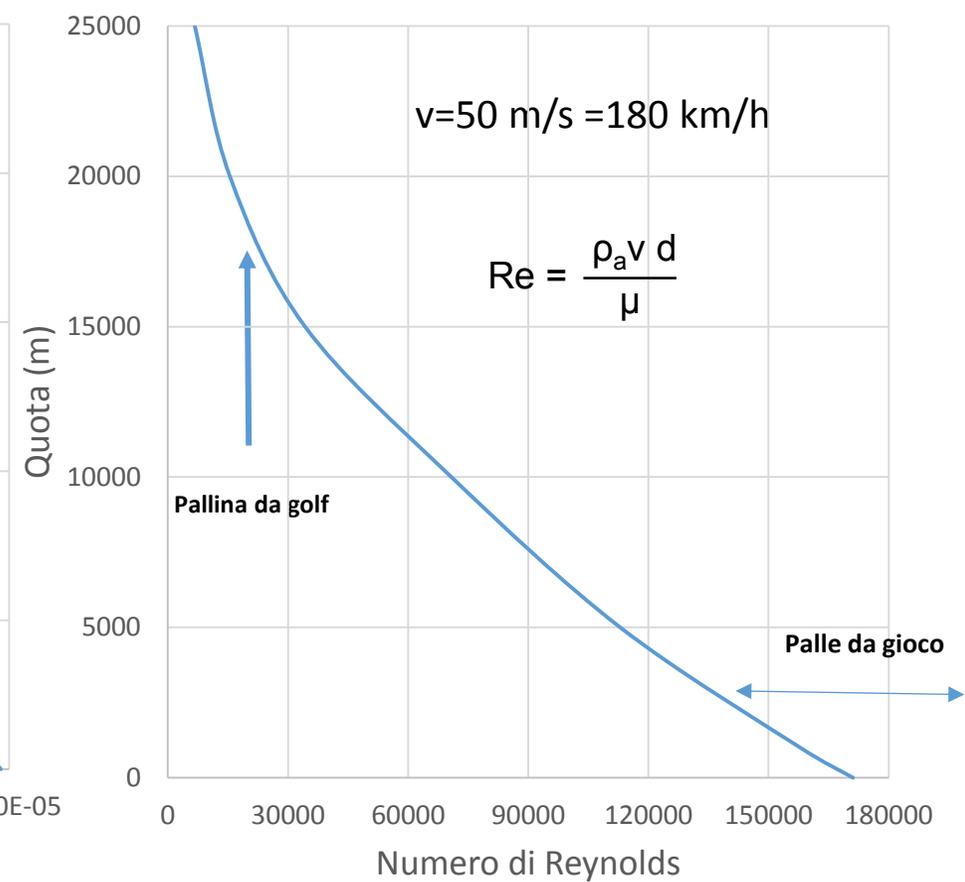
Profilo della densità dell'aria



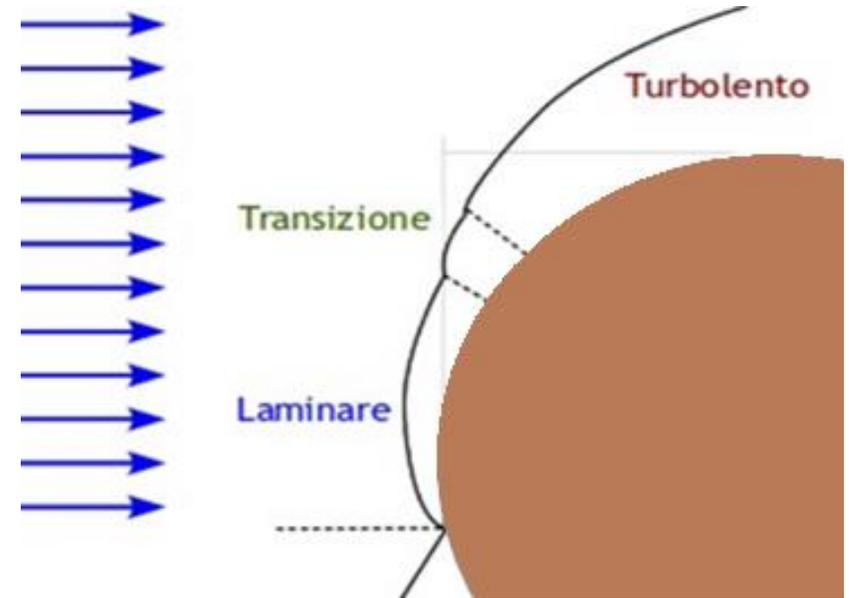
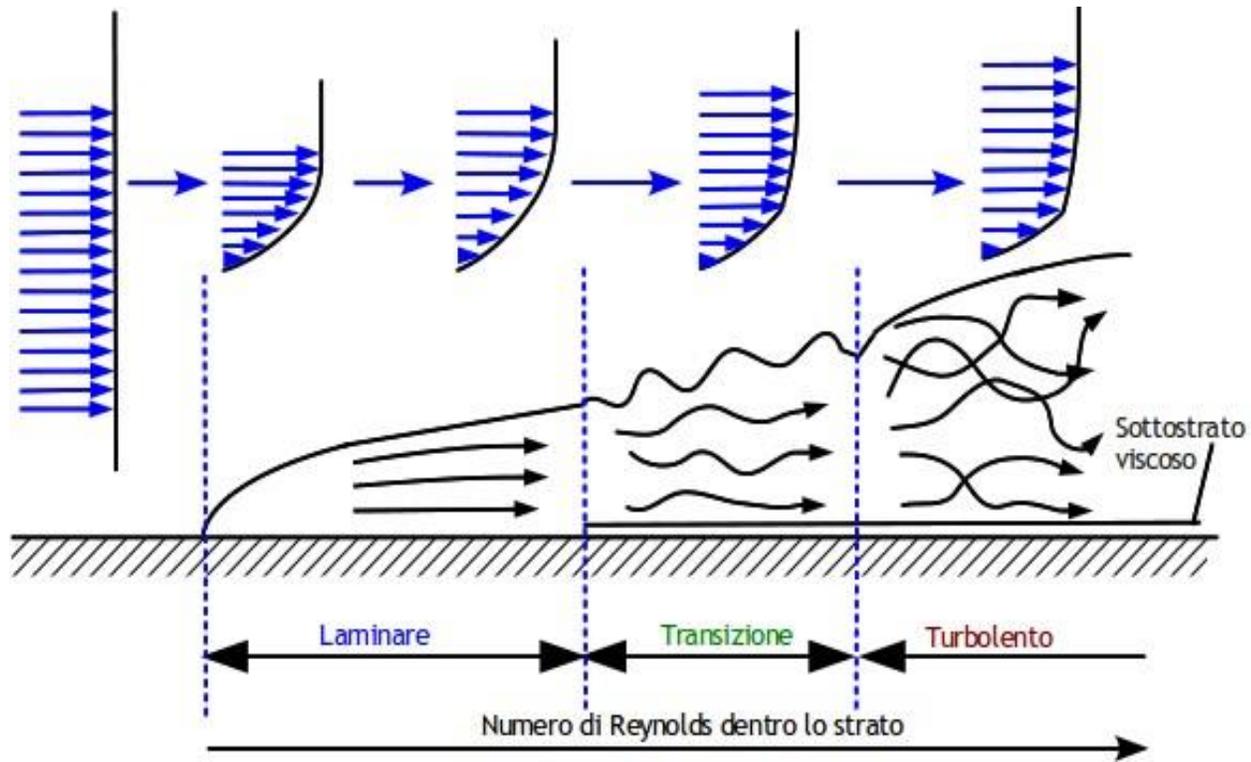
Andamento della viscosità dinamica



Andamento del Numero di Reynolds nella caduta della meteora

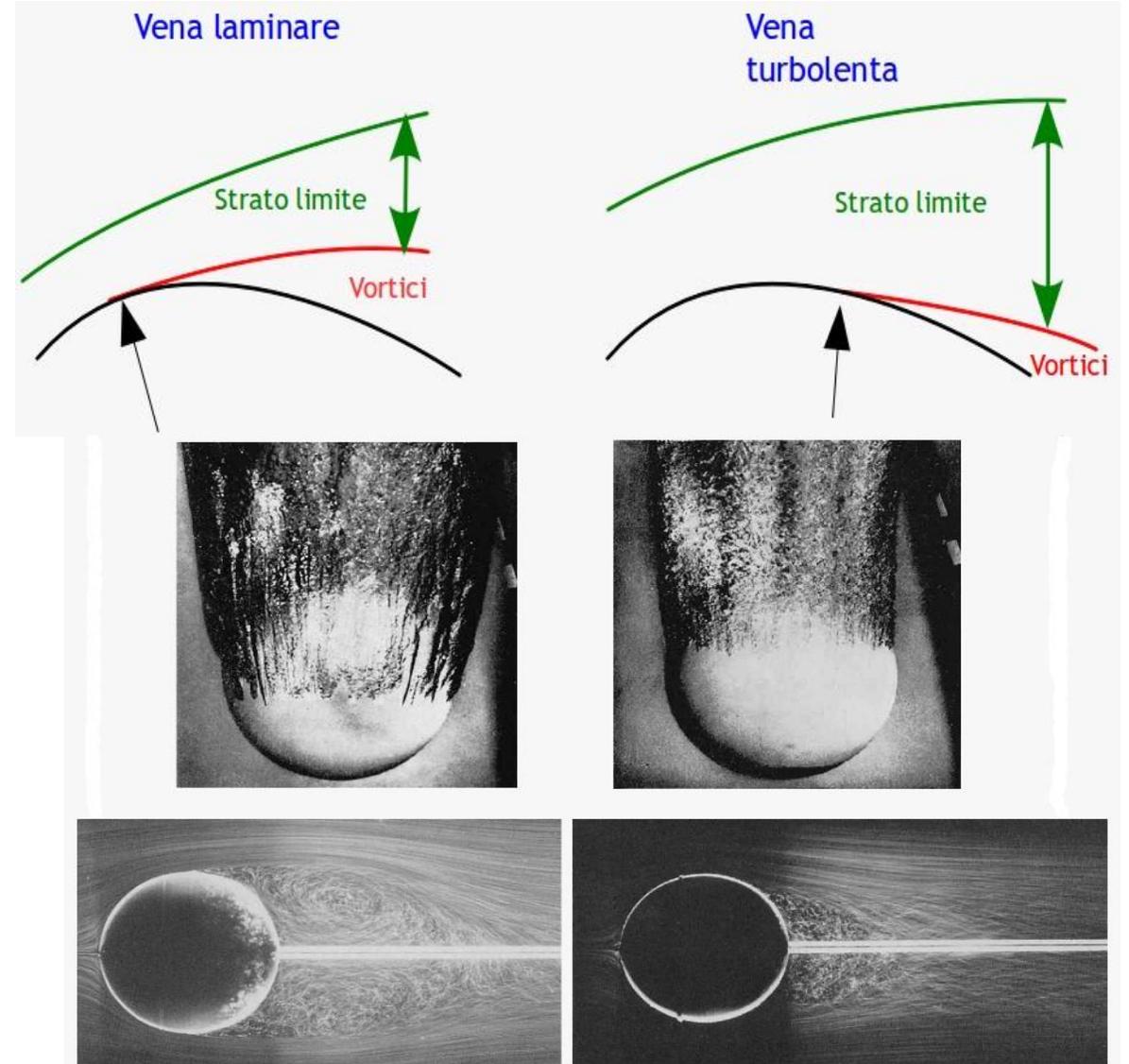
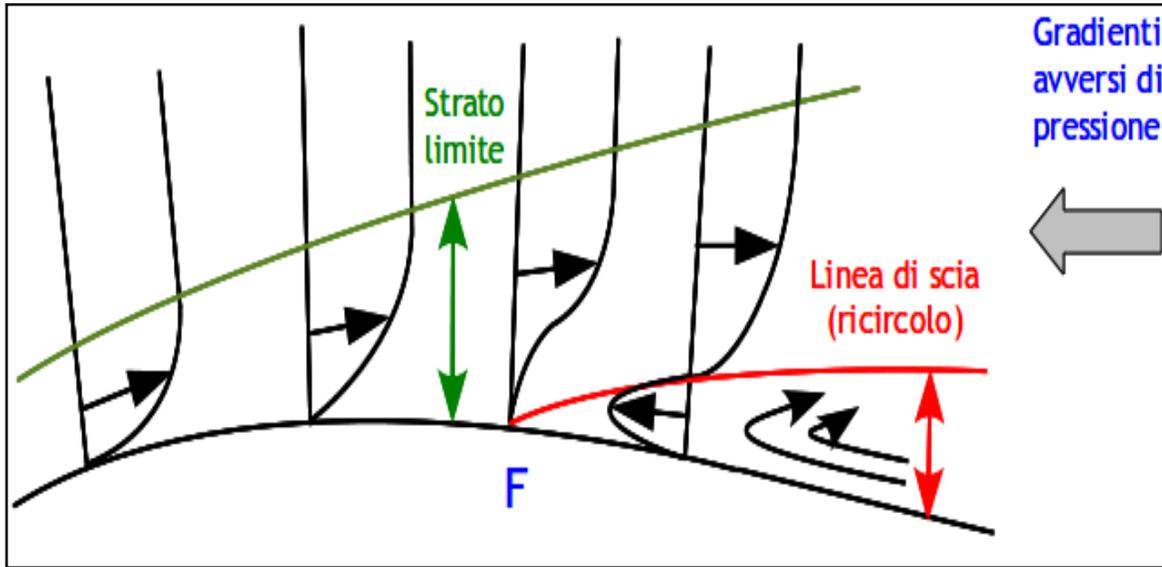


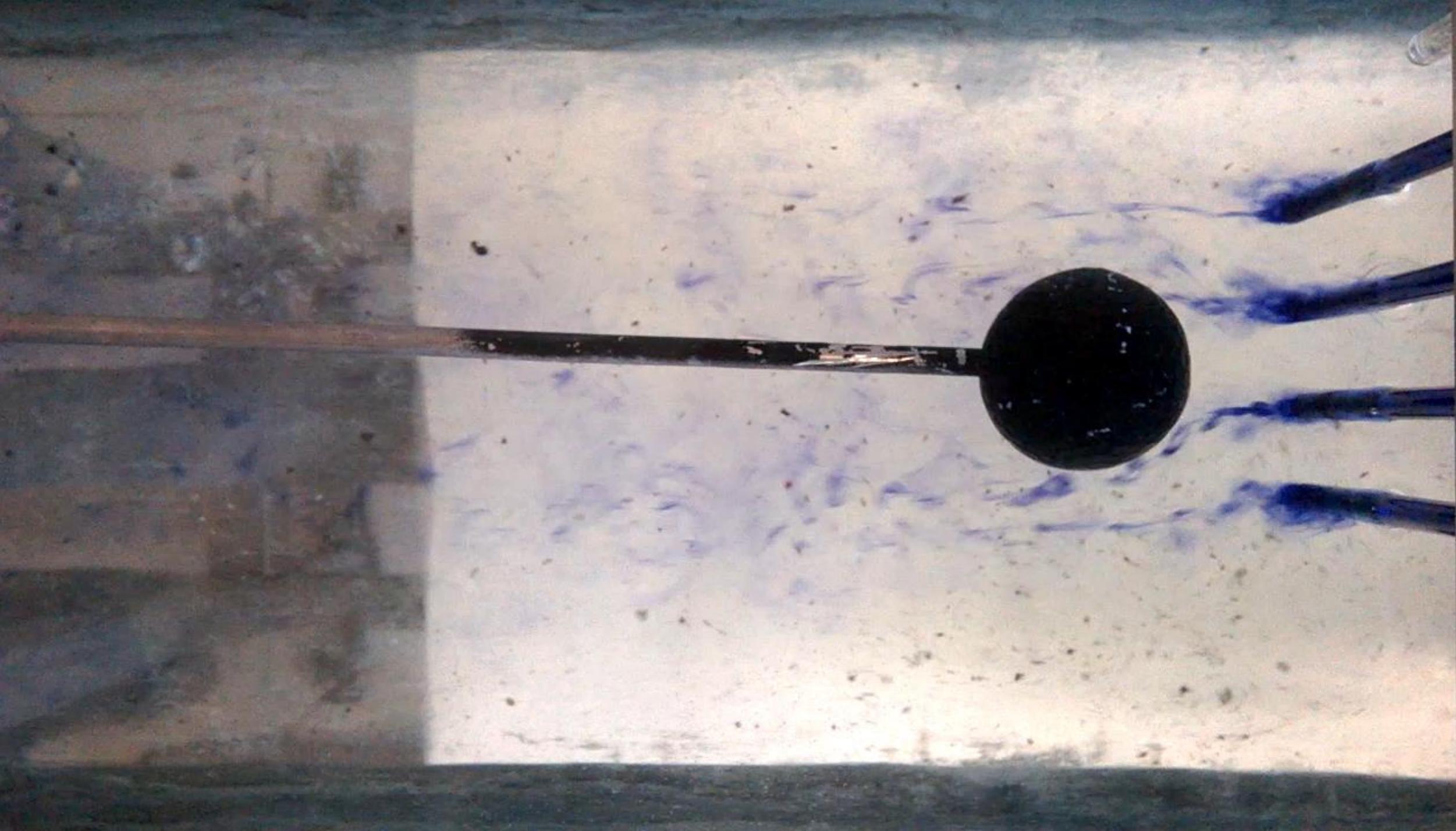
# STRATO LIMITE SU una superficie



# MOTO DI UNA SFERA IN UN FLUIDO REALE

## Distacco della vena fluida





## EFFETTI DELL'ATMOSFERA

Esempio: volo di una pallina da golf

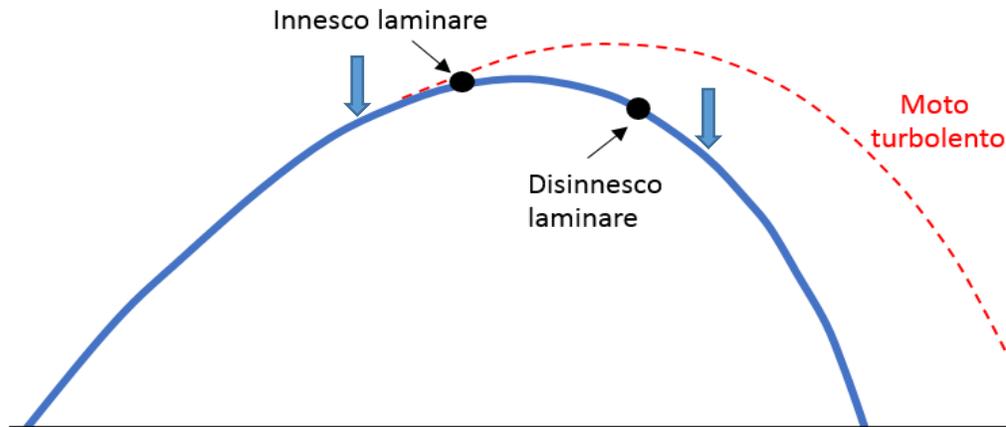
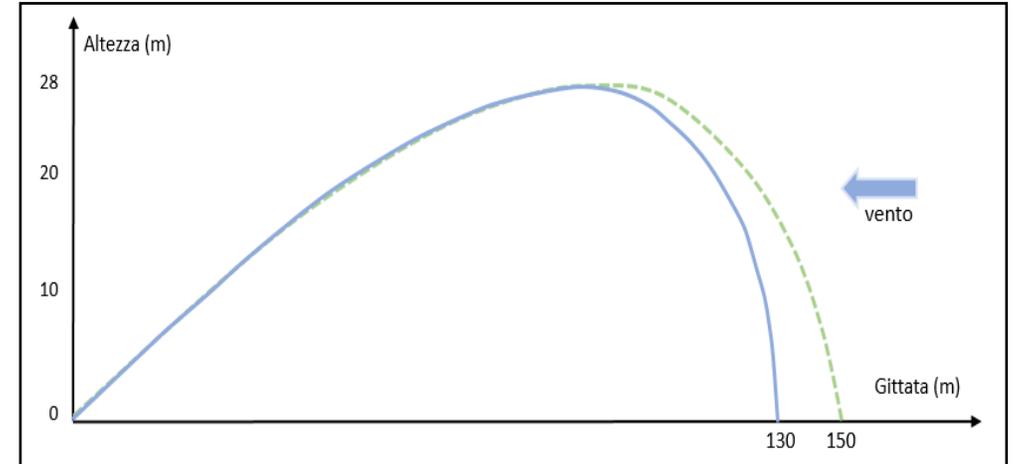
Il fattore in genere più influente è il vento

La presenza di vento contrario o a favore durante il rallentamento della palla può anticipare o ritardare l'ingresso nella fase di transizione: ad es. un vento contrario aumenta la velocità relativa del flusso mantenendo più a lungo la pallina in regime turbolento.

La temperatura influisce sulla viscosità e sulla densità dell'aria

La viscosità dell'aria aumenta con l'aumento della temperatura, mentre la densità diminuisce, quindi il numero di Reynolds decresce all'aumentare della temperatura dell'aria.

La transizione avviene quindi a velocità più alta.



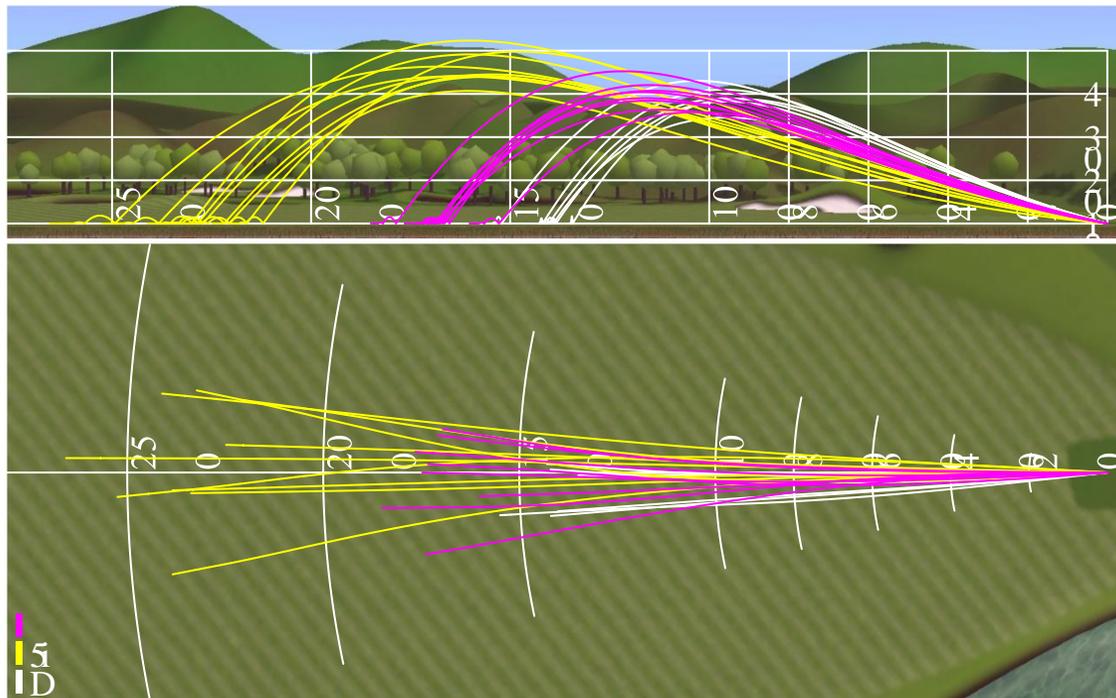
*passando da 0 °C gradi a 40 °C, la viscosità aumenta dell'11% e la densità diminuisce del 13%; nel complesso il numero di Reynolds scende del 20% circa a parità degli altri parametri*

$$Re = \frac{2\rho_a v r}{\mu}$$

## MISURE IN CAMPO

Palline da golf

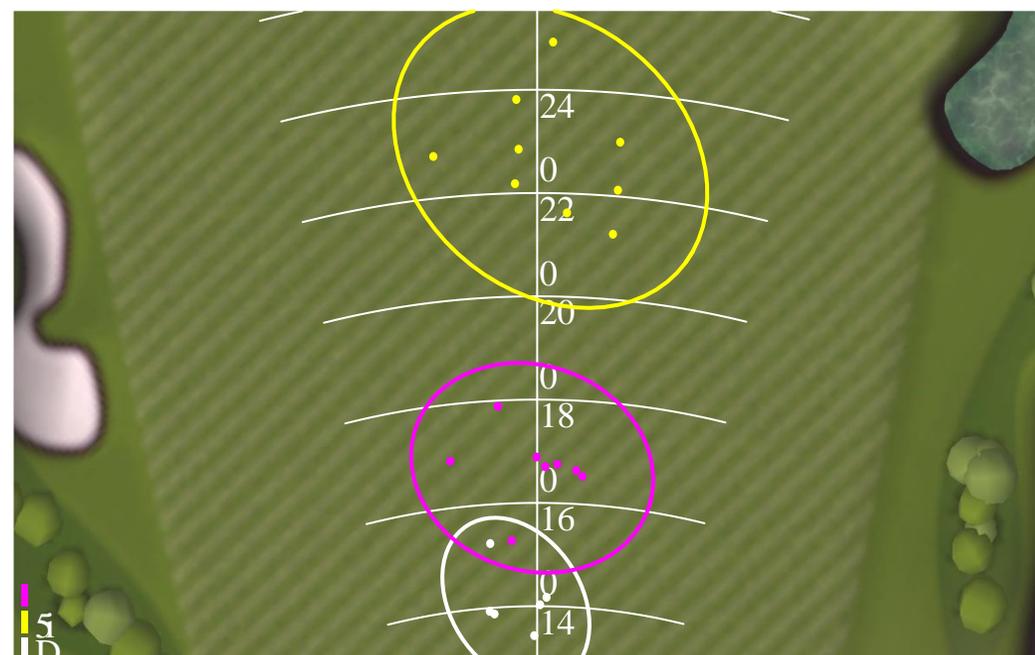
Velocità del vento 2 m/s; rispetto alla direzione di tiro 270°.  
distanza compresa tra 150 m e 170 m



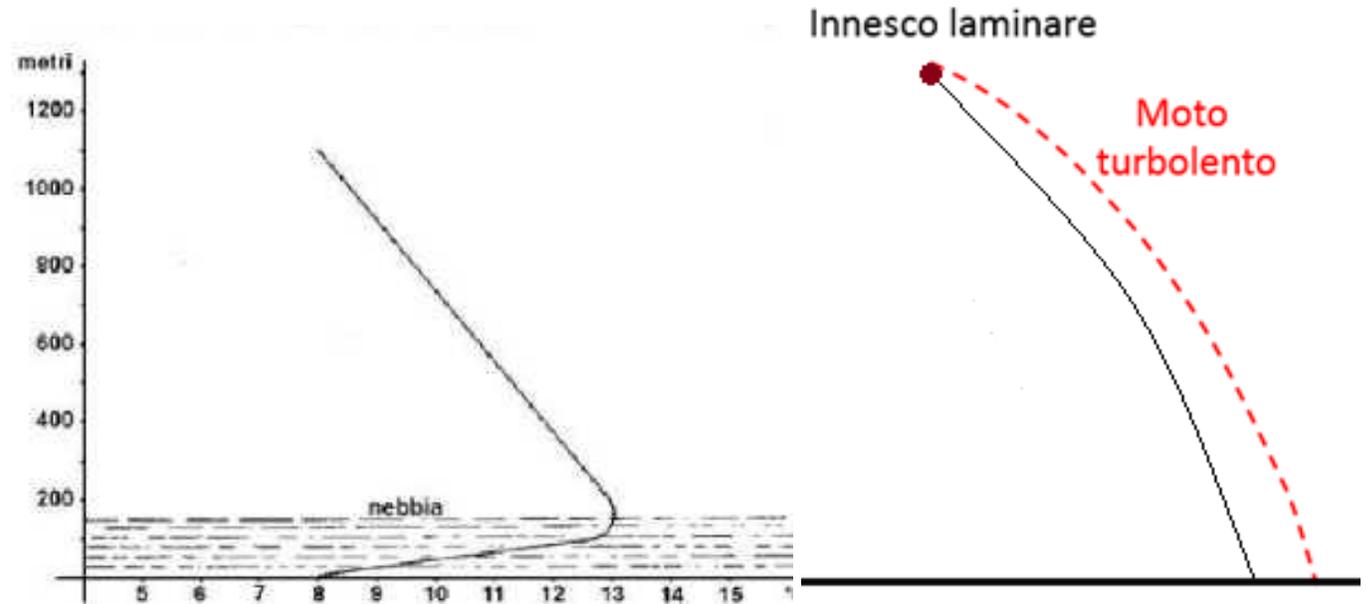
Lo spostamento lungo l'asse perpendicolare alla direzione di volo (asse x) dovuto al vento laterale è di 1,80 m (0,6 % di spostamento rispetto alla gittata per m/s di vento)

La deviazione standard è di 4,80 m in assenza di vento e di 5,82 m con vento.

## TrackMan



## EFFETTI DELL'ATMOSFERA



L'umidità riduce sia la densità sia la viscosità

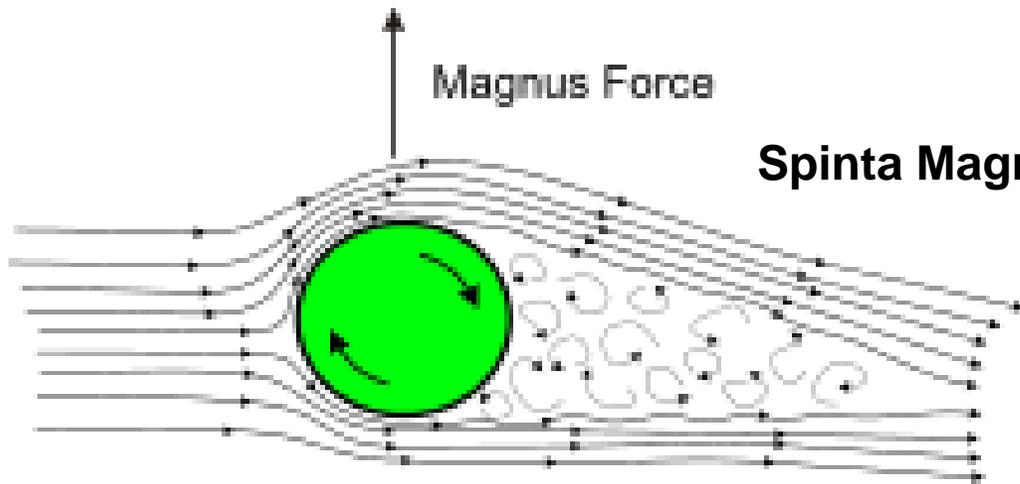
Al 100% di umidità relativa si ha complessivamente una riduzione del numero di Reynolds dell'1%

La pioggia

le gocce di pioggia funzionano come piccoli impulsi tipicamente dall'alto abbassando e riducendo la traiettoria

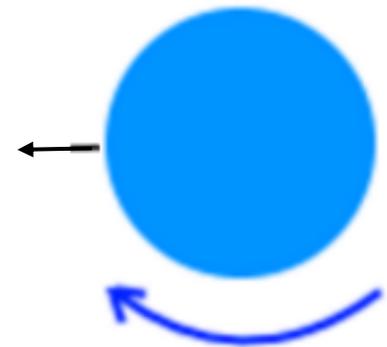
# MOTO IN UN FLUIDO CON ROTAZIONE

## Effetto Magnus



$$\text{Spinta Magnus} = M \left( \frac{1}{2} \cdot \rho a \cdot v^2 \right) (\pi r^2)$$

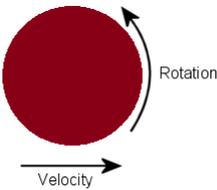
Spinta Magnus



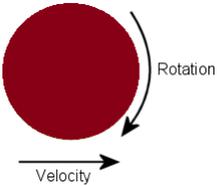
# MISURE IN LABORATORIO

## Esperienza “effetto Magnus”

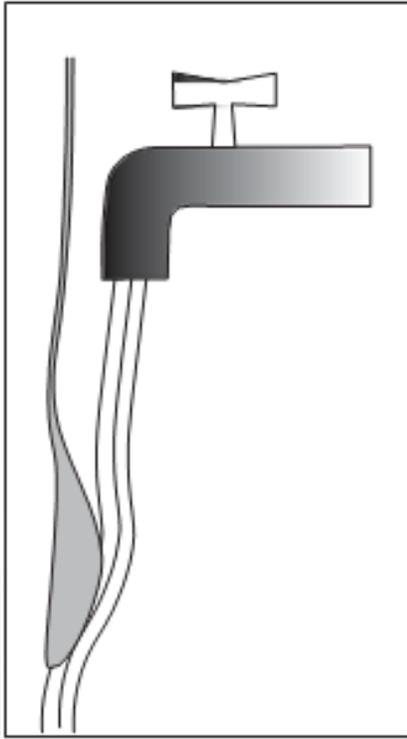
Backspin



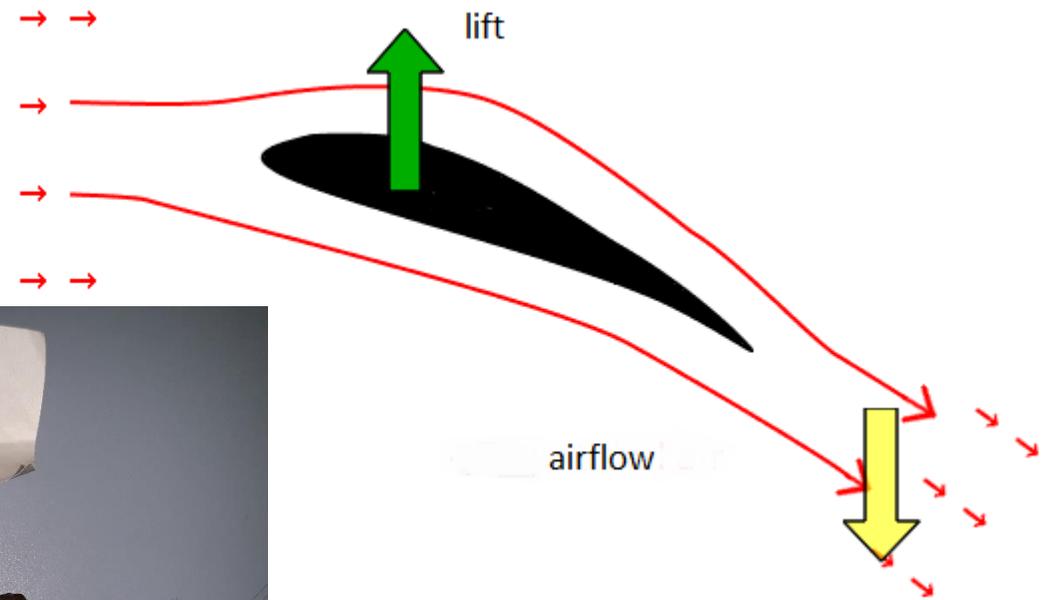
Topspin



Senza rotazione	Con rotazione



# Effetto Coanda



Portanza

## Caratterizzazione delle meteoriti



Assenza di radioattività



Siderite:  
0,1 mT con picchi a 0,2 mT

Aerolite:  
0,02 mT con picchi a 0,1 mT

# MINERALOGIA DELLE METEORITI

Le meteoriti, dal punto di vista mineralogico, sono suddivise tradizionalmente in tre grandi categorie:

- **rocciose** (anche dette aeroliti), composte principalmente da **silicati**;
- **ferrose** (anche dette sideriti), composte per lo più da una lega di **ferro** e **nicel**;
- **ferro-rocciose** (anche dette sideroliti), che contengono sia metallo che roccia in proporzioni simili.

- **Meteoriti rocciose o Aeroliti**

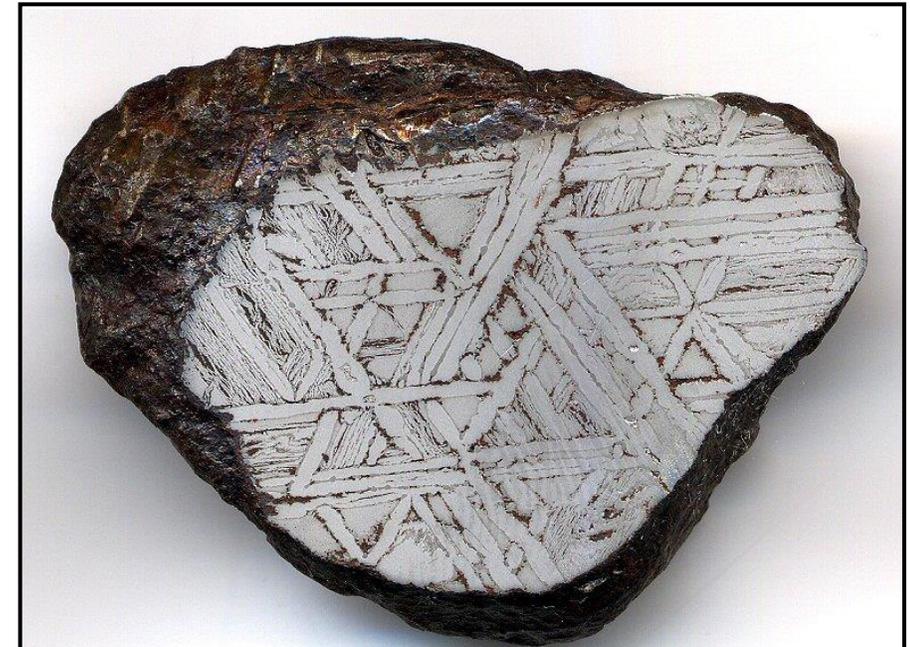
- Condriti (presenza di condrule, sferule di minerali mafici con grani di piccole dimensioni)
- Acondriti (assenza di condrule)

- **Meteoriti ferrose o Sideriti**

- Atassiti (nessuna struttura evidente)
- Ottaedriti (struttura interna a facce ottaedriche)
- Esaedriti (struttura dei cristalli cubica)

- **Meteoriti ferro-rocciose o Sideroliti**

- Pallasiti (matrice metallica con inclusioni rocciose)
- Mesosideriti (matrice litoide con inclusioni metalliche)

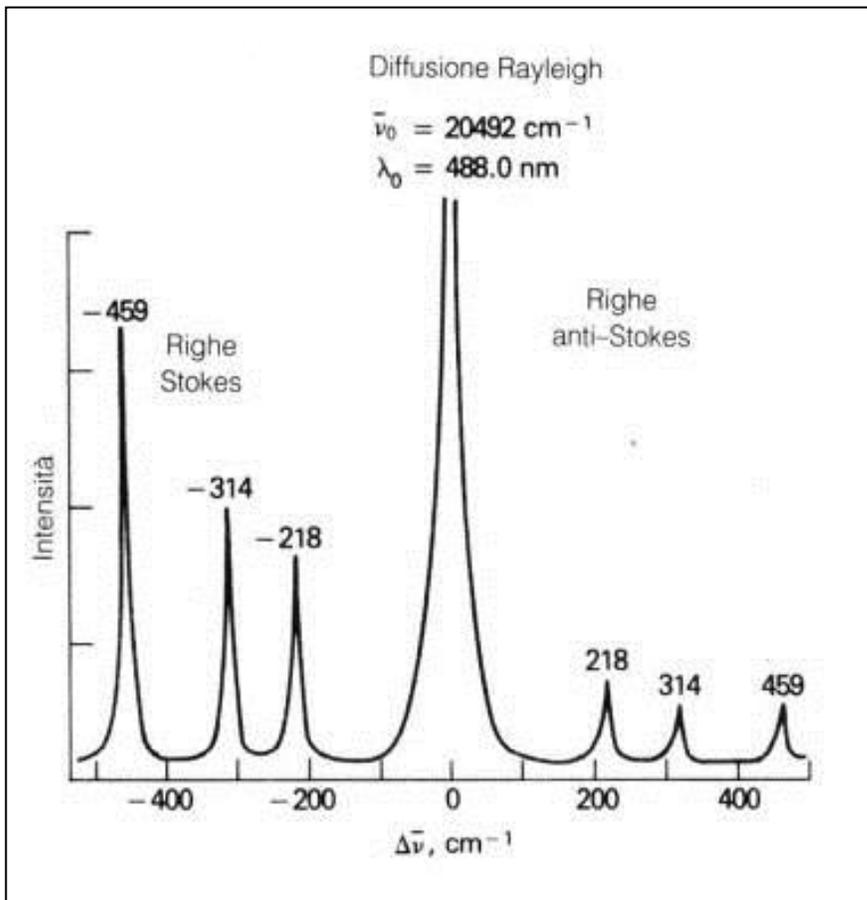


**Ottaderite** – esempio di meteora siderite

Read more <http://www.infonotizia.it/le-meteore-sideriti-spiegazione-classificazione-dei-meteoriti-riassunto-geochimica/>

# SPETTROSCOPIA RAMAN

Nel 1928 il fisico indiano **C. V. Raman** aveva osservato che, quando un materiale viene colpito da un fascio di radiazioni monocromatiche, una piccola parte della radiazione diffusa presenta una lunghezza d'onda diversa da quella della radiazione incidente.



In particolare, la radiazione diffusa è costituita da:

- **diffusione Rayleigh** alla stessa lunghezza d'onda della radiazione incidente, molto intensa;
- **righe Stokes** a lunghezze d'onda inferiori rispetto a quella della radiazione incidente;
- **righe anti-Stokes** a lunghezze d'onda superiori rispetto a quella della radiazione incidente.

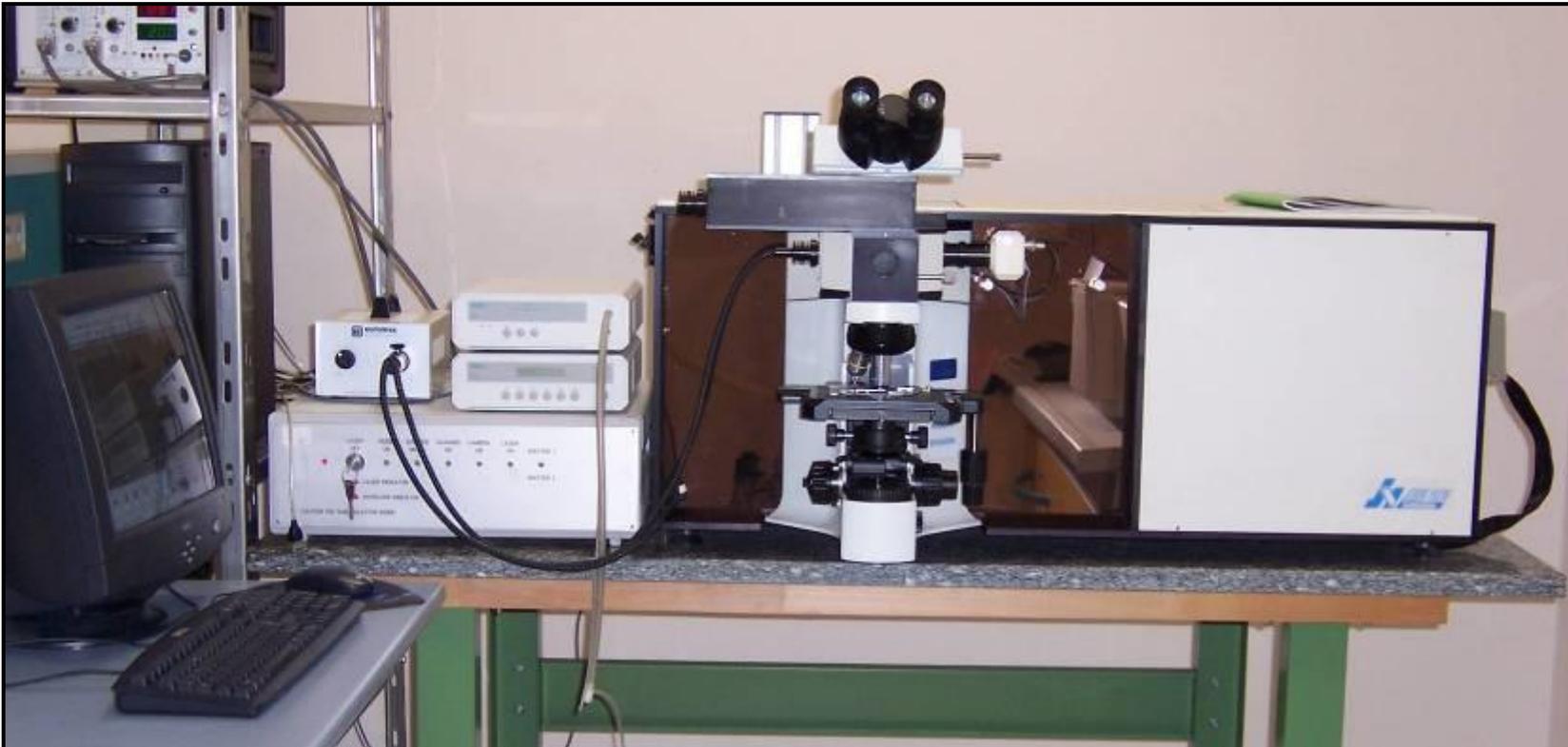
La frequenza delle bande **Stokes** e **anti-Stokes** è indipendente dalla lunghezza d'onda della sorgente eccitatrice, ma dipende solo dalle **vibrazioni** dei legami chimici che costituiscono il composto in esame. Questo fa sì che lo spettro Raman costituisca una “**impronta digitale**” del campione in esame.

**La spettroscopia micro-Raman non richiede alcuna preparazione dei campioni**

# STRUMENTAZIONE MICRO-RAMAN

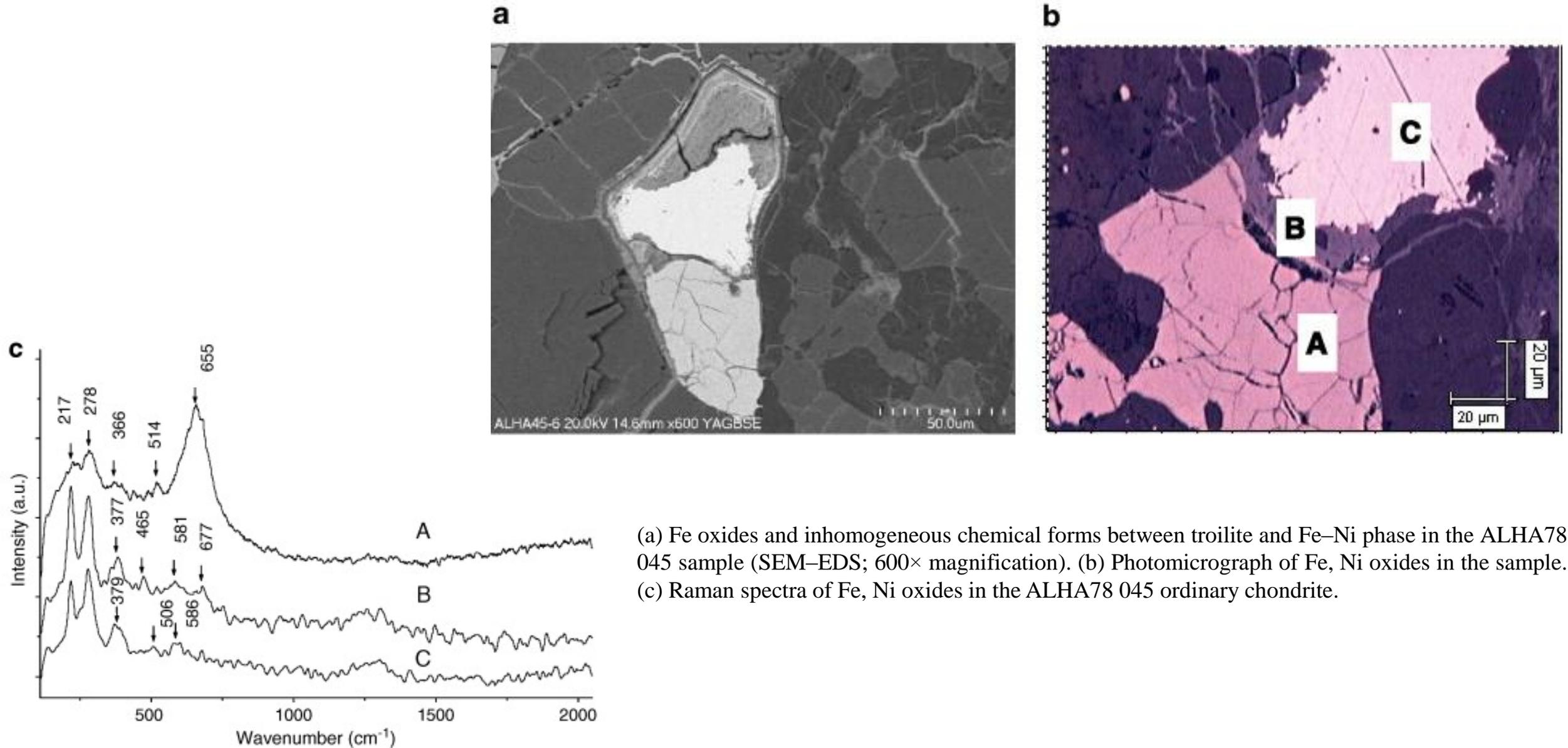
Tramite il microscopio ottico associato allo spettroscopio Raman è possibile andare a selezionare le aree di interesse da analizzare.

Gli spettroscopi micro-Raman, oggi, permettono anche di ottenere mappe in falsi colori, relativi alle diverse fasi che compongono il campione



Spettroscopio micro-Raman Jobin-Yvon HR 800 in dotazione presso il Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale, sede di Alessandria.

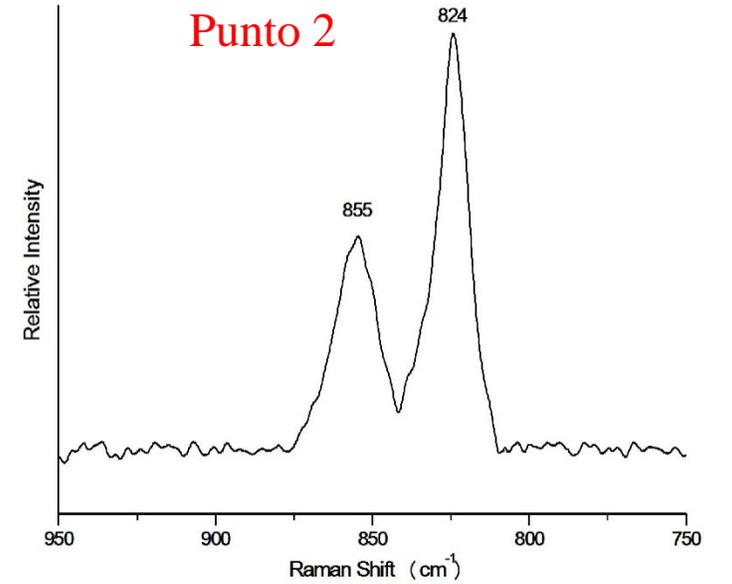
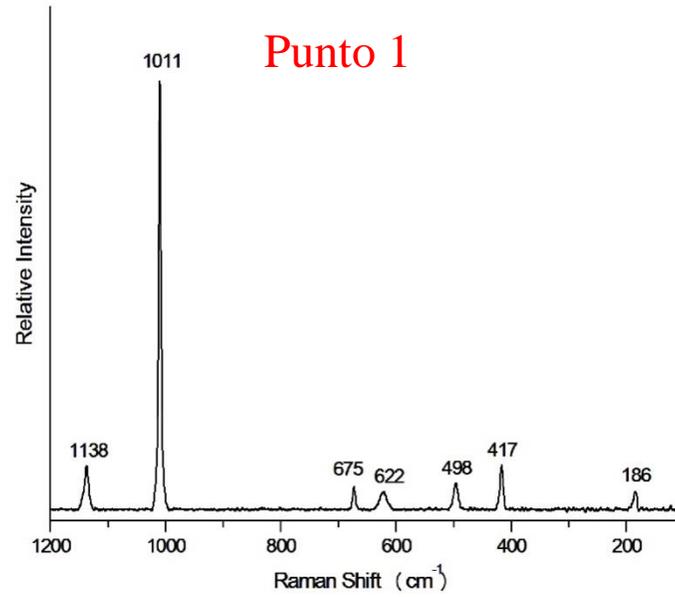
# SPETTROSCOPIA RAMAN E METEORITI



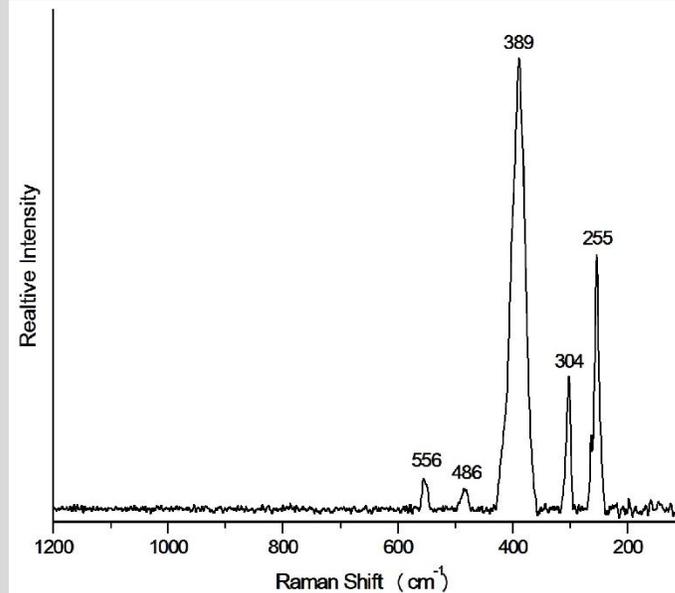
(a) Fe oxides and inhomogeneous chemical forms between troilite and Fe-Ni phase in the ALHA78 045 sample (SEM-EDS; 600× magnification). (b) Photomicrograph of Fe, Ni oxides in the sample. (c) Raman spectra of Fe, Ni oxides in the ALHA78 045 ordinary chondrite.

# SPETTROSCOPIA RAMAN E METEORITI

Aerolite NWA Marocco



Siderite Agudal Marocco



# MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE CON MICROSONDA EDS

Tecnica analitica che permette l'osservazione di campioni con **ingrandimenti** e **risoluzione migliaia di volte superiore** alla microscopia ottica ordinaria.

Un microscopio elettronico a scansione (SEM) genera **immagini**, in formato digitale, che sono il risultato della scansione della superficie del campione eseguita con un fascio di elettroni, accelerato e focalizzato. La microsonda in dispersione di energia (EDS), inoltre, permette di ottenere spettri relativi agli elementi chimici che compongono i campioni in esame. Inoltre, anche in questo caso, è possibile creare mappe, relative questa volta alla composizione chimica del materiale in esame.



SEM/EDS (FEI Quanta 200 ed EDAX) in dotazione presso il Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università del Piemonte Orientale, sede di Alessandria.

# SEM/EDS E METEORITI

Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 20, 74  
© SAI 2012

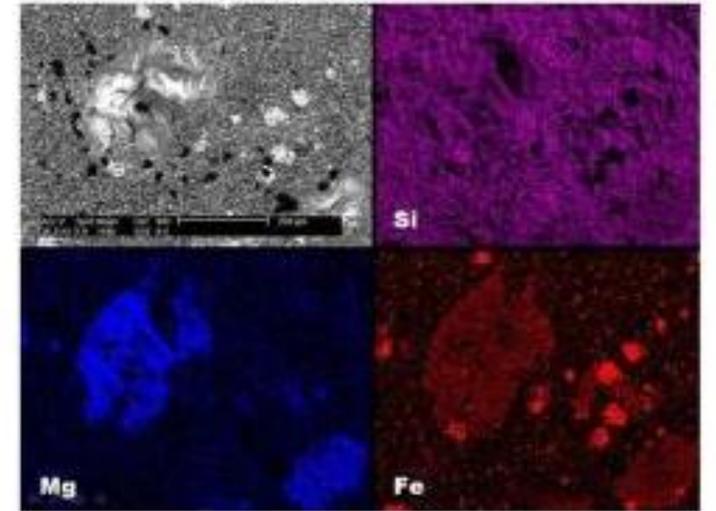
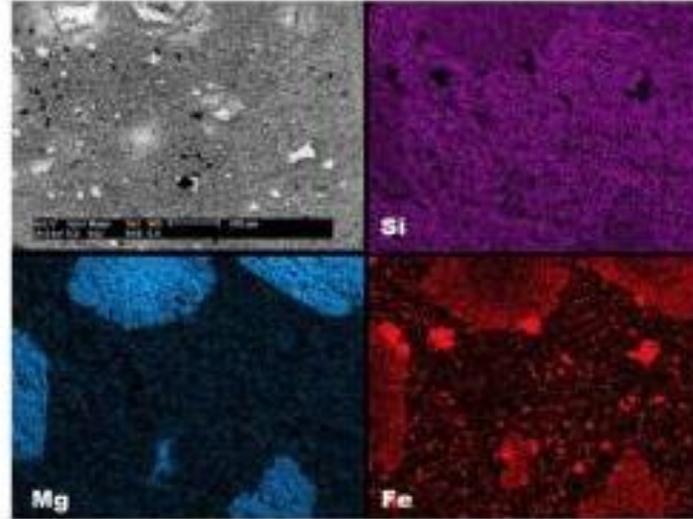
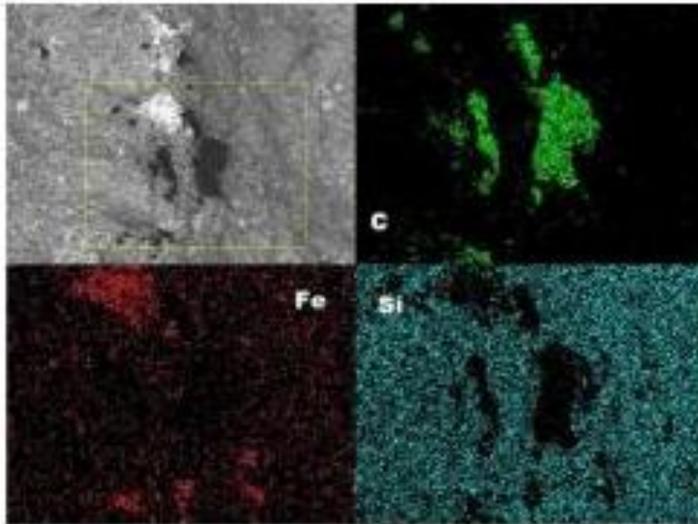
Memorie della  
Supplementi



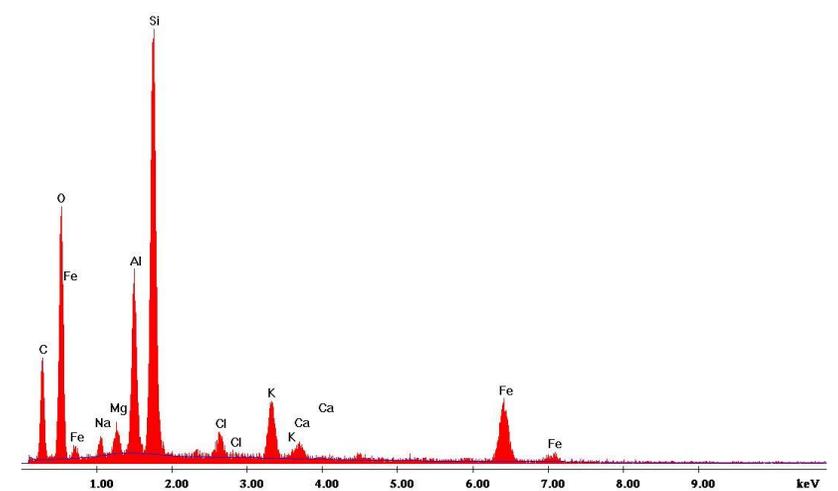
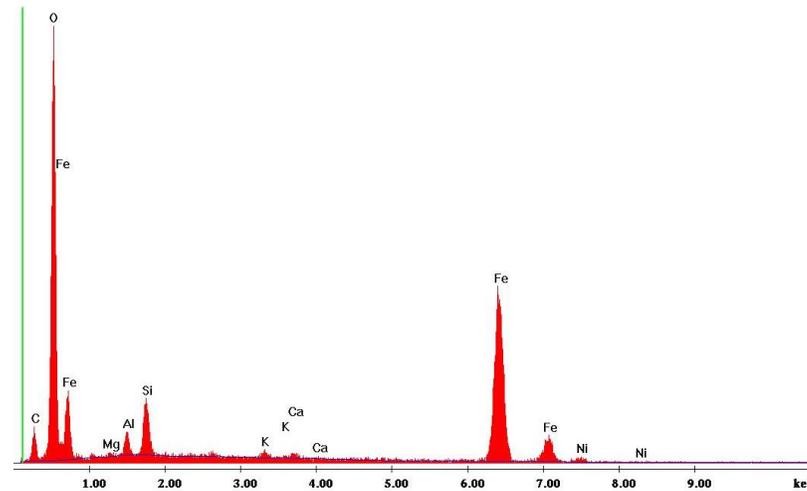
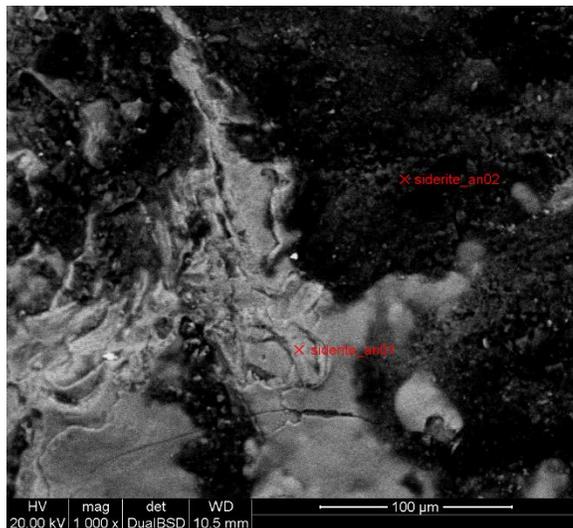
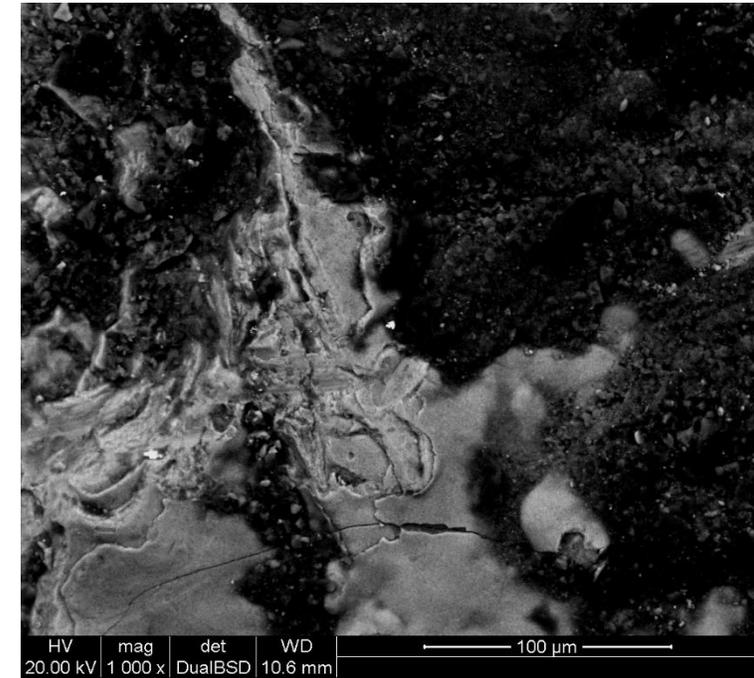
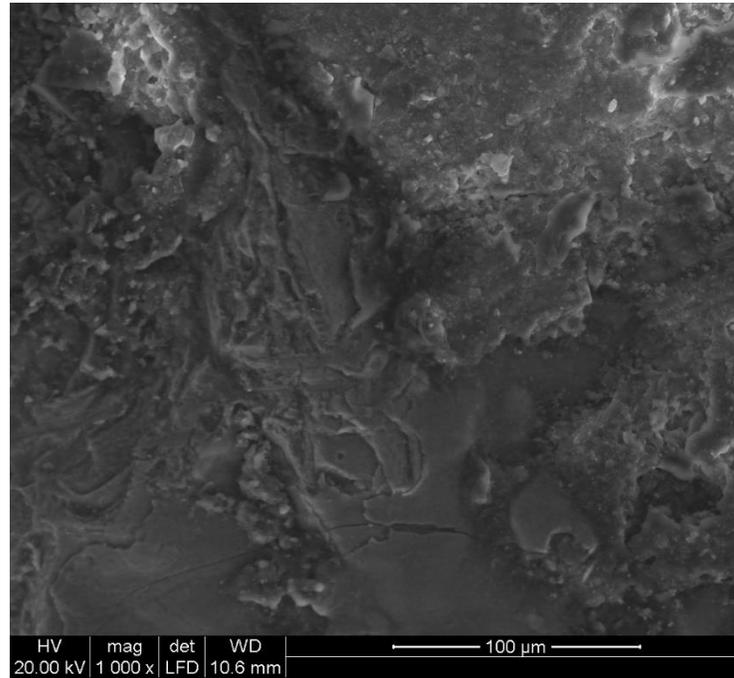
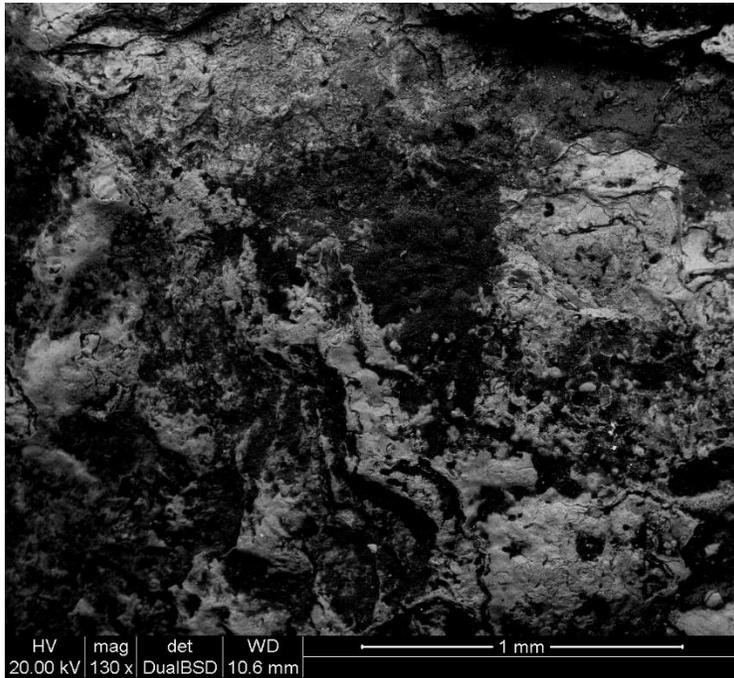
## SEM exploration of carbonaceous chondrites

C. Guaita

GAT-Milano Planetarium, Via Mameli 13, I-21049 Tradate (VA), Italy e-mail:  
c.guaita@libero.it

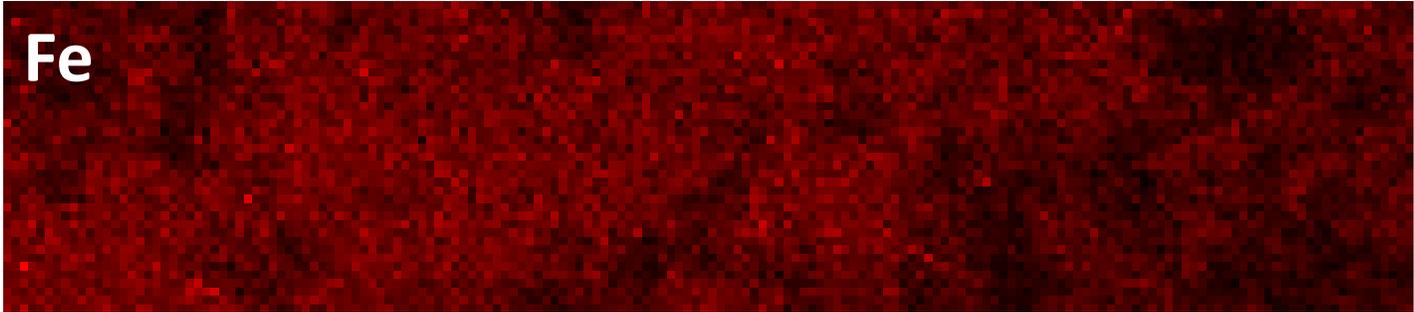


# SEM/EDS E METEORITI

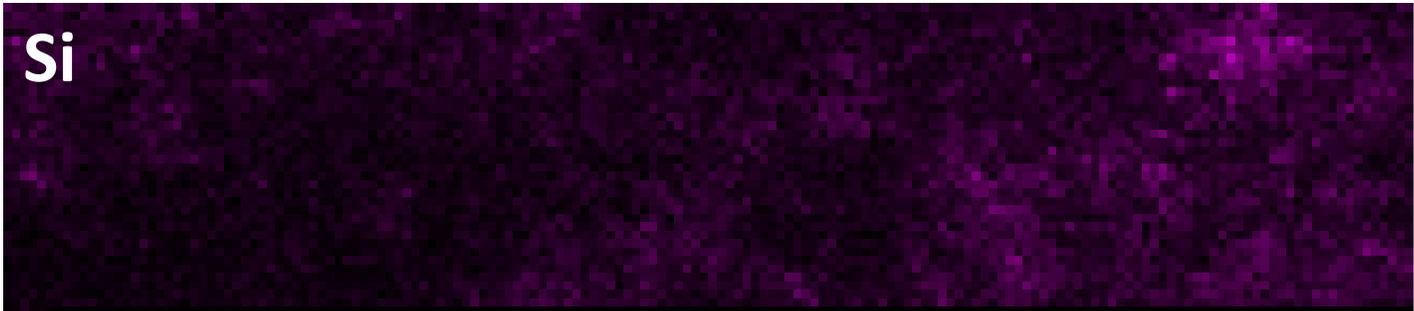


# SEM/EDS E METEORITI

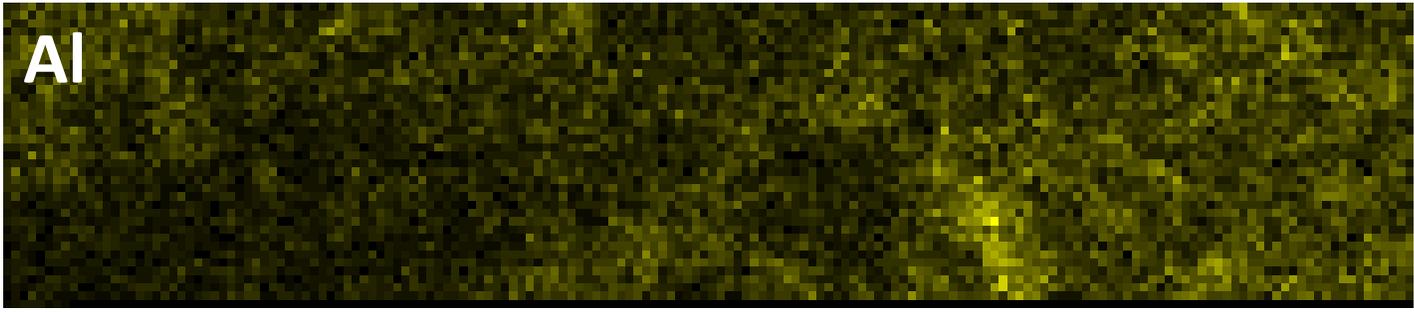
Fe

This image is a Secondary Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) elemental map for Iron (Fe). The map shows a dark red, granular texture, indicating the distribution of iron in the sample.

Si

This image is a Secondary Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) elemental map for Silicon (Si). The map shows a dark purple, granular texture, indicating the distribution of silicon in the sample.

Al

This image is a Secondary Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) elemental map for Aluminum (Al). The map shows a dark green, granular texture, indicating the distribution of aluminum in the sample.

# CONCLUSIONI

La forte dipendenza della traiettoria dalle condizioni atmosferiche richiede la messa a punto di un **modello** che tenga conto dei dati di ingresso della meteora in atmosfera, la sua evoluzione e i parametri meteorologici: profili del vento, della turbolenza, della temperatura, della densità e dell'umidità.

Sono da tenere in considerazione i dati forniti dai centri di meteorologia e quelli provenienti dai sondaggio con pallone a perdere eseguiti presso diversi aeroporti.

La **spettroscopia micro-Raman** permette la caratterizzazione dei minerali che compongono le meteoriti senza una particolare preparazione dei campioni. La tecnica, inoltre, risulta essere di rapida applicazione.

La **Microscopia Elettronica a Scansione con annessa microsonda in dispersione di energia** fornisce informazioni circa la morfologia e la composizione chimica delle meteoriti.